

فهرست مطالب

۱	مقدمه.....	۲
۲	شبیه سازی.....	۳
۲.۱	انتخاب ایرفویل.....	۳
۲.۲	آنالیز ایرفویل.....	۸
۲.۳	برونمایی نتایج.....	۱۰
۲.۴	طراحی ساختار پره.....	۱۱
۲.۵	تحلیل پایای المان پره.....	۱۲
۲.۶	تحلیل چند پارامتری.....	۱۶
۲.۷	هندسه سه بعدی.....	۱۸
۲.۸	شبیه سازی سه بعدی در خشکی.....	۱۹
۲/۸/۱	باد یکنواخت.....	۱۹
۲/۸/۲	باد آشفته.....	۲۰
۲.۹	شبیه سازی سه بعدی در ساحل.....	۲۱
۳	مباحث اقتصادی.....	۲۲
۴	برخی ملاحظات ایمنی.....	۲۸
۵	محاسبات با متلب.....	۳۰
۶	جمع بندی.....	۳۴
۷	منابع.....	۳۵

۱ مقدمه

انرژی بادی، به عنوان یکی از برجسته‌ترین و پویاترین منابع انرژی تجدیدپذیر، در دهه‌های اخیر به دلیل مزایای قابل توجه زیست‌محیطی، اقتصادی و اجتماعی، توجه گسترده‌ای را به خود جلب کرده است. از جمله مهم‌ترین مزایای انرژی بادی می‌توان به موارد زیر اشاره نمود: نخست آنکه، انرژی بادی منبعی کاملاً تجدیدپذیر و پایدار است که برخلاف سوخت‌های فسیلی، محدود نبوده و به طور طبیعی در دسترس قرار دارد. دوم آنکه، تولید برق از طریق انرژی بادی، فرآیندی پاک و عاری از آلاینده‌گی است که منجر به کاهش انتشار گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌های مضر هوا می‌شود و به حفظ محیط زیست و مقابله با تغییرات اقلیمی کمک شایانی می‌نماید. علاوه بر این، انرژی بادی با کاهش وابستگی به سوخت‌های فسیلی و تنوع بخشیدن به سبد انرژی، نقش مهمی در افزایش امنیت انرژی کشورها ایفا می‌کند. از منظر اقتصادی نیز، توسعه صنعت انرژی بادی منجر به ایجاد فرصت‌های شغلی جدید، رشد صنایع مرتبط و توسعه مناطق روستایی و محروم می‌شود. در بلندمدت، هزینه تولید برق از طریق انرژی بادی، با پیشرفت فناوری و افزایش مقیاس پروژه‌ها، به طور فزاینده‌ای رقابتی‌تر شده و در بسیاری از مناطق با هزینه تولید برق از سوخت‌های فسیلی برابری می‌کند و یا حتی از آن ارزان‌تر تمام می‌شود.

با وجود مزایای فراوان، توسعه و بهره‌برداری از انرژی بادی با چالش‌هایی نیز مواجه است. یکی از مهم‌ترین چالش‌ها، ماهیت متناوب و غیرقابل پیش‌بینی بودن وزش باد است که منجر به نوسان در تولید برق و نیاز به سیستم‌های ذخیره‌سازی انرژی و یا منابع پشتیبان می‌شود. همچنین، مزارع بادی ممکن است تأثیرات بصری بر مناظر طبیعی داشته باشند و در برخی موارد نگرانی‌هایی در مورد اثرات صوتی ناشی از توربین‌های بادی و تأثیر آنها بر حیات وحش، به ویژه پرندگان و خفاش‌ها، مطرح شده است. علاوه بر این، سرمایه‌گذاری اولیه برای احداث مزارع بادی می‌تواند قابل توجه باشد و نیاز به برنامه‌ریزی دقیق و مطالعات امکان‌سنجی جامع دارد. مسائل مربوط به جانمایی مناسب مزارع بادی، با در نظر گرفتن محدودیت‌های کاربری اراضی و مسائل اجتماعی و زیست‌محیطی نیز از جمله چالش‌های مهم در توسعه این صنعت به شمار می‌روند. با این وجود، تلاش‌های مستمر برای رفع این چالش‌ها از طریق پیشرفت‌های فناورانه، بهبود سیاست‌های حمایتی و افزایش آگاهی عمومی، همچنان ادامه دارد و چشم‌انداز روشنی را برای توسعه پایدار انرژی بادی نوید می‌دهد.

توربین‌های بادی، به عنوان سیستم‌های کلیدی تبدیل انرژی باد به الکتریسیته، نقشی محوری در بهره‌برداری از این منبع ارزشمند انرژی ایفا می‌کنند. این توربین‌ها در انواع مختلفی طراحی و ساخته می‌شوند که توربین‌های بادی محور افقی (Horizontal Axis Wind Turbines - HAWTs) به دلیل بازدهی بالا و عملکرد مناسب در شرایط مختلف، به عنوان غالب‌ترین نوع توربین‌های بادی در صنعت شناخته می‌شوند. طراحی بهینه و تحلیل دقیق

عملکرد توربین‌های بادی محور افقی، از اهمیت ویژه‌ای در افزایش راندمان تولید انرژی، کاهش هزینه‌ها و تضمین عملکرد پایدار این سیستم‌ها برخوردار است.

در این راستا، نرم‌افزارهای تخصصی شبیه‌سازی و تحلیل توربین‌های بادی، ابزارهای قدرتمندی را در اختیار مهندسان و محققان قرار می‌دهند تا بتوانند به بررسی دقیق‌تر و کارآمدتر عملکرد توربین‌های بادی بپردازند. نرم‌افزار QBlade به عنوان یکی از نرم‌افزارهای پیشرو در این زمینه، امکانات گسترده‌ای را برای طراحی، تحلیل آیرودینامیکی، تحلیل سازه‌ای و شبیه‌سازی عملکرد توربین‌های بادی فراهم می‌کند. این نرم‌افزار با بهره‌گیری از روش‌های محاسباتی پیشرفته و مدل‌سازی دقیق جریان هوا، امکان پیش‌بینی رفتار توربین بادی در شرایط مختلف عملیاتی را با دقت بالایی فراهم می‌آورد.

پروژه حاضر با هدف آشنایی مقدماتی با نرم‌افزار QBlade و بهره‌گیری از قابلیت‌های آن در طراحی و تحلیل یک توربین باد محور افقی با مشخصات معین انجام شده است. در این پروژه، یک توربین بادی سه پره با شعاع روتور ۲۰ متر و پروفیل ایرفویل NACA 4412 برای پره‌ها طراحی و مورد تحلیل قرار گرفته است. انتخاب پروفیل NACA 4412 به دلیل ویژگی‌های آیرودینامیکی مناسب و کاربرد گسترده آن در طراحی توربین‌های بادی، صورت پذیرفته است. شبیه‌سازی عملکرد توربین در سرعت باد ۱۲ متر بر ثانیه و شرایط هوای استاندارد با چگالی ۱.۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب انجام شده است تا رفتار توربین در شرایط کاری معمول بررسی شود.

گزارش حاضر، مستندسازی گام به گام فرآیند طراحی و تحلیل توربین بادی با استفاده از نرم‌افزار QBlade را ارائه می‌دهد. در این گزارش، مراحل مختلف ورود اطلاعات، انتخاب‌های صورت گرفته در نرم‌افزار، خروجی‌های حاصل از شبیه‌سازی و توضیحات مربوط به آن‌ها به صورت جامع و مصور ارائه خواهد شد. هدف نهایی این گزارش، ارائه یک مستند قابل فهم از فرآیند طراحی و تحلیل توربین بادی با استفاده از نرم‌افزار QBlade است.

۲ شبیه سازی

۲/۱ انتخاب ایرفویل

خانواده ایرفویل‌های NACA (کمیته مشورتی ملی هوانوردی) به دلیل سیستم نام‌گذاری استاندارد و مشخصات آیرودینامیکی قابل اعتماد، به طور گسترده‌ای در طراحی هواپیما، توربین‌های بادی و سایر کاربردهای مرتبط با جریان هوا مورد استفاده قرار می‌گیرند. سیستم نام‌گذاری ۴ رقمی NACA، یک روش ساده و در عین حال مؤثر برای تعریف شکل ایرفویل‌ها بر اساس ویژگی‌های هندسی کلیدی آن‌ها ارائه می‌دهد. ایرفویل NACA 4412 یکی از پرکاربردترین ایرفویل‌های این خانواده است و مشخصات آن به شرح زیر است:

تفسیر نامگذاری: NACA 4412

نامگذاری NACA 4 رقمی به صورت **NACA MPXX** است که در آن:

- **M** : رقم اول، میزان کمان (Camber) را به صورت درصد وتر ایرفویل نشان می‌دهد. در NACA 4412، رقم اول ۴ است، بنابراین کمان ماکزیمم ۴ درصد طول وتر است.
- **P** : رقم دوم، محل کمان ماکزیمم را به صورت دهم وتر از لبه حمله (Leading Edge) مشخص می‌کند. در NACA 4412، رقم دوم نیز ۴ است، بنابراین محل کمان ماکزیمم در ۰.۴ یا ۴۰ درصد طول وتر از لبه حمله قرار دارد.
- **XX** : دو رقم آخر، ضخامت ماکزیمم ایرفویل را به صورت درصد وتر نشان می‌دهند. در NACA 4412، دو رقم آخر ۱۲ است، بنابراین ضخامت ماکزیمم ایرفویل ۱۲ درصد طول وتر است.

مشخصات ایرفویل NACA 4412 در یک نگاه:

برای درک بهتر مشخصات ایرفویل NACA 4412، آن‌ها را در قالب یک جدول خلاصه می‌شود:

جدول ۱ - مشخصات ایرفویل

تفسیر	واحد	مقدار	مشخصه
کمان ماکزیمم ۴٪ طول وتر	درصد وتر	4	رقم اول (M)
محل کمان ماکزیمم در ۴۰٪ طول وتر از لبه حمله	دهم وتر	4	رقم دوم (P)
ضخامت ماکزیمم ۱۲٪ طول وتر	درصد وتر	12	دو رقم آخر (XX)
نام استاندارد ایرفویل	-	NACA 4412	نام ایرفویل
پراکندگی در توربین‌های بادی، هواپیماهای سبک و کاربردهایی با سرعت متوسط	-	-	کاربرد پیشنهادی

محاسبات ایرفویل: NACA 4412

شکل ایرفویل NACA 4412 با استفاده از معادلات ریاضی که ارائه شده‌اند، تعریف می‌شود. این معادلات، خط میانی (Camber Line) و توزیع ضخامت (Thickness Distribution) ایرفویل را محاسبه می‌کنند. سپس با ترکیب این دو، مختصات نقاط روی سطوح بالا و پایین ایرفویل به دست می‌آیند. در ادامه به شرح گام به گام این محاسبات بر اساس تصویر ارائه شده پرداخته می‌شود:

محاسبه خط میانی (Camber Line - Y_c) و شیب آن (dy_c/dx)

معادلات خط میانی بر اساس موقعیت نسبی x نسبت به موقعیت کمان ماکزیمم p در اینجا ($p=0.4$) به دو بخش تقسیم می‌شوند:

• بخش جلویی ایرفویل: ($0 \leq x \leq p$) (Front Section)

○ معادله کمان: (Camber)

$$Y_c = \frac{M}{p^2} \times (2px - x^2) \quad \circ$$

در اینجا:

▪ Y_c : ارتفاع خط میانی در موقعیت x

▪ M : نسبت کمان ماکزیمم به وتر ($M = 0.04$) برای (NACA 4412)

▪ P : موقعیت کمان ماکزیمم ($p = 0.4$) برای (NACA 4412)

▪ X : موقعیت افقی نسبت به لبه حمله، نرمالیزه شده به طول وتر (از ۰ تا ۱)

○ معادله شیب خط میانی: (Gradient)

$$\frac{dy_c}{dx} = \left(\frac{2M}{p^2}\right) \times (p - x) \quad \circ$$

این معادله، شیب خط میانی را در هر نقطه x محاسبه می‌کند که برای محاسبه زاویه θ (تتا) در مراحل بعدی ضروری است.

• بخش پشتی ایرفویل: ($p \leq x \leq 1$) (Back Section)

○ معادله کمان: (Camber)

$$Y_c = \frac{M}{(1-p)^2} \times (1 - 2p + 2Px - x^2) \quad \circ$$

○ معادله شیب خط میانی: (Gradient)

$$\frac{dy_c}{dx} = \frac{2M}{(1-p)^2} \times (p - x) \quad \circ$$

این معادلات مشابه بخش جلویی هستند، اما با در نظر گرفتن کمان در بخش پشتی ایرفویل و اطمینان از پیوستگی در نقطه کمان ماکزیمم. ($x=p$)

محاسبه توزیع ضخامت: (Thickness Distribution - Y_t)

توزیع ضخامت ایرفویل به صورت متقارن حول خط میانی توزیع می‌یابد. معادله توزیع ضخامت به صورت زیر است:

$$Y_t = \frac{T}{0.2} \times (a_0 x^{0.5} + a_1 x + a_2 x^2 + a_3 x^3 + a_4 x^4)$$

در اینجا:

- Y_t : نصف ضخامت ایرفویل در موقعیت x
- T : نسبت ضخامت ماکزیمم به وتر ($T = 0.12$) برای (NACA 4412)
- a_0, a_1, a_2, a_3, a_4 : ضرایب ثابت هستند که در تصویر ارائه شده‌اند و برای یک ایرفویل با ضخامت ۲۰٪ ($T/0.2 = 1$) معتبرند. برای ایرفویل با ضخامت متفاوت، ضخامت نسبی ($T/0.2$) ضرایب را تعدیل می‌کند.

$$a_0 = 0.2969 \quad \circ$$

$$a_1 = -0.126 \quad \circ$$

$$a_2 = -0.3516 \quad \circ$$

$$a_3 = 0.2843 \quad \circ$$

○ ($a_4 = -0.1015, a_4 = -0.1036$) (برای لبه فرار تیز یا لبه فرار بسته) در این پروژه معمولاً لبه فرار تیز در نظر گرفته می‌شود، مگر اینکه خلاف آن ذکر شود.

نکته: عبارت $T/0.2$ در معادله، ضرایب a_0 تا a_4 را برای ضخامت مورد نظر (T) تنظیم می‌کند. این ضرایب برای یک ایرفویل مرجع با ضخامت ۲۰٪ تعیین شده‌اند.

محاسبه زاویه تتا: (θ)

زاویه تتا در هر نقطه x به صورت زیر محاسبه می‌شود و نشان‌دهنده زاویه بین خط عمود بر خط میانی و محور افقی است:

$$\theta = \arctan\left(\frac{dy_c}{dx}\right)$$

در اینجا، dy_c/dx شیب خط میانی است که در مرحله ۱ محاسبه شد. تابع atan (آرکتانژانت) زاویه را بر حسب رادیان برمی گرداند که معمولاً برای محاسبات بعدی نیاز است.

محاسبه مختصات سطوح بالا و پایین ایرفویل: (Upper and Lower Surface Coordinates)

با استفاده از Y_t ، Y_c و θ ، مختصات سطوح بالا (Upper) و پایین (Lower) ایرفویل در هر نقطه x محاسبه می شوند:

• سطح بالا: (Upper Surface)

$$x_u = x - Y_t \sin(\theta) \quad \bullet$$

$$y_u = Y_c + Y_t \cos(\theta) \quad \bullet$$

• سطح پایین: (Lower Surface)

$$x_l = x + Y_t \sin(\theta) \quad \bullet$$

$$y_l = Y_c - Y_t \cos(\theta) \quad \bullet$$

در این معادلات:

○ (x_u, y_u) : مختصات سطح بالایی ایرفویل در نقطه x

○ (x_l, y_l) : مختصات سطح پایینی ایرفویل در نقطه x

روش ترسیم ایرفویل: (Plotting the Airfoil)

برای ترسیم دقیق ایرفویل، معمولاً از روش تکرار (Iteration) استفاده می شود. به این صورت که مقادیر مساوی از x در بازه $[0, 1]$ انتخاب شده و برای هر مقدار x ، مختصات سطوح بالا و پایین (x_u, y_u) و (x_l, y_l) محاسبه می شوند. اما برای تمرکز نقاط بیشتر در ناحیه لبه حمله و لبه فرار که انحنای بیشتری دارند، از فاصله گذاری کسینوسی (Cosine Spacing) استفاده می شود. در این روش، مقدار x به صورت زیر بر اساس یک پارامتر β بین 0 و π محاسبه می شود:

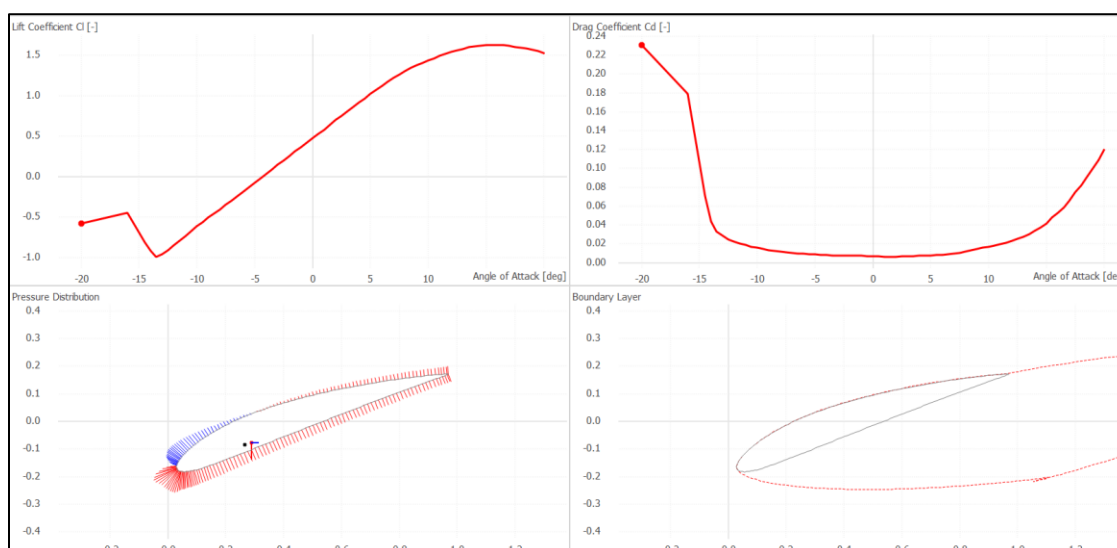
$$x = \frac{(1 - \cos(\beta))}{2} \quad \text{where: } 0 \leq \beta \leq \pi$$

با تغییر β از 0 تا π به صورت یکنواخت، مقادیر x در نزدیکی لبه های حمله و فرار متراکم تر شده و ترسیم دقیق تری از شکل ایرفویل به دست می آید.

۲/۲ آنالیز ایرفویل

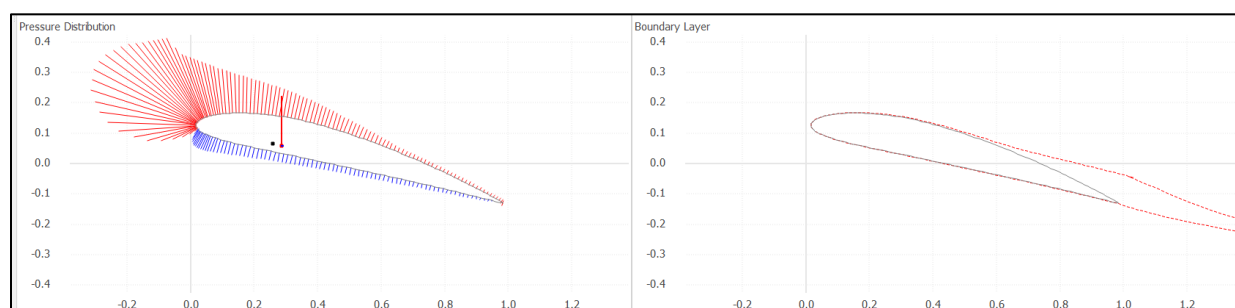
پس از انتخاب ایرفویل مناسب و اعمال مشخصات هندسی آن در محیط نرم افزار، مرحله بعد معطوف به تحلیل عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل در شرایط زوایای حمله متفاوت می باشد. زاویه حمله، به عنوان یکی از مهم ترین پارامترهای تأثیرگذار بر عملکرد ایرفویل، نقش تعیین کننده ای در میزان و نحوه برهمکنش جریان هوا با سطح ایرفویل ایفا می کند. تغییر در زاویه حمله منجر به دگرگونی قابل توجه در ضرایب آیرودینامیکی از جمله ضریب لیفت (C_L) و ضریب درگ (C_d) می گردد. این ضرایب، که نمایانگر نیروهای لیفت و درگ وارد بر ایرفویل هستند، تأثیر مستقیم و بسزایی بر عملکرد کلی توربین بادی اعمال می نمایند.

نیروی لیفت بهینه، از طریق ایجاد گشتاور چرخشی مناسب، به افزایش سرعت دوران پره های توربین و در نتیجه، بهبود بازدهی و افزایش توان تولیدی سیستم منجر می گردد. در مقابل، نیروی درگ نامطلوب، علاوه بر کاهش بازدهی آیرودینامیکی، می تواند موجب افزایش تنش های وارده بر ساختار پره و متعاقباً، افزایش احتمال آسیب های سازه ای و کاهش طول عمر مفید پره شود. از این رو، شناخت دقیق رفتار آیرودینامیکی ایرفویل در شرایط عملیاتی گوناگون، به ویژه در زوایای حمله مختلف، از اهمیت بنیادین در طراحی و بهینه سازی توربین های بادی برخوردار است. به منظور ارزیابی این رفتار، بخش محاسباتی تخصصی مربوط به ایرفویل در نرم افزار QBlade امکان تحلیل جامع عملکرد ایرفویل را در شرایط محیطی متنوع فراهم می آورد. به عنوان نمونه، در این مطالعه، عدد رینولدز به میزان $1e6$ به عنوان شرایط جریان در نظر گرفته شده و سپس، رفتار آیرودینامیکی ایرفویل NACA 4412 در گستره ای از زوایای حمله، به منظور مشخص یابی عملکرد آن مورد بررسی و ارزیابی قرار گرفته است.



شکل ۱ - نمودار های مربوط به رفتار ایرفویل

در شکل ۱، چهار نمودار به منظور بررسی رفتار آیرودینامیکی ایرفویل ارائه شده است. دو نمودار بالایی به تصویرسازی تغییرات ضرایب لیفت (C_L) و درگ (C_d) در گستره‌ای از زوایای حمله می‌پردازند. بر اساس این نمودارها، مشاهده می‌شود که در زوایای حمله منفی و مثبت با مقادیر بزرگ، ضریب درگ به نحو قابل توجهی افزایش می‌یابد و مقادیر بالایی را به خود اختصاص می‌دهد. این پدیده عمدتاً ناشی از افزایش چشمگیر درگ فشاری در زوایای حمله بالا است. افزایش درگ فشاری به دلیل جدایش جریان و شکل‌گیری نواحی گردابه‌ای بزرگ در سطوح ایرفویل اتفاق می‌افتد. این امر متعاقباً منجر به اعمال نیروی مقاوم قابل توجهی بر پره توربین می‌گردد که از منظر عملکرد بهینه مطلوب نخواهد بود. از طرف دیگر، در زوایای حمله منفی، ضریب لیفت به مقادیر منفی گرایش پیدا می‌کند. این موضوع دلالت بر آن دارد که نیروی لیفت وارده از جانب جریان باد بر ایرفویل در جهت مخالف نیروی لیفت مطلوب عمل نموده و چنانچه زاویه حمله نسبت به جهت چرخش پره‌ها معکوس باشد، می‌تواند سبب کاهش سرعت دورانی پره‌ها و اتلاف انرژی گردد. قابل توجه است که در زاویه حمله صفر درجه، به دلیل پیکربندی خاص ایرفویل NACA 4412، ضریب لیفت همچنان دارای مقدار مثبت بوده و بدین ترتیب، نیروی لیفت مؤثری تولید می‌گردد. با افزایش زاویه حمله، ضریب لیفت به مقدار ماکزیمم خود برای این ایرفویل مشخص می‌رسد و پس از آن، با ادامه افزایش زاویه، با کاهش تدریجی مواجه می‌گردد که نشان‌دهنده وقوع پدیده استال آیرودینامیکی است. در نمودار مربوط به ضریب درگ نیز به وضوح قابل مشاهده است که با کاهش زاویه حمله، ضریب درگ به تدریج کاهش یافته و در زوایای حمله پایین، سهم درگ اصطکاکی در مقایسه با درگ فشاری غالب می‌گردد. با این حال، با افزایش زاویه حمله، ضریب درگ نیز مجدداً افزایش می‌یابد که این افزایش به ویژه در زوایای حمله بزرگ مشهودتر است.



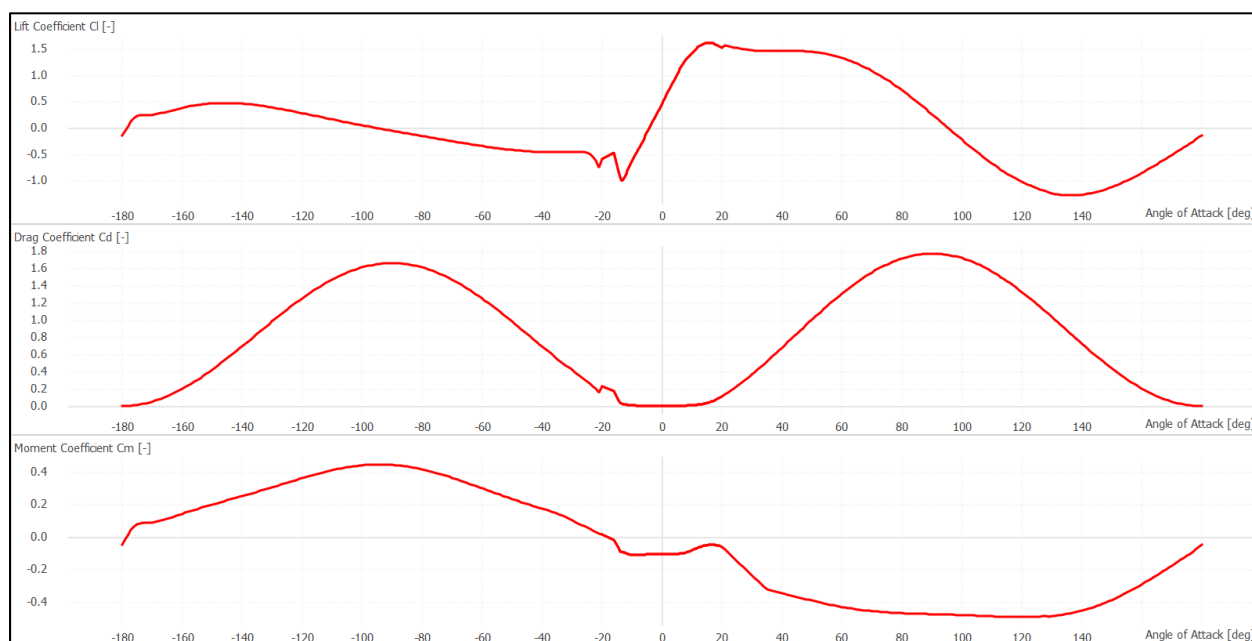
شکل ۲ - رفتار ایرفویل در زاویه ۱۵ درجه

در دو نمودار پایینی در شکل ۱، توزیع فشار استاتیک بر سطح ایرفویل و همچنین شکل‌گیری لایه مرزی در زاویه حمله منفی ۲۰ درجه مورد مطالعه قرار گرفته است. بر اساس این نمودارها، آشکار است که جدایش جریان از سطح ایرفویل به سرعت رخ داده و ناحیه وسیعی از سطح ایرفویل را تحت تأثیر خود قرار داده است. این جدایش جریان منجر به افزایش ناحیه فشار پایین در پشت ایرفویل و در نتیجه، افزایش قابل ملاحظه ضریب درگ می‌گردد.

در شکل ۲، وضعیت جریان حول ایرفویل در زاویه حمله مثبت ۱۵ درجه به تصویر کشیده شده است. در این زاویه حمله، ضریب لیفت تقریباً به مقدار بیشینه خود رسیده است. با این وجود، به علت وقوع جدایش جریان در ناحیه خلفی ایرفویل و گسترش لایه مرزی در این ناحیه، شاهد افزایش قابل توجه در ضریب درگ نیز هستیم که نشان دهنده سازش بین لیفت و درگ در این زاویه حمله است.

۲/۳ برون‌یابی نتایج

به منظور تکمیل تحلیل رفتار آیرودینامیکی ایرفویل و تعمیم نمودارهای زوایای حمله به دامنه وسیع‌تری از زوایا، می‌توان از روش برون‌یابی بهره برد. در این رویکرد، با به‌کارگیری روش‌های محاسباتی برون‌یابی، امکان تعیین رفتار آیرودینامیکی ایرفویل در تمامی زوایای حمله فراهم می‌آید. در پروژه حاضر، از روش برون‌یابی Montgomerie به این منظور استفاده شده است.



شکل ۳ - برون‌یابی نتایج

شکل ۳ به تصویر کشنده مجموعه نتایج ارزشمند و حاصل از پیاده‌سازی دقیق فرآیند برون‌یابی در نرم‌افزار QBlade می‌باشد. همان‌گونه که از پیش نیز بر اساس اصول آیرودینامیک انتظار می‌رفت، رفتار آیرودینامیکی ایرفویل مورد بررسی، به ویژه در زوایای حمله منفی، به طرز قابل توجهی متناظر با رفتار آن در زوایای حمله مثبت، به صورت تقریباً کامل متقارن در نمودار ضریب درگ، به نمایش درآمده و مشاهده می‌شود. این تقارن مشاهده شده کاملاً قابل توجیه و تبیین علمی است؛ زیرا پدیده آیرودینامیکی ایجاد درگ فشاری، اساساً تابعی مستقیم

از بزرگی زاویه حمله بوده و نه علامت آن به عبارت دیگر، درگ فشاری به طور غالب ناشی از جدایش جریان و شکل‌گیری گردابه‌ها در سطوح ایرفویل است، که این پدیده با افزایش مقدار مطلق زاویه حمله، صرف‌نظر از مثبت یا منفی بودن آن، تقویت می‌گردد و از نظر فیزیکی و رفتاری قابل پیش‌بینی و تکرارپذیر است. در نقطه مقابل این رفتار متقارن، با اعمال یک چرخش ۱۸۰ درجه‌ای فرضی به ایرفویل - تصور کنید ایرفویل حول محور عمود بر جهت جریان چرخیده باشد - ایرفویل به صورت معکوس در جهت عکس جریان باد قرار می‌گیرد و عملاً کارایی و اثربخشی ذاتی خود در تولید نیروی ضریب لیفت مثبت را به طور کامل از دست می‌دهد. دلیل بنیادین و کاملاً آشکار این پدیده، به طور مشخص و متمایز، شکل نامتقارن و دارای انحنای کمبر (Camber) ایرفویل NACA 4412 و زاویه قرارگیری و جهت‌گیری مشخص و از پیش تعیین شده‌ی آن نسبت به جریان باد غالب است. این عدم تقارن در عملکرد لیفت در زوایای مثبت و منفی، به خوبی بیانگر ماهیت تخصصی و جهت‌دار ایرفویل NACA 4412، برای عملکرد بهینه در شرایطی است که جریان هوا عمدتاً از جهت طراحی شده به آن برخورد نماید.

۲/۴ طراحی ساختار پره

در راستای طراحی و شبیه‌سازی توربین باد محور افقی با استفاده از نرم‌افزار QBlade، تعیین مشخصات هندسی پره‌ها از مراحل اساسی محسوب می‌گردد. با توجه به الزام پروژه مبنی بر شعاع روتور ۲۰ متری، در گام نخست، شعاع هاب توربین تعیین گردید. به طور معمول، شعاع هاب توربین‌های بزرگ مقیاس در محدوده ۲٪ الی ۵٪ شعاع روتور انتخاب می‌شود. با در نظر گرفتن این معیار و به منظور فراهم نمودن فضای کافی برای استقرار مکانیزم‌های کنترلی و اتصالات پره‌ها و همچنین ملاحظات طراحی، شعاع هاب به میزان ۲ متر برگزیده شد. بر این اساس، طول هر پره، که از تفاضل شعاع روتور از شعاع هاب به دست می‌آید، معادل ۱۸ متر محاسبه گردید.

در ادامه فرآیند طراحی، نوبت به تعیین مشخصات ایرفویل پره، به ویژه وتر (Chord) و زاویه پیچش (Twist) در نقاط کلیدی ریشه و نوک پره می‌رسد. در ناحیه ریشه پره، مجاورت با هاب و تحمل بیشترین بار سازه‌ای، مستلزم اتخاذ وتر بزرگتری می‌باشد. از این رو، وتر ریشه پره به میزان ۲.۵ متر انتخاب گردید که حدود ۱۲.۵ درصد شعاع روتور را شامل می‌شود و استحکام ساختاری مناسبی را برای این ناحیه تضمین می‌نماید. در خصوص زاویه پیچش ریشه، با در نظر گرفتن کاهش سرعت باد نسبی در این ناحیه به دلیل نزدیکی به محور چرخش، زاویه پیچش ۱۵ درجه برای ریشه پره منظور گردید. این مقدار، زاویه حمله بهینه‌تری را در شرایط سرعت باد نسبی کمتر در ریشه پره فراهم می‌آورد.

در مقابل، در ناحیه نوک پره، با هدف کاهش درگ اصطکاکی ناشی از سرعت بالای نوک پره و نیز کاهش وزن کلی پره، وتر نوک به میزان قابل توجهی کاهش یافته و ۰.۷۵ متر تعیین گردید. این مقدار معادل ۳۰ درصد وتر ریشه بوده و با کاهش سطح مقطع در معرض جریان هوا در ناحیه نوک، به کاهش درگ و بهبود عملکرد کلی

آیرودینامیکی توربین کمک می‌نماید. در ارتباط با زاویه پیکش نوک، به دلیل سرعت بالای باد نسبی در این ناحیه، زاویه پیکش نسبتاً کمی به میزان ۲ درجه مثبت در نظر گرفته شد. این مقدار، زاویه حمله را در محدوده بهینه در نوک پره تنظیم نموده و در عین حال از استال آیرودینامیکی در سرعت‌های بالای نوک پره جلوگیری می‌کند. شایان ذکر است، مقادیر ارائه شده برای وتر و زاویه پیکش در ریشه و نوک پره، نقطه شروعی برای فرآیند شبیه‌سازی و تحلیل در نرم‌افزار QBlade محسوب می‌شود. دستیابی به طراحی بهینه پره مستلزم انجام تحلیل‌های آیرودینامیکی و سازه‌ای دقیق‌تر، بررسی نتایج شبیه‌سازی و اعمال اصلاحات تکراری بر مقادیر وتر و پیکش در طول پره است.

۲/۵ تحلیل پایای المان پره

روش تحلیل "پایای مومنتوم المان پره (Steady Blade Element Momentum - BEM)" به عنوان یک روش محاسباتی اساسی در حوزه آیرودینامیک توربین‌های بادی، ابزاری قدرتمند جهت ارزیابی عملکرد روتور و تخمین بارهای آیرودینامیکی وارده بر پره‌ها فراهم می‌سازد. این روش با بهره‌گیری از ترکیب تئوری مومنتوم و مفهوم المان پره، به تحلیل جریان عبوری از روتور و تعامل آن با پره‌های توربین می‌پردازد. در روش BEM، پره توربین به تعدادی المان مستقل در امتداد طول آن تقسیم شده و عملکرد آیرودینامیکی هر المان به صورت جداگانه بر اساس مشخصات ایرفویل مقطع، زاویه حمله محلی و سرعت باد نسبی محاسبه می‌گردد. تئوری مومنتوم در این روش، ارتباط بین نیروهای آیرودینامیکی وارد بر روتور و تغییرات مومنتوم جریان هوا در عبور از دیسک روتور را برقرار می‌سازد. "پایا" بودن تحلیل BEM به این معناست که شرایط جریان به صورت میانگین زمانی در نظر گرفته شده و تغییرات گذرا و ناپایدار جریان نادیده گرفته می‌شوند. به عبارت دیگر، تحلیل بر مبنای سرعت باد متوسط و شرایط عملکردی پایدار توربین انجام می‌پذیرد. نتایج حاصل از تحلیل BEM شامل پیش‌بینی توان تولیدی توربین، نیروی رانش وارد بر روتور، توزیع بار آیرودینامیکی در طول پره‌ها و سایر پارامترهای عملکردی کلیدی می‌باشد. این روش، به دلیل تعادل بین دقت قابل قبول و سرعت محاسباتی نسبتاً بالا، به طور گسترده در طراحی اولیه و تحلیل عملکرد توربین‌های بادی و در نرم‌افزارهایی نظیر QBlade مورد استفاده قرار می‌گیرد.

نسبت سرعت نوک پره (TSR)، به عنوان یک شاخص کلیدی و مفهومی بنیادین در فرآیند طراحی و تحلیل توربین‌های بادی مدرن، به طور روشن و مستقیم بیانگر نسبت میان سرعت مماسی نوک پره‌های دوار روتور و سرعت جریان بادی است که به سمت توربین وزش می‌یابد. به بیان دقیق‌تر و به زبان ریاضی، این نسبت اساسی که از تقسیم نمودن سرعت خطی نوک پره بر سرعت باد آزاد و دست‌نخورده‌ی محیط محاسبه می‌گردد، به خوبی نشان می‌دهد که نوک پره‌های توربین، به چه میزان، نسبت به جریانی از باد که از ناحیه روتور عبور می‌کند، با سرعت بیشتری در حال حرکت است. نسبت سرعت نوک پره (TSR)، به خودی خود یک کمیت بدون بعد محسوب

می‌گردد، اما در عین حال دارای نقش تعیین‌کننده و بسیار حیاتی در شکل‌گیری عملکرد آیرودینامیکی توربین بادی است. مقدار TSR بهینه برای یک توربین بادی مشخص، به طور مستقیم بر تنظیم زاویه حمله ایرفویل‌های پره در نواحی مختلف شعاعی پره تاثیر عمیق می‌گذارد و از این طریق، بر میزان و کیفیت نیروهای آیرودینامیکی لیفت و درگ تولید شده و نهایتاً بر بازدهی و راندمان کلی عملکرد توربین تاثیرات بسزایی را اعمال می‌نماید. هدف نهایی از فرآیند طراحی بهینه پره‌ها و انتخاب هوشمندانه مقدار TSR مناسب، دستیابی به حداکثر ضریب توان (Cp) و در نهایت بیشترین میزان توان قابل استحصال و تبدیل از انرژی جنبشی باد در شرایط عملیاتی مورد نظر و غالب محیطی می‌باشد. در رویه شبیه‌سازی و تحلیل عملکرد توربین بادی در نرم‌افزارهای تخصصی مهندسی، نظیر نرم‌افزار پیشرفته QBlade، بررسی دقیق و تحلیل حساسیت مقادیر TSR و تاثیرات متغیر آن بر عملکرد جنبه‌های گوناگون توربین بادی، از درجه اهمیت بسیار بالایی برخوردار بوده و به عنوان ابزاری کارآمد و راهگشا در فرآیند بهینه‌سازی طراحی هندسی پره‌ها و تنظیم دقیق و کارآمد استراتژی‌های کنترلی توربین بادی مورد استفاده قرار می‌گیرد.

یکی دیگر از مفاهیم کلیدی در تحلیل توربین بادی، ضریب القای محوری است. ضریب القای محوری (Axial Induction Factor)، که غالباً با نماد 'a' نمایش داده می‌شود، یک کمیت بی‌بعد بسیار مهم در تحلیل آیرودینامیکی توربین‌های بادی به شمار می‌رود و مبین میزان کاهش سرعت جریان هوا در راستای محور روتور، در اثر عبور از صفحه روتور توربین می‌باشد. به بیان دقیق‌تر، ضریب القای محوری، کسری از سرعت باد ورودی است که سرعت جریان هوا در صفحه روتور به آن میزان کاهش می‌یابد. به عنوان مثال، ضریب القای محوری $a = 0.3$ به این معناست که سرعت باد در صفحه روتور ۳۰٪ کمتر از سرعت باد آزاد و دست‌نخورده پیش از رسیدن به توربین است. این کاهش سرعت، پیامد اجتناب‌ناپذیر فرآیند استخراج انرژی از باد توسط توربین بادی است، چرا که مطابق با قانون پایستگی مومنتوم، برای انتقال انرژی از جریان باد به روتور، لازم است سرعت جریان هوا در حین عبور از روتور کاهش یابد. در واقع، ضریب القای محوری نمایانگر میزان "انرژی‌گذاری" روتور بر جریان باد و میزان انرژی استخراج‌شده از آن می‌باشد.

مقدار ضریب القای محوری در شرایط عملکردی بهینه توربین‌های بادی محور افقی، عموماً در محدوده بین ۰ تا ۰.۵ قرار دارد. محدودیت نظری برای مقدار ماکزیمم ضریب القای محوری، ۰.۵ می‌باشد که از قانون بتز (Betz Limit) مشتق می‌گردد و نشان‌دهنده حداکثر بازدهی تئوری قابل دستیابی برای یک توربین بادی ایده‌آل است. مقادیر بالاتر از ۰.۵ برای ضریب القای محوری، اگرچه به صورت تئوری قابل تصور هستند، اما در عمل عموماً منجر به کاهش بازدهی و افزایش درگ و آشفته‌گی جریان می‌گردند و نشان‌دهنده عملکرد غیربهینه توربین می‌باشند. مقادیر منفی و یا بزرگتر از ۱ برای ضریب القای محوری نیز از نظر فیزیکی در چارچوب مدل‌های ساده BEM غیرواقعی بوده و معمولاً نشان‌دهنده اشکال در محاسبات یا شرایط نامعتبر هستند.

ضریب القای محوری (Axial Induction Factor)، به عنوان یک پارامتر کلیدی در تحلیل آیرودینامیکی روتور توربین‌های بادی، نقشی بنیادین در تئوری مومنتوم عنصر پره (Blade Element Momentum - BEM) ایفا می‌نماید. این روش تحلیلی، که به طور گسترده در صنعت توربین بادی به کار گرفته می‌شود، به منظور پیش‌بینی عملکرد و ارزیابی بارهای آیرودینامیکی وارده بر پره‌های روتور، از ضریب القای محوری به عنوان یک واسطه اصلی برای مدل‌سازی برهمکنش بین جریان باد و روتور بهره می‌گیرد.

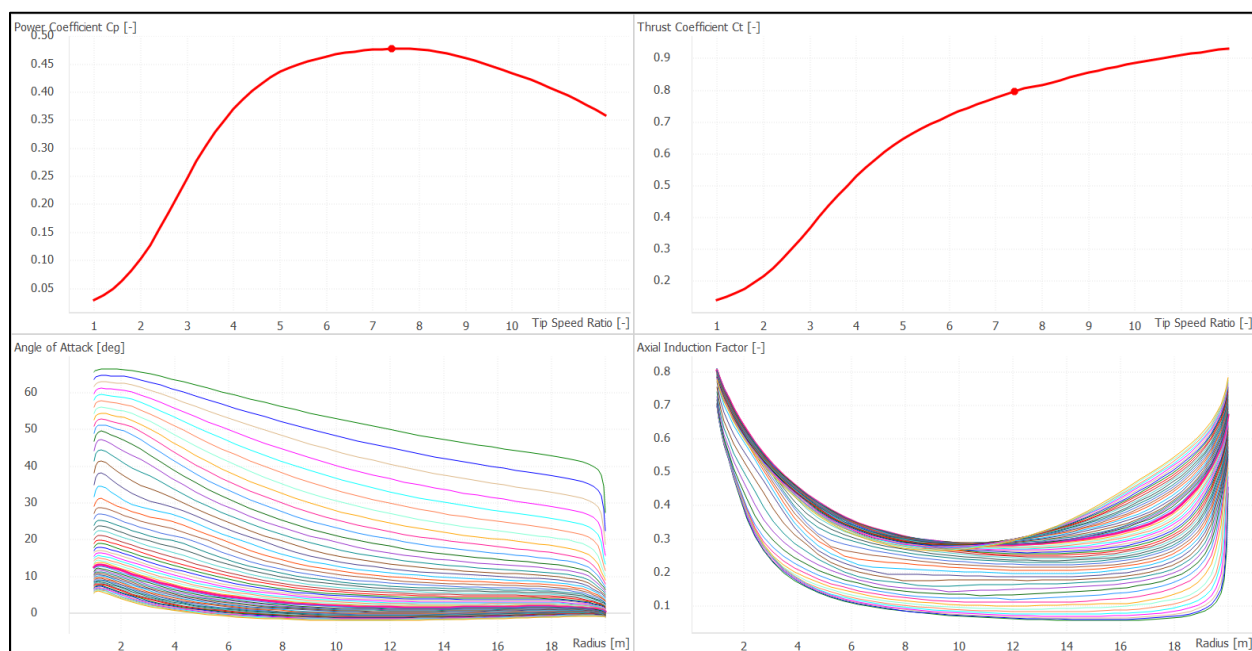
در چارچوب روش BEM، ضریب القای محوری به صورت ضمنی و تکراری محاسبه می‌گردد. این فرآیند محاسباتی پیچیده، با یک فرض اولیه برای مقدار ضریب القا آغاز می‌شود. این مقدار اولیه، که اغلب بر اساس تجربه یا نتایج تحلیل‌های ساده‌تر انتخاب می‌گردد، به عنوان نقطه‌ی شروع فرآیند تکرار به کار گرفته می‌شود. سپس، با استفاده از این مقدار اولیه ضریب القا، نیروهای آیرودینامیکی (شامل نیروهای لیفت و درگ) وارد بر هر یک از المان‌های پره که پره به آن تقسیم شده است، محاسبه می‌گردند. این محاسبات بر اساس مشخصات ایرفویل مقطع پره در هر المان، زاویه حمله محلی و سرعت جریان باد نسبی اعمال شده بر آن المان انجام می‌پذیرند.

در گام بعدی، تئوری مومنتوم به کار گرفته می‌شود تا ارتباط بین نیروهای آیرودینامیکی محاسبه شده در المان‌های پره و تغییرات مومنتوم جریان هوا در حین عبور از صفحه روتور برقرار گردد. بر اساس این ارتباط، مقدار جدیدی برای ضریب القای محوری محاسبه می‌گردد. این مقدار جدید، به عنوان یک تخمین به‌روزرسانی شده از میزان کاهش سرعت جریان باد در صفحه روتور، نسبت به مقدار اولیه، به دست می‌آید. این فرآیند تکراری، شامل محاسبه نیروهای آیرودینامیکی و به‌روزرسانی ضریب القا، بارها تکرار می‌شود تا زمانی که همگرایی حاصل گردد. همگرایی در این فرآیند به معنای آن است که مقدار ضریب القای محوری در تکرارهای متوالی، تغییرات بسیار اندکی از خود نشان می‌دهد و به یک مقدار ثابت و پایدار میل می‌کند. این مقدار همگرا شده‌ی ضریب القای محوری، به عنوان یک تخمین قابل اعتماد از رفتار جریان در صفحه روتور و برهمکنش آن با پره‌ها در نظر گرفته می‌شود.

مقدار ضریب القای محوری، تأثیر مستقیم و قابل ملاحظه‌ای بر عملکرد توربین بادی اعمال می‌نماید. افزایش ضریب القا (تا رسیدن به یک مقدار بهینه)، به معنای استخراج بیشتر انرژی از جریان باد و در نتیجه، افزایش توان تولیدی توربین بادی خواهد بود. این افزایش توان، ناشی از افزایش گشتاور چرخشی وارد بر روتور در اثر تغییر در سرعت جریان باد است. با این حال، افزایش بیش از حد ضریب القای محوری، فراتر از مقدار بهینه، می‌تواند اثرات نامطلوبی نیز به همراه داشته باشد. یکی از مهم‌ترین این اثرات نامطلوب، افزایش درگ فشاری وارد بر پره‌ها و روتور است. درگ فشاری، که ناشی از جدایش جریان و تشکیل نواحی گردابه‌ای در پشت پره‌ها است، با افزایش ضریب القا، به طور تصاعدی افزایش یافته و منجر به کاهش بازدهی آیرودینامیکی کلی توربین می‌گردد. به علاوه، افزایش

بیش از حد ضریب القا می‌تواند پایداری جریان عبوری از روتور را نیز تحت تأثیر قرار داده و منجر به ناپایداری‌ها و آشفته‌گی‌های جریان (مانند استال آیرودینامیکی) گردد.

ضریب القای محوری، علاوه بر تأثیر بر توان تولیدی و بازدهی آیرودینامیکی، بر نیروی رانش (Thrust Force) وارد بر روتور و مشخصات جریان دنباله (Wake) توربین نیز تأثیرگذار است. نیروی رانش، که نیرویی در جهت مخالف جریان باد و موازی با محور روتور است، به طور مستقیم به ضریب القای محوری وابسته بوده و با افزایش ضریب القا، مقدار آن نیز افزایش می‌یابد. نیروی رانش، عاملی مهم در طراحی سازه‌ای دکل و فونداسیون توربین بادی به شمار می‌رود و باید در محاسبات استحکام و پایداری سازه به دقت لحاظ گردد. همچنین، مشخصات جریان دنباله توربین، شامل سرعت، تلاطم و فشار جریان در پایین‌دست روتور، تحت تأثیر ضریب القای محوری قرار دارد. این مشخصات جریان دنباله، در بررسی اثرات محیطی مزارع بادی، به ویژه در ارزیابی فاصله بهینه بین توربین‌ها در مزارع بادی بزرگ مقیاس و نیز تأثیر مزارع بادی بر آب و هوا و اکوسیستم منطقه، حائز اهمیت فراوان است.



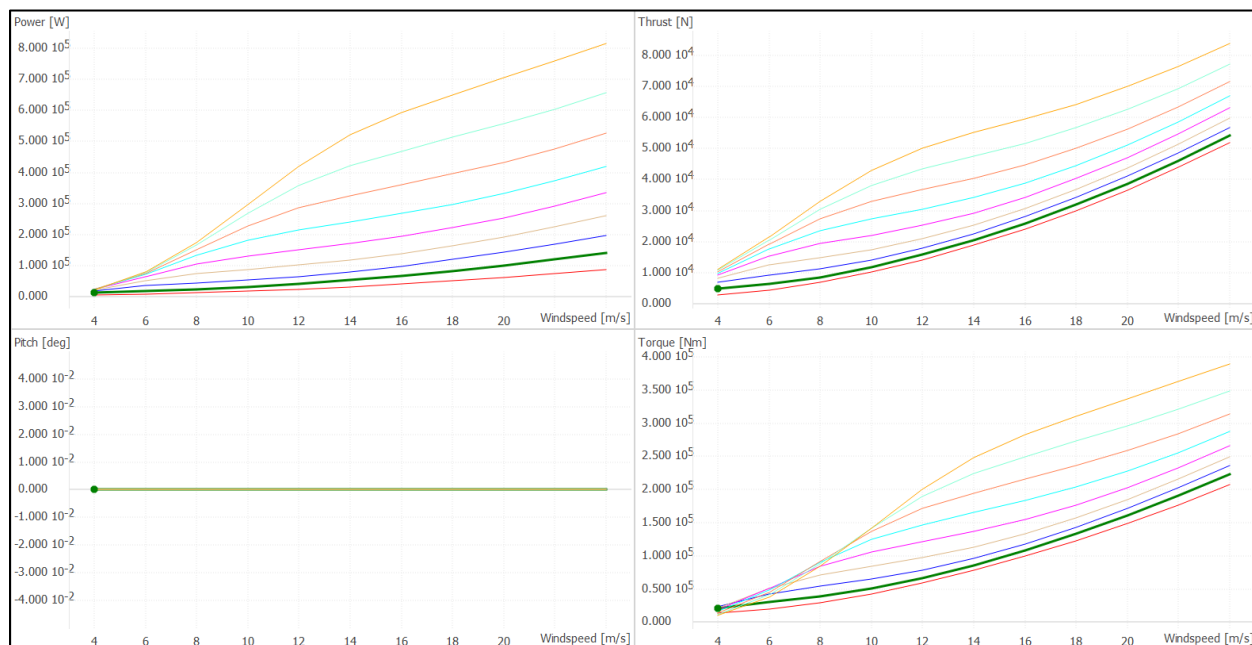
شکل ۴ - نتایج محاسبات مربوط به روتور

شکل ۴ نمایانگر نتایج محاسبات نرم‌افزاری مرتبط با عملکرد روتور توربین بادی طراحی شده می‌باشد. با توجه به نمودار ضریب توان (Cp) در برابر نسبت سرعت نوک پره (TSR)، مشخص می‌گردد که ماکزیمم ضریب توان در حدود TSR معادل ۷.۵ حاصل می‌شود. با این وجود، در همین TSR، ضریب تراست (Ct) مقداری در حدود ۰.۸ را نشان

می‌دهد و با افزایش TSR، امکان ارتقا این مقدار تا سطح ۰.۹ نیز فراهم می‌گردد؛ لیکن، این افزایش ضریب تراست، توام با کاهش ضریب توان (Cp) خواهد بود که نشان‌دهنده مصالحه بین بازدهی توان و نیروی تراست روتور در این ناحیه عملکردی است. به علاوه، نمودارهای زوایای حمله در طول شعاع پره و ضریب القای محوری نیز در نمودارهای پایین‌تر شکل ۴، به تفکیک شعاع‌های مختلف، به وضوح قابل مشاهده و بررسی می‌باشند.

۲/۴ تحلیل چند پارامتری

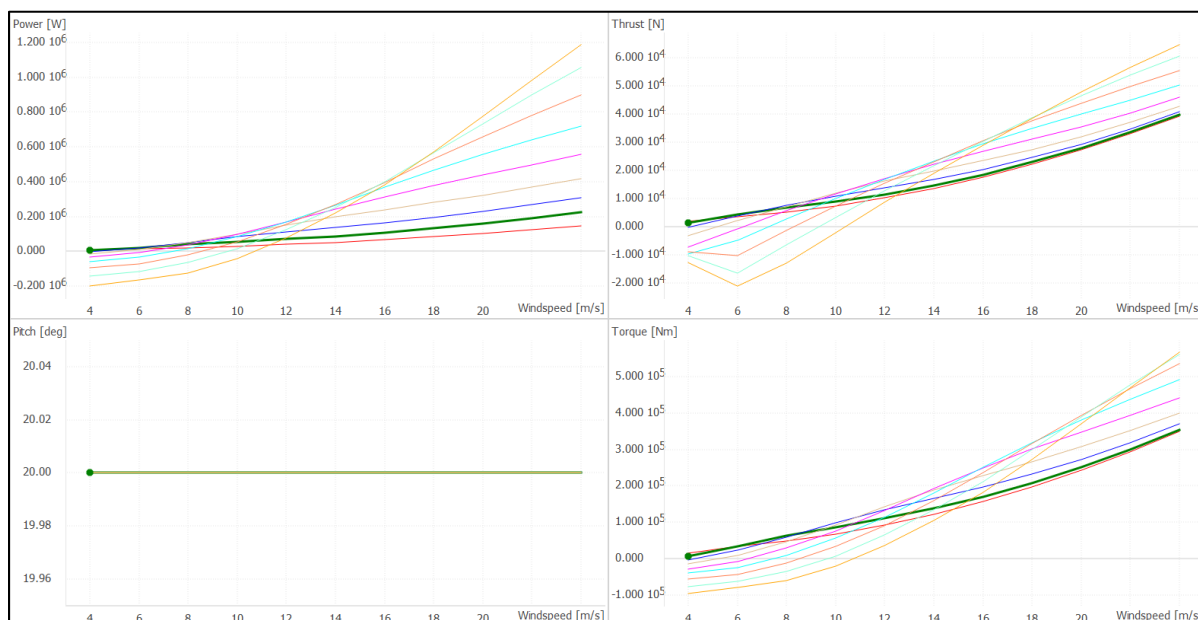
بخش دیگری از قابلیت‌های تحلیلی نرم‌افزار QBlade به تحلیل چندپارامتری عملکرد توربین اختصاص دارد. در این بخش، امکان بررسی عملکرد توربین در معرض سرعت‌های باد متغیر و سرعت‌های گردش دورانی متفاوت فراهم آمده و توان تولیدی سیستم در این شرایط قابل ارزیابی می‌باشد. شکل ۵ حاوی چهار نمودار است که نتایج حاصل از این شبیه‌سازی را به تصویر می‌کشند. در نمودار بالایی، میزان توان تولیدی و نیروی اعمالی (تراست) به عنوان تابعی از سرعت باد نشان داده شده است. همان‌طور که آشکار است، با افزایش سرعت باد، توان تولیدی نیز به طور پیوسته افزایش می‌یابد. با این حال، اثر سرعت گردش دورانی توربین نیز حائز اهمیت است. رنگ‌های مختلف به‌کاررفته در این نمودار، نمایانگر سرعت‌های زاویه‌ای مختلف از ۴ تا ۲۰ دور در دقیقه (rpm) با گام تغییرات ۲ دور در دقیقه می‌باشند. مشاهده می‌گردد که با افزایش سرعت زاویه‌ای روتور نیز، توان تولیدی افزایش پیدا می‌کند. البته، لازم به ذکر است که در سرعت‌های دورانی بسیار بالا، احتمال بروز آسیب‌های سازه‌ای و خرابی توربین افزایش می‌یابد. به منظور پیشگیری از این مخاطرات، در طراحی توربین‌های بادی، معمولاً یک سرعت حد بحرانی برای خاموش‌سازی و توقف اضطراری توربین تعریف می‌گردد. به‌هنگام عبور از این سرعت مجاز، سیستم کنترل توربین به صورت خودکار وارد عمل شده و فرآیند توقف را آغاز می‌نماید. برای توقف توربین، می‌توان از سازوکارهای مختلفی از جمله تغییر زاویه حمله پره‌ها به منظور ایجاد لیفت منفی و ترمزهای مکانیکی استفاده نمود. در نمودارهای بخش پایینی شکل ۵ نیز، روندهای مشابهی در رابطه با تاثیر سرعت باد و سرعت دورانی روتور بر گشتاور تولیدی توسط نیروهای آیرودینامیکی باد قابل مشاهده است. شایان ذکر است که در این نمودارها، زاویه پیچ پره‌ها به منظور تمرکز بر تاثیر سایر پارامترها، بر مقدار ۰ درجه تثبیت شده است.



شکل ۵ - نتایج تحلیل چند پارامتری

با این حال، همان‌گونه که پیش‌تر نیز اشاره گردید، زاویه پیچ پره‌ها می‌تواند تأثیر قابل توجهی بر عملکرد توربین بادی اعمال نماید و حتی به عنوان مکانیزمی مؤثر جهت کنترل و توقف اضطراری توربین مورد بهره‌برداری قرار گیرد. به منظور بررسی کمی و کیفی تأثیر زاویه پیچ پره‌ها، مقدار ۲۰ درجه برای زاویه پیچ در شبیه‌سازی اعمال گردید و نتایج حاصله مورد تحلیل واقع شد. نتایج شبیه‌سازی که در شکل ۶ به وضوح قابل مشاهده است، مؤید این موضوع می‌باشند که اعمال زاویه پیچ بزرگ به پره‌ها، اثرات نامطلوبی بر تولید نیرو و گشتاور در روتور توربین و در نتیجه، بر توان تولیدی سیستم برجای می‌گذارد. این تأثیرات منفی، به‌ویژه در سرعت‌های باد پایین‌تر، بارزتر بوده و در برخی از نواحی عملکردی، حتی منجر به ایجاد گشتاور معکوس در روتور گردیده که پتانسیل توقف توربین را در پی دارد. این نتایج، بر اهمیت حیاتی وجود یک سیستم کنترلی دقیق و کارآمد در توربین‌های بادی تأکید می‌نمایند. در واقع، عدم تجهیز توربین به یک سیستم کنترلی هوشمند و برنامه‌ریزی‌شده برای مواجهه با

شرایط عملیاتی مختلف، می‌تواند احتمال بروز خرابی‌های سازه‌ای و اختلال در عملکرد بهینه توربین را به نحو چشمگیری افزایش دهد.



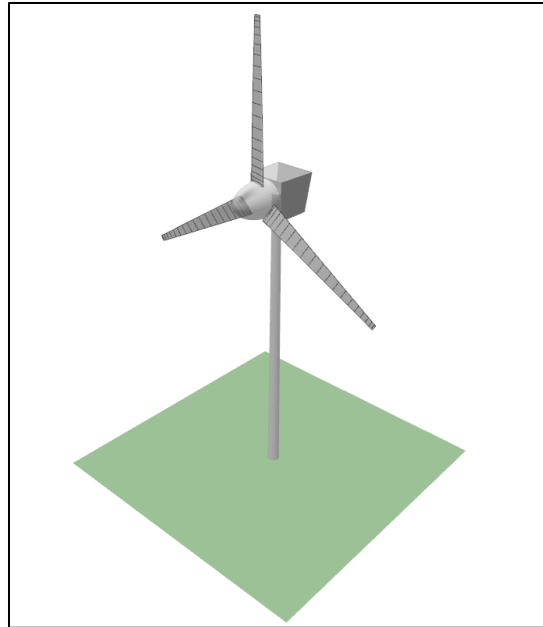
شکل ۶ - نتایج تحلیل چند پارامتری - زاویه پیچ ۲۰ درجه

۲/۷ هندسه سه بعدی

هندسه سه بعدی توربین بادی مطابق با جدول زیر در نظر گرفته شده است :

جدول ۲- مشخصات هندسه سه بعدی

واحد	مقدار	مشخصه
متر	۳.۳۳	بیرون زدگی روتور
متر	۴۰	ارتفاع برج
متر	۰.۵۷۱	شعاع بالای برج
متر	۰.۸	شعاع پایین برج
درجه	۰	زاویه انحراف محور روتور
درجه	۰	زاویه مخروطی روتور

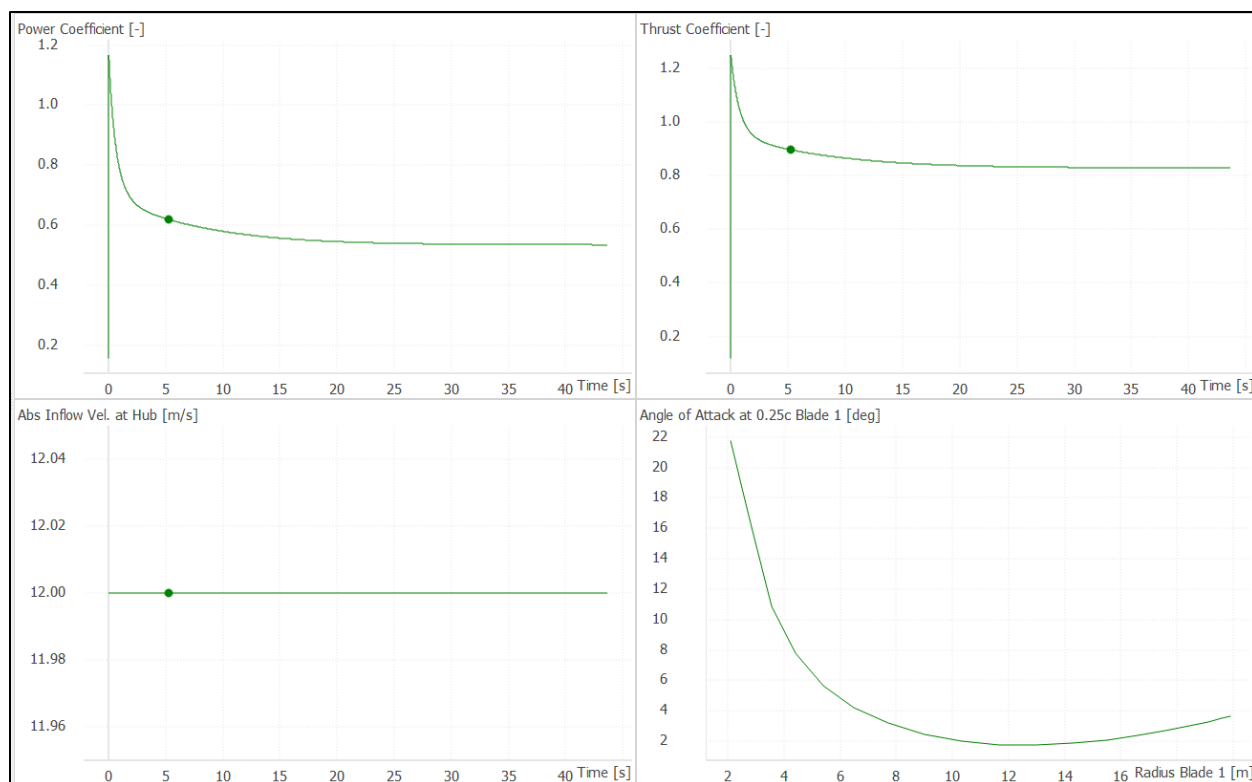


شکل ۷ - نمایی سه بعدی از توربین

۲/۸ شبیه سازی سه بعدی در خشکی

۲/۸/۱ باد یکنواخت

در بخش نهایی قابلیت‌های تحلیلی نرم‌افزار QBlade، امکان انجام تحلیل سه‌بعدی از عملکرد توربین بادی فراهم گردیده است. به کمک این امکان، می‌توان رفتار توربین را در حالت پایا و تحت شرایط عملیاتی گوناگون به صورت جامع مورد بررسی قرار داد. در این شبیه‌سازی خاص، جریان باد ورودی به روتور به صورت یکنواخت فرض شده است. همچنین، تعداد گام‌های زمانی شبیه‌سازی ۵۰۰۰ گام و مدت زمان کل شبیه‌سازی در حدود ۴۳.۶ ثانیه تعیین گردیده است. شرایط محیطی شبیه‌سازی شامل سرعت باد یکنواخت ۱۲ متر بر ثانیه و سیال عامل هوا با مشخصات پیش‌فرض نرم‌افزار در نظر گرفته شده است. به علاوه، نسبت سرعت نوک پره (TSR) نیز به میزان ۷.۵ تنظیم گردیده است. در شکل ۸، نتایج بصری حاصل از این شبیه‌سازی سه‌بعدی ارائه شده است. بر اساس نتایج، پس از گذشت زمان کافی و دستیابی به شرایط پایا، ضریب توان (Cp) در مقدار تقریبی ۰.۵۵ و ضریب تراست (Ct) در مقدار تقریبی ۰.۸ به حالت پایداری رسیده‌اند. در بخش پایینی شکل ۸، نمودار تغییرات زاویه حمله پره در طول شعاع پره نیز ترسیم شده است. با توجه به فرض یکنواخت بودن جریان باد ورودی، سرعت باد در ورودی توربین در مقدار ثابت ۱۲ متر بر ثانیه حفظ شده است.

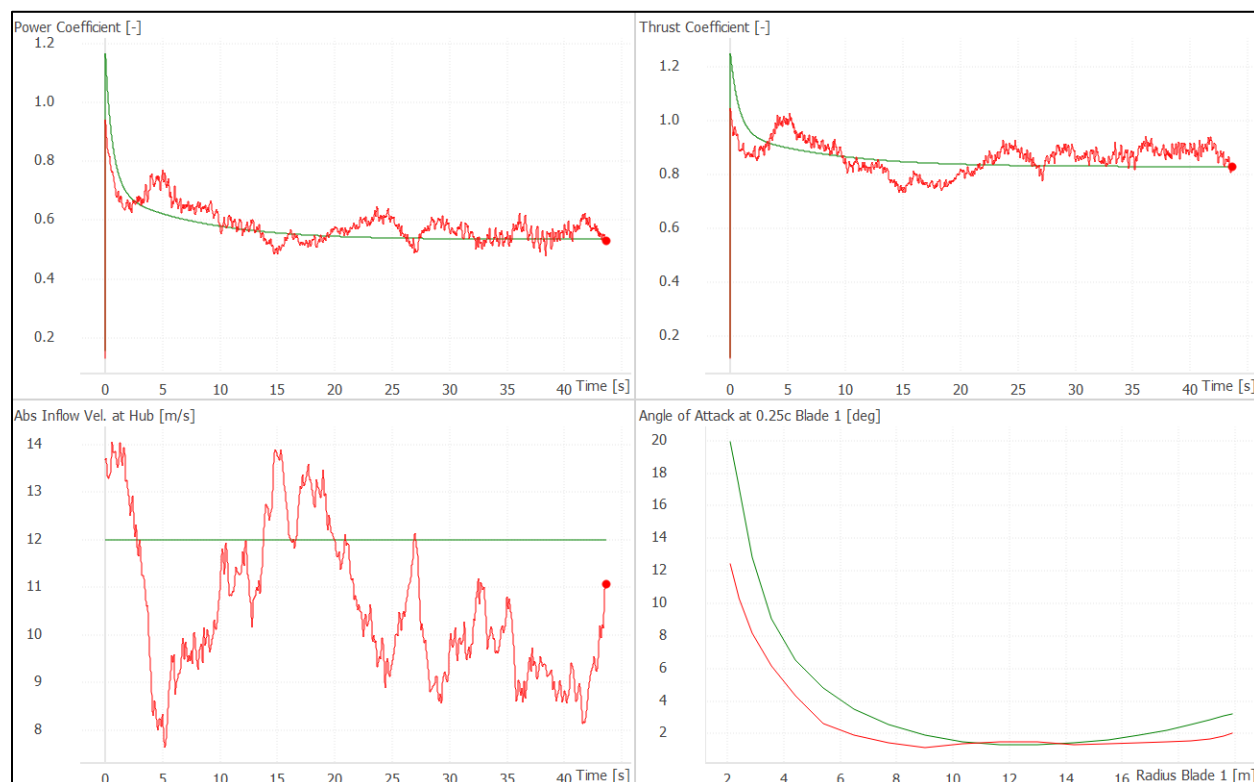


شکل ۸ - نتایج شبیه سازی با باد یکنواخت

۲/۸/۲ باد آشفته

نرم افزار QBlade علاوه بر قابلیت شبیه سازی جریان باد آرام و یکنواخت، امکان شبیه سازی جریان باد آشفته و غیر یکنواخت را نیز دارا می باشد. در راستای بهره گیری از این قابلیت، و به منظور مدل سازی شرایط باد واقع گرایانه تر، از بخش تولید باد آشفته (Turbulent Wind) نرم افزار و الگوی TURBSIM، یک میدان باد آشفته با سرعت باد مرجع ۱۲ متر بر ثانیه تولید و به عنوان ورودی جریان به نرم افزار اعمال گردید. به استثنای نوع ورودی جریان باد، سایر تنظیمات شبیه سازی در این مرحله بدون تغییر باقی ماندند. نتایج حاصل از این شبیه سازی جریان باد آشفته، به همراه نتایج شبیه سازی جریان باد یکنواخت از بخش قبل، به صورت تطبیقی در شکل ۹ قابل مشاهده و مقایسه می باشند. همان گونه که در شکل ۹ مشهود است، سرعت باد ورودی به توربین در طول زمان، نوسانات قابل توجهی را از خود نشان می دهد که این ویژگی، از خصوصیات ذاتی جریان باد آشفته ناشی می گردد. در نتیجه این نوسانات سرعت باد ورودی، ضرایب عملکردی توربین، نظیر ضریب توان و ضریب تراست نیز به تبعیت از سرعت باد ورودی، تغییرات پیوسته و نوسانی را تجربه نموده و به طور مستقیم بر میزان انرژی تولیدی توربین تأثیر گذار می باشند. شایان ذکر است که مسئله وجود نیروها و گشتاورهای متغیر و دینامیکی، از مهم ترین چالش های طراحی و بهره برداری از توربین های بادی محسوب می گردد. در این راستا، طراحی سازه و سیستم کنترلی توربین باید به گونه ای انجام پذیرد که توانایی تحمل و مقابله با گشتاورهای متناوب و بارهای دینامیکی ناشی از تلاطمات باد را

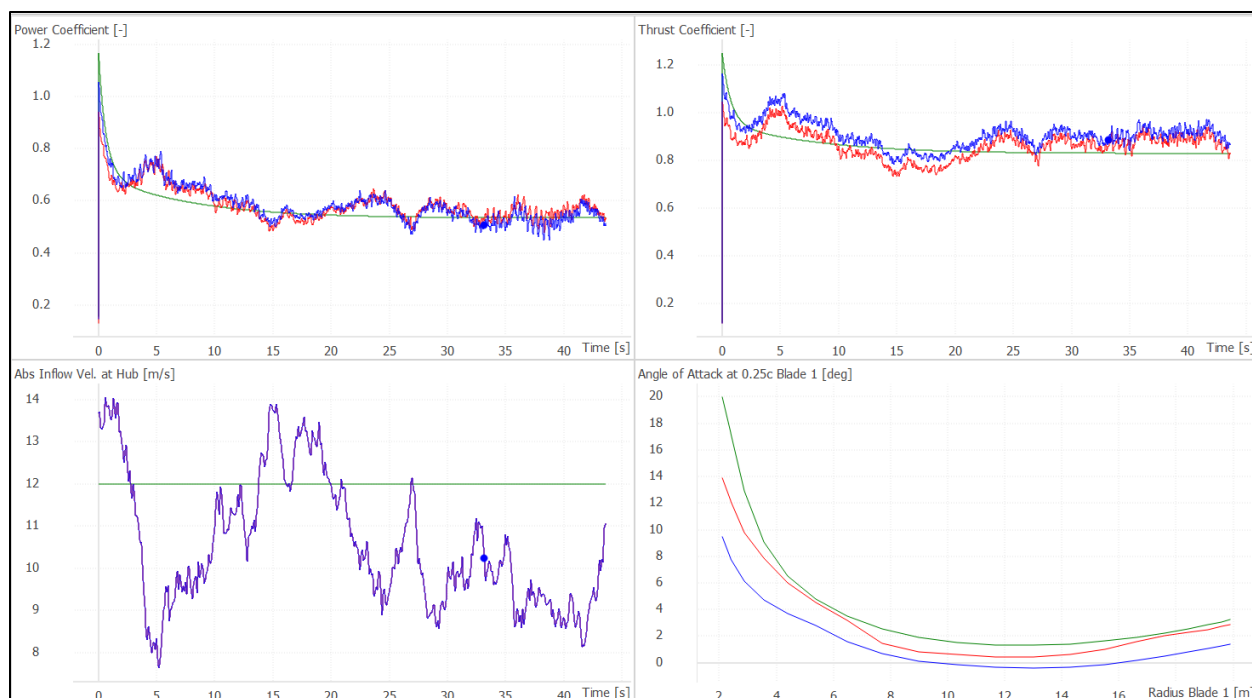
داشته باشد. البته، لازم به تأکید است که هندسه کلی توربین و شرایط محیطی استقرار آن نیز، نقش بسزایی در رفتار دینامیکی و پایداری سازه توربین در مواجهه با باد آشفته ایفا می‌نمایند.



شکل ۹- نتایج شبیه سازی باد آشفته

۲/۹ شبیه سازی سه بعدی در ساحل

پس از شبیه سازی در خشکی، یک شبیه سازی در ساحل نیز در دستور کار قرار گرفت. عمق آب ۱۰ متر در نظر گرفته شد و همچنین با استفاده از مقادیر پیشفرض نرم افزار امواج بر سطح آب ایجاد شدند. همچنین باد ورودی به توربین نیز با مشخصات یکسان با باد آشفته در شبیه سازی شکل ۹ اعمال شد. آنچه که در نتایج شبیه سازی جدید به دست آمد که در شکل ۱۰ قابل ملاحظه است، نشان دهنده بهبود ناچیز در عملکرد توربین در این شرایط است. امواج دریا با مشخصات پیش فرض نرم افزار، گرچه اندک، اما تاثیر گذار بوده اند. با این حال در شرایط یکسان از لحاظ وزش باد، نمی توان تفاوت چشمگیر در نتایج را انتظار داشت. رنگ آبی در شکل ۱۰ نمایانگر شبیه سازی در آب است.



شکل ۱۰ - شبیه سازی در آب

۳ مباحث اقتصادی

در تعیین جدیت اقتصادی احداث توربین‌های بادی، عوامل کلیدی و تعیین‌کننده‌ای وجود دارند که در صدر آن‌ها، هزینه‌های اولیه نصب و راه‌اندازی و میزان انرژی تولیدی سالیانه قرار می‌گیرند. به منظور اثبات توجیه‌پذیری اقتصادی انرژی بادی، لازم است این فناوری در عرصه رقابت با سایر فن‌آوری‌های موجود در حوزه انرژی‌های دیگر، از توان رقابتی قابل قبولی برخوردار باشد. در سناریویی که هدف، تولید الکتریسیته و تزریق آن به شبکه برق سراسری است، قیمت فروش انرژی الکتریکی تولیدی نیز به عنوان یکی از عوامل تعیین‌کننده و بحرانی مطرح می‌گردد. با این حال، امروزه، مزارع بادی به دلیل افزایش قابل توجه قیمت جهانی نفت تا مرز ۱۰۰ دلار به ازای هر بشکه، از پتانسیل رقابت با سایر نیروگاه‌های جدید، حتی نیروگاه‌های سیکل ترکیبی گازسوز، برخوردار شده‌اند. به منظور گسترش و تعمیق نفوذ سیستم‌های بادی در بازار انرژی، نرخ بازگشت سرمایه پس از تولید انرژی باید در سطحی منطقی و قابل قبول بوده و در گذر زمان، از مجموع هزینه‌های اولیه و جاری فراتر رود.

با اذعان به این نکته که ارزش اقتصادی برق تولیدی توسط توربین‌های بادی تابعی از منابع مختلف بوده و لذا نمی‌توان قیمت واحد و ثابتی را برای آن متصور بود، بلکه طیفی از قیمت‌ها در بازار انرژی قابل مشاهده خواهد بود. بر اساس داده‌های موجود تا سال ۲۰۰۳، هزینه‌های احداث توربین‌های بادی به میزان ۱۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات کاهش یافته بود، که این امر منجر به کاهش قیمت برق تولیدی به محدوده ۰.۰۴ تا ۰.۰۶ دلار به ازای

هر کیلووات ساعت گردید. هزینه‌های مربوط به بهره‌برداری و تعمیرات مزارع بادی نیز در همان سال، تقریباً معادل ۰.۰۱ دلار به ازای هر کیلووات ساعت برآورد شده بود. قراردادهای منعقد شده در ایالات متحده برای فروش برق تولیدی مزارع بادی در سال ۱۹۹۵، با قیمت پایه ۰.۰۴ دلار به ازای هر کیلووات ساعت، و در سال ۲۰۰۲، با قیمتی کمتر از ۰.۰۳ دلار به ازای هر کیلووات ساعت منعقد شده‌اند. با این وجود، پس از این بازه زمانی، افزایش قیمت مصالح ساختمانی اساسی از جمله فولاد، سیمان و مس، منجر به افزایش قابل توجه هزینه‌های احداث گردید، به گونه‌ای که هزینه‌های تخمینی احداث در سال ۲۰۰۸، به بازه ۱۸۰۰ تا ۲۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات رسید. این افزایش هزینه‌ها، به تبع خود، افزایش قیمت برق بادی را نیز به محدوده ۰.۰۷ تا ۰.۰۹ دلار به ازای هر کیلووات ساعت در پی داشته است. لازم به ذکر است که در محاسبات فوق، تعدیل ارزش دلار بر مبنای نرخ تورم لحاظ نشده است.

در همین راستا، اهداف تعیین شده از سوی دپارتمان انرژی ایالات متحده (DOE) برای توربین‌های بادی مزارع بادی، دستیابی به قیمت تمام‌شده برق تولیدی ۰.۰۳ دلار به ازای هر کیلووات ساعت برای نواحی با پتانسیل باد رده ۶ (متوسط سرعت سالانه ۶.۵-۶.۷ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری) در سال ۲۰۰۴، و همچنین ۰.۰۳ دلار به ازای هر کیلووات ساعت برای نواحی با پتانسیل باد رده ۴ (متوسط سرعت سالانه ۵.۵ متر بر ثانیه در ارتفاع ۱۰ متری) در سال ۲۰۱۰ بوده است. در برآوردهای قیمتی فوق، هزینه‌های بهره‌برداری و تعمیرات به میزان ۰.۰۰۵ دلار به ازای هر کیلووات ساعت در نظر گرفته شده بود. با توجه به روند صعودی قیمت سوخت‌های فسیلی، پیش‌بینی می‌شود قیمت تمام‌شده برق تولیدی نیروگاه‌های متکی به سوخت‌های فسیلی نیز افزایش یابد و در نتیجه، مزیت رقابتی انرژی بادی در بازار انرژی همچنان حفظ گردد.

لازم به ذکر است، سیستم‌های توربین بادی با ظرفیت ۱ کیلووات، به دلیل عدم توجه‌پذیری اقتصادی در اتصال به شبکه برق، عمدتاً برای کاربری‌های غیرشبکه‌ای مورد استفاده قرار می‌گیرند. ظرفیت مورد نیاز برای مصارف مسکونی، به طور معمول در بازه ۱۰ تا ۵۰ کیلووات و برای مزارع، مراتع، واحدهای دامداری و سایر کاربری‌های تجاری، حداقل ۲۵ کیلووات و بالاتر، معادل توربینی با قطر روتور تقریبی ۱۰ متر، خواهد بود. در مجموع، هزینه‌های احداث توربین‌های بادی کوچک با ظرفیت ۵۰ کیلووات، در بازه ۲۵۰۰ تا ۵۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات تخمین زده می‌شود، که این میزان هزینه، منجر به قیمت تمام‌شده برق تولیدی در بازه ۰.۱۰ تا ۰.۱۲ دلار به ازای هر کیلووات ساعت خواهد گردید.

ابعاد و اندازه توربین‌های بادی مورد استفاده در مصارف مسکونی، مزارع، مراتع، واحدهای دامداری و کاربری‌های روستایی، ارتباط مستقیمی با میزان و قیمت برق شبکه دارد، مشروط به اینکه زیرساخت‌های محلی و امکان اندازه‌گیری خالص انرژی تولیدی وجود داشته باشد. میزان کیلووات ساعت مصرفی را می‌توان از طریق بررسی

صورت حساب‌های ماهیانه برق و یا استعلام از شرکت توزیع نیروی برق تعیین نمود. به منظور بهینه‌سازی نرخ بازگشت سرمایه در پروژه‌های انرژی بادی، اولویت با مصرف انرژی در محل تولید می‌باشد، چرا که ارزش انرژی در حالت مصرف خرد (توزیع شده) به طور معمول بیشتر از حالت تجمیع شده است. البته، صدور صورتحساب انرژی خالص برای سیستم‌های بادی بزرگ مقیاس نیز امکان پذیر می‌باشد، به گونه‌ای که از سیستم به منظور تأمین کل انرژی مورد نیاز در محل تولید، در طی بازه زمانی صورتحساب‌گیری بهره جست.

تأکید می‌گردد که مسائل اقتصادی در حوزه انرژی، همواره با انگیزه‌های تشویقی و مجازات‌های قهری توأم بوده و برآورد دقیق هزینه‌های چرخه عمر واقعی را دشوار می‌سازند، به‌ویژه آنگاه که اثرات جانبی (Externalities) مرتبط با آلودگی‌های زیست‌محیطی و حمایت‌های دولتی از فعالیت‌های تحقیق و توسعه در حوزه منابع انرژی رقیب در محاسبات گنجانده نشده باشند.

عدم قطعیت‌های کلی پیرامون هزینه‌های آتی انرژی، وابستگی فزاینده به نفت وارداتی، ضرورت کاهش آلودگی‌های زیست‌محیطی و تا حدی، دسترسی پذیری منابع انرژی تجدیدپذیر، همگی به عنوان محرک‌های کلیدی در توسعه و گسترش این منابع عمل نموده‌اند. پیش‌بینی دقیق هزینه‌های انرژی و نوسانات آتی آن، تلاشی مخاطره‌آمیز و توأم با عدم قطعیت بالاست، زیرا هزینه انرژی غالباً به صورت مستقیم تحت تأثیر قیمت جهانی نفت خام تعیین می‌گردد. به عنوان نمونه، در دهه ۱۹۹۰، قیمت هر بشکه نفت در بازه ۱۵ تا ۲۵ دلار متغیر بود و پیش‌بینی‌های آن زمان حاکی از آن بود که قیمت نفت به تدریج تا سال ۲۰۰۲ به ۳۰ دلار در هر بشکه خواهد رسید. در عمل، قیمت نفت در سال ۲۰۰۳ به سطح ۳۰ دلار در هر بشکه دست یافت و در سال ۲۰۰۸ نیز به اوج بی‌سابقه ۱۳۰ دلار در بشکه صعود نمود. نوسانات قیمتی نفت خام، از الگوی یکنواختی پیروی ننموده و در ابعاد زمانی و جغرافیایی نیز متفاوت بوده‌اند.

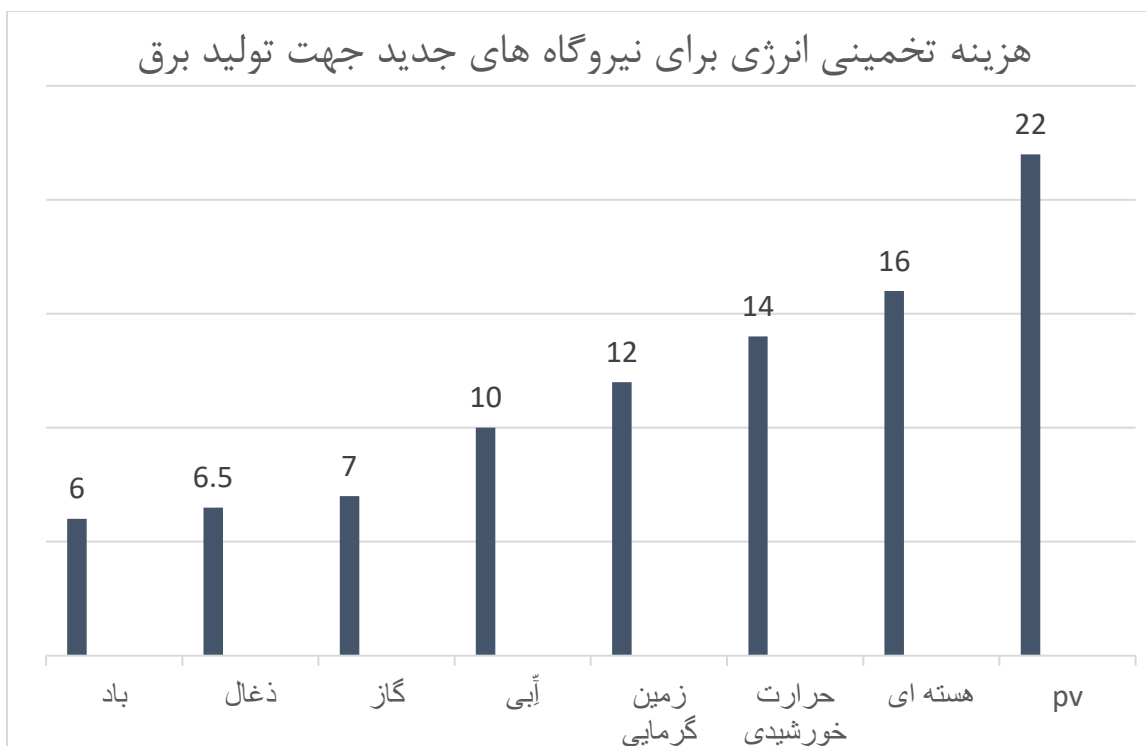
در شرایطی که میزان تقاضا از حجم تولید نفت پیشی می‌گیرد، احتمال افزایش مجدد قیمت‌ها قابل تصور است. بسیاری از کارشناسان و تحلیلگران حوزه انرژی، وقوع این شرایط را در دهه جاری پیش‌بینی می‌نمایند، در حالی که برخی دیگر، بازه زمانی بین سال‌های ۲۰۱۶ تا ۲۰۴۰ را محتمل‌تر می‌دانند. مهم‌ترین عوامل تعیین‌کننده در این زمینه، میزان تخمینی کل ذخایر قابل برداشت نفت و نیز اقتصادی‌تر شدن استخراج نفت از ذخایر دشوارتر و پرهزینه‌تر، نظیر ذخایر قطبی، اعماق دریا، بسترهای شنی نفتی و حتی سنگ‌های رس‌گیری خواهد بود. با توجه به این چشم‌انداز، توصیه می‌گردد که تمامی ظرفیت‌های موجود برای بهره‌گیری از مشوق‌های حمایتی احداث توربین‌های بادی، به‌ویژه مشوق‌های ملی و منطقه‌ای، به کار گرفته شود. هزینه تأمین زمین مناسب برای احداث مزارع بادی، به‌ویژه در پروژه‌های بزرگ مقیاس، می‌تواند رقم قابل توجهی باشد، حتی برای اشخاصی که از اراضی متعلق به خود استفاده می‌نمایند. این هزینه، غالباً به دلیل عدم لحاظ آن به عنوان یک عایدی فرصت از دست

رفته (Opportunity Cost)، نادیده انگاشته می‌شود. توربین‌های بادی، به دلیل ماهیت خود، فضای نسبتاً زیادی را اشغال می‌نمایند و متعاقباً، منجر به کاهش اراضی قابل دسترس برای کاربری‌های کشاورزی و دامداری می‌گردند. برآوردها حاکی از آن است که در مزارع بادی، میزان زمینی که از چرخه کشاورزی و تولیدات دامی خارج می‌گردد، در بازه ۰.۵ الی ۱.۵ هکتار به ازای هر توربین قرار دارد.

در مبحث تخمین کمی میزان انرژی تولیدی توسط مزارع بادی، فاکتور «در دسترس بودن» (Availability) در توربین‌های بادی از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است. به منظور دستیابی به بازگشت سرمایه بهینه، توربین‌های بادی باید تا حداکثر زمان ممکن در شرایط بهره‌برداری قرار داشته باشند. در این راستا، اطلاعات پیش‌زمینه‌ای مربوط به عملکرد توربین، شامل نرخ و نوع خرابی‌های احتمالی، باید به دقت مد نظر قرار گرفته و در تخمین زمان‌های غیرتولیدی توربین لحاظ گردند. در گذشته، میزان در دسترس بودن تجهیزات توربین‌های بادی نسبتاً پایین بود، در حالی که امروزه، با پیشرفت‌های فناوریانه، میزان در دسترس بودن ماشین‌آلات به سطحی قابل قبول، حدود ۹۸ درصد، رسیده است. توزیع زمانی تولید انرژی در طول سال نیز می‌تواند بر ارزش اقتصادی انرژی تولیدی تأثیرگذار باشد. در صورتی که بخش عمده‌ای از انرژی تولیدی در بازه‌های زمانی اوج تقاضای شبکه برق و یا زمان نیاز مصرف‌کننده محلی تولید گردد، ارزش اقتصادی انرژی مسلماً افزایش خواهد یافت.

توربین‌های بادی این امکان را فراهم می‌آورند که انرژی تولیدی را در محل به مصرف رسانده، به شبکه برق سراسری تزریق نموده و یا ترکیبی از این دو رویکرد را به کار بست. به وضوح مشخص است که هرچه قیمت فروش انرژی الکتریکی بالاتر باشد، توجیه اقتصادی پروژه بهبود خواهد یافت. در شرایطی که یک یا چند توربین بادی در یک سایت مستقر باشند، مالک سیستم می‌تواند بخشی از انرژی تولیدی را به مصرف شخصی رسانده و مازاد آن را به شبکه برق منطقه‌ای به فروش برساند. برق مصرفی در محل (On-site Consumption)، جایگزین انرژی الکتریکی با نرخ خرده‌فروشی شبکه شده و از این منظر، ارزش اقتصادی بیشتری می‌یابد. در مناطقی که دارای سیستم صدور صورت‌حساب انرژی خالص (Net Metering) می‌باشند (که در عمل بیشتر محدود به توربین‌های بادی کوچک‌مقیاس می‌گردد)، حتی انرژی تزریق‌شده به شبکه نیز از ارزش معادل نرخ خرده‌فروشی برخوردار است. در سناریویی که در طی دوره صورت‌حساب‌گیری، میزان انرژی تولیدی از انرژی مصرفی فراتر رود، انرژی مازاد تولیدی با احتساب هزینه‌های اجتناب‌شده (Avoided Costs) به شبکه فروخته خواهد شد. در مناطقی که میزان نرخ خرده‌فروشی برق از هزینه‌های اجتناب‌شده پرداختی در ازای انرژی تزریق‌شده به شبکه بالاتر باشد، افزایش میزان مصرف انرژی در محل سایت، به نحو مستقیم به افزایش توجیه اقتصادی پروژه منجر خواهد شد. قیمت انرژی تزریق‌شده به شبکه، یا از طریق توافقات دوجانبه بین مالک توربین و شرکت توزیع برق تعیین می‌گردد و یا توسط قوانین و مقررات حاکم یا آژانس‌های قانونی ناظر بر بازار انرژی، تعیین و ابلاغ می‌گردد.

Cents/kwh



شکل ۱۱ - هزینه تخمینی انرژی

مزارع بادی به عنوان مقرون به صرفه ترین منابع انرژی تجدیدپذیر در زمینه تولید برق محسوب می گردند. به گونه ای که هزینه تولید انرژی (COE) از توربین های بادی، روند کاهشی چشمگیری را از خود نشان داده و از مقدار ۰.۵ دلار به ازای هر کیلووات ساعت در سال ۱۹۷۰ به ۰.۰۶ دلار به ازای هر کیلووات ساعت در سال ۲۰۰۳ نزول یافته است.

هزینه سرمایه گذاری	درصد از TIC	دلار بر کیلووات
هزینه تجهیزات	۴۴/۷۶	۸۹۵
توربین ها (صرف نظر از پره ها و دکلها)	۱۰/۴۸	۲۱۰
پره ها	۱۱/۶۰	۲۳۲
دکل ها	۸/۰۱	۱۶۰\$
حمل و نقل	۷۴/۸۵	۱.۴۹۷
مجموع تجهیزات		
موازنه نیروگاه		
مصارف		

۲۱۶	۱۰/۸۲	ساخت و ساز (بتن میلگرد تجهیز جاده ها و آماده سازی محل)
۲۴	۱/۲۲	ترانسفورمر
۲۶	۱/۲۹	الکتریکی (کابل افت سیم)
۴۷	۲/۳۶	توسعه خط HV
۳۱۴	۱۵/۶۸	مجموع مصالح
		کارگری
۱۲	۰/۶۲	پی
۱۴	۰/۷۰	نصب
۲۰	۱/۰۲	برق
۱۱	۰/۵۳	مدیریت/ نظارت
۷۶	۳/۸۰	متفرقه
۱۳۳	۶/۶۷	مجموع کارگر
		توسعه/ سایر هزینه
		مجموع HV/ ارتباطهای داخلی
۱۵	۰/۷۴	مصالح
۵	۰/۲۳	کار
۲۰	۱/۰۱	مهندسی
۱۱	۰/۵۵	خدمات حقوقی
۰	۰/۰۰۰	آماده سازی زمین
۵\$	۰/۲۶	گواهینامه محل/ کسب مجوز
۵۶\$	۲/۷۹	مجموع توسعه و سایر موارد
۵۰۳	۲۵/۱۵	کل موازنه نیروگاه
۲۰۰۰\$	۱۰۰	مجموع

به منظور برآورد هزینه بر حسب دلار، هزینه کل نصب شده (Total Installed Cost - TIC) به صورت پیش فرض معادل ۲۰۰۰ دلار به ازای هر کیلووات در نظر گرفته می شود. لازم به ذکر است که منبع این هزینه های پیش فرض، مدل JEDI توسعه یافته توسط آزمایشگاه ملی انرژی های تجدیدپذیر (NREL) می باشد.

۴ برخی ملاحظات ایمنی

ایمنی در صنعت توربین‌های بادی، اصلی بنیادین در تمامی مراحل طراحی، ساخت، بهره‌برداری و نگهداری محسوب می‌گردد، نه تنها به منظور حفاظت از نیروی انسانی، بلکه برای حفظ سرمایه و محیط زیست. ملاحظات ایمنی مکانیکی حیاتی هستند، با توجه به سامانه‌های پیچیده و تحت تنش دائم توربین‌ها، از جمله ایمنی پره‌ها و روتور در برابر شکستگی و پرتاب قطعات، که نیازمند طراحی دقیق، مواد با کیفیت، بازرسی دوره‌ای و پایش وضعیت است، و ایمنی سیستم انتقال قدرت و ترمز در برابر خرابی و آتش‌سوزی، که با استفاده از قطعات با کیفیت، روانکاری مناسب، سیستم‌های خنک‌کننده و پایش مداوم قابل ارتقاء است، و پایداری سازه دکل در برابر سقوط که با طراحی مناسب، مواد ضد خوردگی، بازرسی منظم و پایش تنش و لرزش تضمین می‌گردد. ایمنی الکتریکی نیز حائز اهمیت فراوان است، با توجه به خطرات برق‌گرفتگی که نیازمند رعایت کامل الزامات ایمنی، عایق‌بندی مناسب، سیستم‌های اتصال زمین و آموزش ایمنی الکتریکی است، و خطر آتش‌سوزی الکتریکی ناشی از اتصالات نامناسب که با استفاده از تجهیزات استاندارد و سیستم‌های اطفاء حریق خودکار قابل کاهش است، و نیز خطر قوس الکتریکی در سامانه‌های ولتاژ بالا که تنها با پرسنل متخصص، تجهیزات حفاظت فردی و کار به روش بی‌برق باید مدیریت شود. ملاحظات ایمنی عملیاتی و نگهداری شامل خطرات کار در ارتفاع و سقوط، که با تجهیزات حفاظت فردی در برابر سقوط، سیستم‌های بالابر ایمن و آموزش‌های تخصصی قابل کنترل است، خطر سقوط اشیاء حین کار در ارتفاع، که با استفاده از ابزار مهارشده و محصور کردن محوطه زیر توربین کاهش می‌یابد، خطرات فضا‌های بسته نظیر کمبود اکسیژن و تجمع گازهای سمی، که با رعایت پروتکل‌های ورود و خروج، تهویه مناسب و پایش مستمر قابل مدیریت است، و خطر روتور در حال چرخش که نیازمند اطمینان از قفل بودن ترمز و رعایت فاصله ایمن است. سایر ملاحظات ایمنی شامل خطر حریق به دلیل نقص فنی، روغن‌ریزی یا صاعقه، که با مواد مقاوم در برابر حریق و سیستم‌های اطفاء حریق خودکار قابل پیشگیری است، و تاثیر شرایط محیطی نامساعد نظیر باد شدید و یخبندان، که با توقف کار در شرایط نامساعد و رعایت محدودیت‌ها مدیریت می‌گردد.

به طور مثال استاندارد IEC 61400-24 دستورالعمل‌هایی را برای طراحی سیستم‌های حفاظت توربین‌های بادی در برابر صاعقه ارائه نموده است. به منظور طراحی سامانه‌ای که در برابر اثرات ناشی از اصابت صاعقه مصون باشد، لازم است تمهیداتی برای انتقال جریان صاعقه به زمین به شیوه‌ای ایمن و بدون ایجاد خسارت یا اختلال در عملکرد سامانه‌های توربین، در نظر گرفته شود. سازه‌های بلند متعارف، نظیر ساختمان‌ها و خطوط انتقال نیرو، معمولاً از هادی‌هایی استفاده می‌نمایند که در پیرامون بخش فوقانی سازه نصب شده و نقاط بالقوه اصابت صاعقه را پوشش می‌دهند. در یک سطح هموار، یک نقطه اتصال در ارتفاع، ناحیه‌ای به شعاع ۳۱ متر را تحت پوشش حفاظتی خود قرار می‌دهد. توربین‌های بادی، به طور معمول، فاقد هادی‌های مجزا از پره‌ها هستند که به منظور ایجاد نقاط ترجیحی برای اتصال صاعقه به کار گرفته شوند. از آنجا که اغلب پره‌های پیشرفته از مواد کامپوزیتی

ساخته می‌شوند، ذاتاً رسانایی الکتریکی مطلوبی ندارند. به منظور تسهیل انتقال جریان صاعقه در طول پره‌ها، هادی‌هایی رسانا در ساختار کامپوزیتی پره‌ها جاسازی شده‌اند که نقاط اتصالی در فواصل چند سانتی‌متری از نوک پره داشته و در امتداد کل طول پره امتداد می‌یابند.

سیم‌های فولادی با قطر ۱۲ میلی‌متر یا بیشتر، به منظور انتقال ایمن و بدون آسیب جریان صاعقه به زمین مورد استفاده قرار می‌گیرند. آسیب جدی به پره زمانی رخ می‌دهد که در ساختار داخلی پره، پدیده قوس الکتریکی شکل گیرد و جریان صاعقه از هادی رسانا به فضای خالی داخلی پره و یا بین لایه‌های مواد کامپوزیتی عایق منتقل شود. قوس‌های الکتریکی داخلی، امواج ضربه فشاری تولید می‌کنند که می‌توانند منجر به آسیب‌های جدی، از جمله ترکیدگی پره، شوند. مسیر عبور جریان صاعقه ممکن است از طریق پره، یاتاقان‌ها، تویی، شفت اصلی، یاتاقان‌های شفت اصلی، چرخ‌دنده‌ها، یاتاقان‌های مولد، صفحه نگه‌دارنده، قاب یاتاقان‌های انحراف و در نهایت دکل توربین باشد. هنگامی که صاعقه وارد شفت اصلی می‌گردد، تمایل به یافتن مسیری با امپدانس پایین از خود نشان می‌دهد. در اغلب طراحی‌های نوین، از برس‌های کربنی به منظور ایجاد این مسیر با امپدانس پایین استفاده می‌شود. این تمهیدات، از عبور جریان الکتریکی از یاتاقان‌های اصلی که می‌تواند موجب ایجاد آسیب‌های حفره‌زایی جدی در عناصر داخلی یاتاقان شود، جلوگیری می‌نماید. با توجه به این که جایگزینی یاتاقان‌ها فرآیندی پرهزینه است، استفاده از مسیر جایگزین جریان صاعقه مبتنی بر برس‌های کربنی، به طور گسترده مورد توجه قرار گرفته است. شایان ذکر است که ارتفاع و شکل هندسی توربین بادی به گونه‌ای است که تمامی اصابت‌های صاعقه لزوماً از ناحیه انتهای پره‌ها آغاز نمی‌شوند و برخورد صاعقه به لبه پره یا حتی به دکل توربین نیز رخدادی غیرمعمول تلقی نمی‌گردد. اگرچه مواد تشکیل‌دهنده پره‌ها ذاتاً نارسانا هستند، لایه آب شکل‌گرفته بر روی سطح پره‌ها، می‌تواند رسانایی الکتریکی سطح پره را افزایش دهد.

بیشترین خسارت‌های ناشی از صاعقه عموماً به سامانه‌های کنترل الکترونیکی وارد می‌آید که برای سطوح ولتاژ پایین طراحی شده‌اند. ولتاژهای بالا و جریان‌های شدید صاعقه از طریق سازوکارهایی که در ادامه تشریح می‌گردند، به سامانه کنترل نفوذ می‌کنند. در ادامه، روش‌های کاهش خسارات وارده به سامانه‌های کنترل نیز مورد بحث قرار خواهند گرفت. هدایت الکتریکی از طریق عایق‌بندی نامناسب و شکاف‌های هوای کوچک، با طراحی مسیر با امپدانس پایین برای جریان صاعقه، عایق‌بندی مناسب و روش‌های اتصال استاندارد، قابل کنترل بوده و می‌توان این خسارات را به حداقل ممکن رساند. اتصالات مناسب، این اطمینان را حاصل می‌کنند که تمامی اجزا و قطعات فلزی هم‌پتانسیل بوده و پتانسیل وقوع پدیده پرش جریان صاعقه را از بین می‌برند.

اتصال خازنی زمانی رخ می‌دهد که هادی‌های حامل جریان صاعقه در مجاورت سایر هادی‌ها قرار گیرند. به حداقل رساندن این اثر، از طریق جداسازی کابل‌های اتصال زمین از سایر کابل‌ها و استفاده از روکش‌های فلزی محافظ

برای کابل‌های حساس امکان‌پذیر است. اتصال مغناطیسی ناشی از تغییرات سریع جریان در هادی‌ها، منجر به ایجاد یک میدان مغناطیسی متغیر و قوی می‌گردد. این میدان مغناطیسی متغیر می‌تواند ولتاژهای مخربی را در حلقه‌ها و هادی‌های مجاور القا نماید. استفاده از محفظه‌های فلزی، کابل‌های به هم تابیده و اجتناب از ایجاد حلقه‌های بزرگ در سیم‌کشی، به کاهش پدیده اتصال مغناطیسی کمک شایانی می‌نماید.

۵ محاسبات با متلب

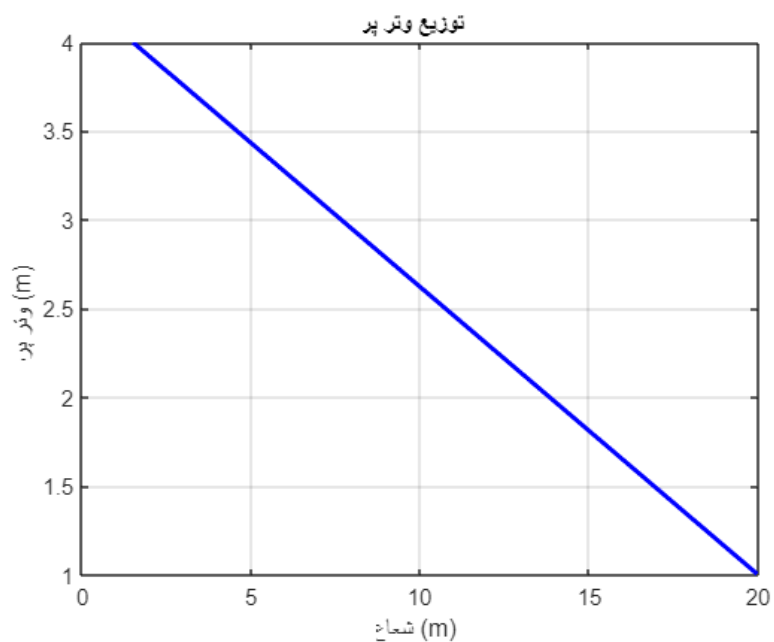
در فرآیند کدنویسی با نرم‌افزار MATLAB، ابتدا مشخصات اساسی توربین بادی شامل تعداد پره‌ها، شعاع روتور، سرعت باد مبنا و چگالی هوا تعیین و مقداردهی شد. سپس، ویژگی‌های هندسی کلیدی برج و روتور از قبیل ارتفاع برج، میزان بیرون‌زدگی روتور از دکل و شعاع ریشه پره‌ها به طور دقیق مشخص گردیدند. به منظور انجام محاسبات آیرودینامیکی در طول پره، شبکه‌بندی شعاعی پره به صورت گسسته انجام پذیرفت، تا موقعیت دقیق مقاطع مختلف پره در امتداد شعاع برای محاسبات آتی در دسترس باشد. توزیع وتر پره در طول امتداد شعاع، بر اساس فاصله از مرکز روتور به‌طور محاسباتی تعیین شد، تا شکل هندسی مناسب و تدریجی برای پره ایجاد گردد. مشخصات آیرودینامیکی پروفیل NACA4412، شامل زاویه واماندگی (Stall Angle)، بیشینه ضریب لیفت (Maximum Lift Coefficient) و ضریب درگ (Drag Coefficient) از مراجع معتبر استخراج و در محاسبات لحاظ گردیدند. محاسبه ضرایب عملکردی کلیدی توربین با بهره‌گیری از روش شناخته‌شده المان پره - مومنتوم (Blade Element Momentum - BEM) صورت پذیرفت. در این راستا، زاویه حمله تقریبی برای هر مقطع پره به صورت تکراری تعیین و ضرایب لیفت و درگ آیرودینامیکی متناظر با آن، از داده‌های پروفیل NACA4412 استخراج شدند. نیروی آیرودینامیکی برآیند وارد بر هر المان پره به دقت محاسبه و سپس به دو مولفه اساسی، یعنی مولفه مماسی (Tangential) و مولفه محوری (Axial)، تجزیه گردید. گشتاور و توان تولیدی برای هر بخش از پره محاسبه و با انتگرال‌گیری در طول شعاع پره، توان کل روتور به دست آمد. در محاسبات توان کل، راندمان مکانیکی سیستم انتقال قدرت به میزان ۹۵ درصد در نظر گرفته شد. مقدار نهایی توان خروجی توربین به صورت عددی و با واحد کیلووات، در پنجره کنسول نرم‌افزار MATLAB به کاربر نمایش داده می‌شود. به منظور بررسی ویژگی‌های هندسی پره، نموداری از توزیع وتر پره در امتداد شعاع ترسیم گردید. برای مدل‌سازی تغییرات توان خروجی توربین در شرایط واقعی، نوسانات توان در طول دوره‌های زمانی مختلف (روز، ماه و سال) با استفاده از یک تابع سینوسی تقریبی مدل‌سازی شد. در نهایت، به منظور نمایش بصری و تحلیل تغییرات توان در مقیاس‌های زمانی مختلف، سه نمودار جداگانه برای نمایش توان تولیدی توربین در طول یک شبانه‌روز، یک ماه و یک سال ترسیم و ارائه گردیده است.

پارامترهای ورودی شبیه‌سازی:

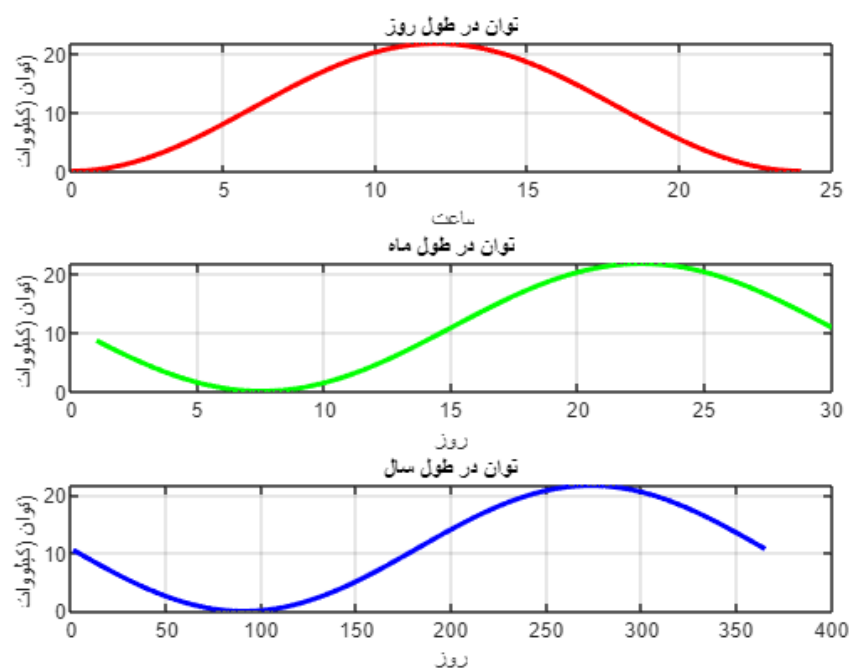
- تعداد پره‌ها: سه عدد
- شعاع روتور: ۲۰ متر
- پروفیل مقطع پره‌ها: NACA4412 :
- سرعت باد: ۱۲ متر بر ثانیه
- جهت باد: موازی با محور توربین
- چگالی هوا: ۱.۲۲۵ کیلوگرم بر متر مکعب (شرایط استاندارد)
- کمان ماکزیمم پروفیل: ۴ درصد وتر
- محل کمان ماکزیمم: ۴۰ درصد طول وتر از لبه حمله
- ارتفاع برج: ۴۰ متر
- بیرون‌زدگی روتور: ۳.۳۳ متر
- زاویه مخروطی روتور: صفر درجه
- زاویه انحراف محور روتور: صفر درجه
- شعاع پایین برج: ۰.۸ متر
- شعاع بالای برج: ۰.۵۷۱ متر

نتیجه شبیه‌سازی:

توان تولیدی توربین بادی: ۲۱.۷۰ کیلووات



شکل ۱۲ - نمودار اندازه وتر در شعاع های مختلف



شکل ۱۳ - نمودار توان تولیدی نسبت به زمان

تحلیل نمودار توزیع وتر پره در امتداد شعاع، الگوی طراحی هدفمندی را آشکار می‌سازد که در آن، وتر پره در نواحی مجاور ریشه از بیشترین مقدار برخوردار بوده و به تدریج با حرکت به سمت نوک پره، از میزان آن کاسته می‌شود. این پیکربندی هندسی هوشمندانه، نه تنها منجر به بهبود قابل توجه عملکرد آیرودینامیکی پره در سرتاسر طول آن می‌گردد، بلکه توزیع متناسب و مهندسی شده بار را در سرتاسر ساختار پره تضمین می‌نماید، بدین ترتیب از تمرکز تنش‌های مخرب در نواحی خاص جلوگیری شده و عمر مفید پره افزایش می‌یابد. در ادامه، تحلیل توان تولیدی محاسباتی توربین، با تکیه بر اصول آیرودینامیکی و به طور مشخص، با بهره‌گیری از نیروهای لیفت و درگ استخراج شده از محاسبات صورت پذیرفته و پس از اعمال ضریب راندمان مکانیکی معادل ۹۵ درصد، مقدار نهایی توان تولیدی توربین به دست آمده است. این مقدار توان محاسبه شده، به خوبی بیانگر تأثیر مستقیم و انکارناپذیر عملکرد آیرودینامیکی پره‌ها بر میزان توان خروجی قابل استحصال از توربین می‌باشد. اگرچه لازم به ذکر است که این مدل‌سازی، به منظور سادگی و سرعت محاسبات، از در نظر گرفتن اثرات پیچیده‌تر و ثانویه‌ای نظیر برهم‌کنش جریان‌های گردابه‌ای سه بعدی و پدیده‌های جریان تراگذرا چشم‌پوشی نموده است، با این حال، همچنان تخمین قابل اتکا و مهندسی مناسبی از سطح توان تولیدی توربین را در شرایط ایده‌آل ارائه می‌دهد، و به عنوان یک نقطه شروع ارزشمند در فرآیند طراحی و بهینه‌سازی توربین‌های بادی به شمار می‌رود. به منظور بررسی پویایی تولید توان در شرایط محیطی متغیر و واقعی‌تر، تحلیل تغییرات توان تولیدی در بازه‌های زمانی مختلف به انجام رسیده است؛ در این راستا، سه نمودار مجزا به منظور نمایش تغییرات توان توربین در مقیاس‌های زمانی روزانه، ماهانه و سالانه ترسیم و ارائه گردیده است. در نمودار روزانه، به وضوح قابل مشاهده است که توان تولیدی در ساعات میانی روز به اوج خود می‌رسد، پدیده‌ای که با روند غالب افزایش سرعت باد در ساعات ظهرگاهی انطباق داشته و نشان‌دهنده تأثیر مستقیم سرعت باد بر میزان توان خروجی توربین است. در مقیاس ماهانه، نمودار ترسیم شده حاکی از آن است که اگرچه نوسانات روزانه سرعت باد کماکان به نوساناتی در توان تولیدی منجر می‌شود، اما الگوی کلی توان تولیدی در طول یک ماه تقریباً از ثبات نسبی برخوردار است، که بیانگر پایداری نسبی میانگین سرعت باد در مقیاس‌های ماهانه می‌باشد. نهایتاً، نمودار تغییرات توان در مقیاس سالانه، بزرگ‌ترین دامنه تغییرات را به نمایش می‌گذارد و به وضوح بیانگر آن است که تغییرات فصلی سرعت باد، تأثیر قابل توجهی بر میزان انرژی تولیدی توربین در طول سال ایفا می‌نماید. این نمودار نشان می‌دهد که توربین در فصول خاصی از سال، که به طور معمول با وزش بادهای قوی‌تر همراه هستند، توان بسیار بیشتری تولید می‌کند و به طور کلی عملکرد توربین در فصول مختلف، متأثر از الگوی باد غالب در آن فصول می‌باشد. به طور خلاصه، این تحلیل با ارائه یک مدل‌سازی اولیه و قابل فهم از عملکرد توربین بادی، به خوبی نشان می‌دهد که چگونه پارامترهای کلیدی آیرودینامیکی و هندسی پره، در تعامل با شرایط محیطی متغیر، به طور مستقیم و غیر مستقیم بر میزان و الگوی تولید توان الکتریکی توربین بادی اثرگذار می‌باشند. همچنین، نمودارهای جامع تولید توان در بازه‌های زمانی مختلف، اطلاعات ارزشمندی را در خصوص نحوه عملکرد توربین در شرایط متغیر محیطی و الگوهای

فصلی و روزانه تولید انرژی فراهم می‌آورند، که می‌تواند در برنامه‌ریزی بهره‌برداری، مدیریت شبکه و ارزیابی اقتصادی پروژه‌های انرژی بادی بسیار راهگشا باشد.

نکته: کد متلب به صورت پیوست در کنار گزارش کار ارائه شده است.

۶ جمع بندی

پروژه حاضر، با هدف کاوش و مستندسازی فرآیند طراحی و تحلیل یک توربین باد محور افقی (HAWT) با استفاده از نرم‌افزار تخصصی QBlade، و نیز کسب دانش و تجربه عملی در حوزه فناوری انرژی بادی، به انجام رسید. در راستای دستیابی به این اهداف، گام‌های متعددی از جمله انتخاب و مشخصه‌یابی ایرفویل NACA 4412، طراحی هندسی پره‌ها با تعیین مشخصات کلیدی نظیر وتر و پیچش در طول شعاع، شبیه‌سازی عملکرد آیرودینامیکی ایرفویل در شرایط زوایای حمله متنوع، و تحلیل عملکرد جامع روتور توربین تحت شرایط باد آرام و آشسته، با موفقیت به انجام رسیدند و نتایج حاصله به صورت دقیق و جامع مستندسازی گردید.

تحلیل‌های انجام‌شده با استفاده از نرم‌افزار QBlade، بینش ارزشمندی را در خصوص رفتار آیرودینامیکی ایرفویل NACA 4412 و عملکرد روتور توربین طراحی‌شده ارائه نمودند. مشخصه‌یابی آیرودینامیکی ایرفویل NACA 4412، ضمن تأیید ویژگی‌های مطلوب این پروفیل برای کاربرد در پره‌های توربین بادی، محدودیت‌ها و ویژگی‌های خاص آن را نیز آشکار ساخت، به گونه‌ای که رفتار غیرخطی ضرایب لیفت و درگ در زوایای حمله بالا، و تاثیر جدایش جریان بر عملکرد ایرفویل، به وضوح در نتایج نمودارها قابل مشاهده بود. شبیه‌سازی عملکرد روتور تحت شرایط باد یکنواخت، مقدار ضریب توان (Cp) ماکزیمم در حدود ۰.۵۵ و نسبت سرعت نوک پره (TSR) بهینه در حدود ۷.۵ را نشان داد، که این مقادیر، مؤید بازدهی مناسب طراحی اولیه پره در شرایط ایده‌آل می‌باشند. مقایسه عملکرد توربین تحت شرایط باد آرام و آشسته، تاثیر قابل توجه تلاطمات باد بر نوسانات توان تولیدی و نیروهای وارد بر توربین را آشکار ساخت، و ضرورت در نظر گرفتن اثرات باد آشسته در طراحی و سیستم کنترلی توربین‌های بادی را مورد تاکید قرار داد. همچنین، بررسی تاثیر زاویه پیچ پره‌ها، نقش کلیدی سیستم‌های کنترلی در تنظیم زاویه پره‌ها به منظور بهینه‌سازی عملکرد توربین و محافظت از آن در شرایط نامساعد، را به اثبات رساند.

استفاده از نرم‌افزار QBlade در فرآیند پروژه، کارایی و توانمندی این ابزار تخصصی را در زمینه طراحی، تحلیل و شبیه‌سازی توربین‌های بادی محور افقی به خوبی نشان داد QBlade. به عنوان یک محیط یکپارچه و قدرتمند، امکانات گسترده‌ای را برای مدل‌سازی هندسی پره‌ها، تحلیل آیرودینامیکی و سازه‌ای، شبیه‌سازی عملکرد دینامیکی و تحلیل داده‌ها فراهم می‌آورد، و به عنوان یک ابزار ارزشمند در اختیار مهندسان و محققان حوزه انرژی بادی قرار می‌گیرد.

شایان ذکر است، مدل سازی و شبیه سازی های انجام شده در این پروژه، مبتنی بر فرضیات ساده سازانه و شرایط ایده آل بوده و از در نظر گرفتن برخی از پیچیدگی های واقعی موجود در عملکرد توربین های بادی، نظیر اثرات سه بعدی جریان، برهم کنش آیرودینامیکی پره ها با دکل و Nacelle، اثرات ناشی از زبری سطح پره ها و ارتعاشات سازه ای، صرف نظر شده است. لذا، نتایج حاصله، بیشتر به عنوان یک تخمین اولیه و مرجع پایه برای ارزیابی عملکرد توربین طراحی شده قابل استناد بوده، و برای طراحی دقیق تر و بهینه سازی جامع تر توربین، انجام تحلیل های تفصیلی تر و جامع تر با لحاظ نمودن اثرات پیچیده جریان و پدیده های فیزیکی، ضروری به نظر می رسد.

به عنوان مسیرهای آتی برای توسعه و ادامه پروژه، می توان به انجام تحلیل های سازه ای دقیق تر پره ها و دکل با استفاده از روش های اجزاء محدود (FEM) و ادغام این تحلیل ها با شبیه سازی های آیرودینامیکی برای بررسی برهم کنش آیرودینامیک، توسعه سیستم کنترلی پیشرفته برای بهینه سازی عملکرد توربین در شرایط باد متغیر و آشفته و بهبود قابلیت اطمینان و پایداری سیستم، انجام مطالعات امکان سنجی اقتصادی و بررسی هزینه تمام شده انرژی تولیدی توربین طراحی شده، و نهایتاً، طراحی و ساخت یک نمونه اولیه کوچک مقیاس از توربین و انجام آزمایش های عملی برای اعتبارسنجی نتایج شبیه سازی ها و ارزیابی عملکرد واقعی توربین در شرایط میدانی، اشاره نمود.

در پایان، پروژه حاضر، گامی مؤثر در جهت آشنایی عملی با فرآیند طراحی و تحلیل توربین های بادی و بهره گیری از نرم افزارهای تخصصی در این زمینه بوده و بستری ارزشمند برای تحقیقات و توسعه های آتی در حوزه انرژی بادی و فناوری های مرتبط با توربین های بادی را فراهم می آورد. توسعه و گسترش بهره برداری از انرژی باد، به عنوان یک منبع انرژی پاک، تجدیدپذیر و اقتصادی، نقش بسزایی در تامین انرژی پایدار و کاهش وابستگی به سوخت های فسیلی ایفا نموده و انجام پروژه های تحقیقاتی و توسعه ای نظیر پروژه حاضر، گامی مهم در راستای تحقق این هدف ارزشمند محسوب می گردد.

۷ منابع

- مباحث مطرح شده در کلاس
- جزوات کلاسی
- کتاب انرژی بادی اثر وان نلسون
- کتاب مهندسی انرژی باد اثر پرامد جین
- اینترنت