

محاسبه تراست، راندمان و اثرات تغییر پارامترهای موثر بر عملکرد توربین بادی با نرم‌افزار Q-Blade

سید رضا حسینی^{۱*}، مهدی سبزه پرور^۲

۱- دانش‌آموخته کارشناسی مهندسی هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، sreza hosseini1998@gmail.com

۲- دانشیار و عضو هیئت علمی دانشکده هوافضا، دانشگاه صنعتی امیرکبیر، sabzeh@aut.ac.ir

*نویسنده مخاطب

چکیده

امروزه راهبرد تامین انرژی، به ویژه توسعه‌ی انرژی‌های پاک با توجه به آلودگی‌های ناشی از سوخت‌های فسیلی و محدودیت منابع آنها در سطح جهان، بسیار مورد توجه قرار گرفته است. انرژی باد نیز به دلیل در دسترس بودن و امکان تبدیل انرژی جنبشی آن به انرژی الکتریسیته از اهمیت خاصی برخوردار است؛ در این مقاله به طراحی توربین بادی کوچک محور افقی دارای ۳ پره‌ی متساوی و توان ۲۰ کیلو وات با استفاده از اطلاعات شرکت Ryse-Energy پرداخته شده است. بر مبنای تئوری مومنتوم المان پره، مقادیر خروجی با استفاده از نرم‌افزار Q-Blade و کد تکرار شونده در متلب محاسبه شدند. برای محاسبه مقادیر توان، گشتاور و تراست توربین بادی از تئوری معکوس لاک و روش تخمین تراست در هواپیمای ملخی نیز استفاده شده و نتایج بدست آمده با تئوری مومنتوم المان مقایسه شد. ابتدا توربین بادی با ایرفویل E387(E) و سیستم کنترلی زاویه گام برای شهر سنندج (۱۵۳۸ متر از سطح دریا)، در یک روز استاندارد (دمای ۱۵ درجه سلسیوس) و چگالی ۱/۰۲ کیلو گرم بر متر مکعب با میانگین حدودی سالیانه‌ی سرعت باد ۶/۸ متر بر ثانیه طراحی شد. با توجه به شعاع روتور (۴/۹ متر) و دور آن (۱۲۰ rpm)، نسبت سرعت نوک پره نیز برابر ۶/۵ محاسبه گردید. در ادامه با تغییر پارامترهای دما، چگالی، ارتفاع، تعداد پره‌ها، نسبت سرعت نوک پره، سرعت باد، عدد رینولدز، نوع ایرفویل (NACA43012A و CAL4014) و سرعت دورانی روتور؛ تاثیر هر کدام بر روی عملکرد توربین بادی و نتایج بدست آمده تحلیل و بررسی شد.

واژه‌های کلیدی: تئوری مومنتوم المان پره - توربین بادی محور افقی - نرم‌افزار Q-Blade - ایرفویل E387(E) - تئوری معکوس لاک

۱- مقدمه

مفهوم استفاده از انرژی باد، تبدیل انرژی جنبشی آن به الکتریسیته است. انرژی باد قابل پیش‌بینی نیست، البته این مشکل در اکثر کشورهای جهان که بهره‌برداری از انرژی باد در آنها صرفه اقتصادی دارد، کنترل شده است. نکته بسیار مهم دیگر در بررسی انرژی بادی، درک درست ویژگی‌های آن می‌باشد. مشکلاتی مانند: ثابت نبودن شدت باد، سرعت باد، مکان وزش باد، زمان، ارتفاع، اقلیم، شب و روز، فصل‌های گوناگون و عوارض طبیعی انرژی باد بر روی این ویژگی‌ها تاثیرگذار خواهند بود [۱].

نیروگاه‌های بادی اغلب در خشکی احداث می‌شوند، دانشمندان علاوه بر توسعه این نیروگاه‌ها، به فکر احداث توربین در آب‌های ساحلی نیز هستند. توربین‌های جزر و مدی فرایند احداث دشوارتر، پرهزینه‌تر و نیز سخت‌تری نسبت به توربین‌های بادی در خشکی دارند. اما علت توجه به توربین‌های جزر و مدی کسب راحت‌تر مجوز، بهتر بودن رژیم بادی و تولید برق بیشتر نسبت به توربین بادی با ساختار مشابه در سطح خشکی است [۲].

توربین‌های بادی به طور کلی به دو دسته تقسیم می‌شوند. دسته‌ای که محور دوران آنها موازی سطح زمین است، محور افقی و دسته‌ی دیگر که محور دوران آنها عمود بر سطح زمین است، محور عمودی نام دارند. مزیت مهم توربین‌های محور افقی بازده بالا و قابلیت راه‌اندازی خودکار است [۳]. شکل (۱) توربین‌های بادی محور عمودی و محور افقی را نشان می‌دهد.



شکل ۱- الف) توربین بادی محور عمودی، ب) توربین بادی محور افقی

مزیت توربین‌های بادی محور عمودی، استقلال از باد بودن آنهاست. ساونیوس (Savonius) و داریوس (Darrieus) از معروف‌ترین توربین‌های بادی محور عمودی جهان به شمار می‌آیند. داریوس بازده بیشتری نسب به ساونیوس دارد، اما نقطه ضعف آن مشکل راه‌اندازی خودکار است [۴]. توربین‌های محور عمودی جدید مدل ترکیبی داریوس - ساونیوس می‌باشند. امروزه سعی می‌شود که با اعمال تغییراتی بر پره‌های این دو توربین بادی، عملکرد آنها تا حد امکان بهبود یابد [۳].

در طراحی توربین‌های بادی نوین مشکلات اساسی از جمله: نیاز به پره‌های غول آسا، هزینه‌های راه‌اندازی، تولید توان بالا، مشکلات تعمیر و نگهداری، آسیب پره‌های بزرگ به پرندگان، آلاینده‌ی‌های بصری و نیاز به مساحت زیاد جهت نصب و راه‌اندازی توربین‌های بادی وجود ندارند [۵].

سازماندهی این مقاله بدین صورت است که در بخش ۲، تاریخچه و پیشینه پژوهش‌ها مرور می‌شوند. در بخش ۳، هندسه توربین، معادلات و تئوری‌های حاکم به همراه نوآوری مقاله نیز که استفاده از روش تخمین تراست هواپیمای ملخی می‌باشد، بیان شده است. بخش ۴، به بررسی فلوچارت حل مسائل، صحت سنجی نتایج حل عددی و مقایسه انواع روش‌ها با یک دیگر به همراه تاثیر تعداد پره‌ها، ارتفاع، چگالی، نسبت سرعت نوک و ... بر روی عملکرد توربین بادی می‌پردازد. بخش ۵ (آخر) نیز جمع‌بندی، نتیجه‌گیری و ارائه پیشنهادات برای سایر پژوهش‌ها است.

۲- تاریخچه و مروری بر پیشینه‌ی پژوهش‌ها

تاریخچه استفاده از انرژی باد و تبدیل آن به انرژی مکانیکی، به قرن ۱۷ پیش از میلاد باز می‌گردد. زمانی که در منطقه سیستان، آسیاب‌های بادی محور عمودی طراحی شدند [۶]. طبق شواهد تاریخی ایرانیان جزو اولین سازندگان آسیاب‌های بادی محور عمودی در جهان به شمار می‌آیند.

عرب گلارچه و همکاران [۴] در سال ۲۰۱۵، با بررسی پارامترهای اصلی توربین بادی داریوس متوجه شدند با افزایش ضخامت ایرفویل، توربین از قابلیت راه‌اندازی بهتری برخوردار می‌شود. افزایش ضخامت ایرفویل دامنه کاری توربین را کاهش می‌دهد، کاهش راندمان آن نیز به دلیل کاهش ضریب برآ خواهد بود. افزایش صلبیت ایرفویل تا حدود ۰/۳۳ باعث بهبود حداکثر راندمان شده و پس از آن باعث کاهش حداکثر راندمان می‌شود. افزایش گام زاویه‌ای تا حدی بر عملکرد توربین بادی تاثیر مثبت دارد.

شکل (۳) انواع تقسیم بندی‌های گوناگون توربین باد را نشان می‌دهد.



شکل ۳- نمودار درختی تقسیم بندی انواع توربین‌های باد

۳- روابط، معادلات حاکم و مدلسازی

در این بخش، معادلات حاکم بر محاسبه تراس و راندمان توربین‌های بادی ارائه شده‌است. مدلسازی جریان پره‌ی توربین بادی در این مقاله، با استفاده از نرم‌افزار Q-Blade و نتایج تجربی بدست آمده بر روی ایرفویل‌ها صورت گرفته تا در نهایت با توجه به آنها و روابط حاکم بر مسئله، به حل عددی در نرم‌افزار متلب ختم شود. همچنین از تئوری مومنتوم المان پره، تئوری معکوس لاک و روش تخمین تراس در هواپیماهای ملخی در روند حل استفاده شده‌است.

۳-۱- توصیف فیزیک مسئله

در این بخش هندسه ایرفویل و توربین بادی مورد بررسی، توصیف می‌شوند. استاندارد جهانی برق، بیان می‌کند که اگر مساحت جاروب شده (A) یک توربین بادی محور افقی، کمتر از ۲۰۰ متر مکعب بوده و توان خروجی آن نیز کمتر از ۵۰ کیلو وات باشد، توربین بادی کوچک محسوب می‌شود [۱۱]. پس می‌توان توربین بادی این مقاله با مساحت جاروب شده (A) کمتر از ۲۰۰ متر مکعب (۱۵۴ متر مکعب) و توان خروجی ۲۰ کیلو وات را جزو دسته توربین‌های بادی کوچک دانست.

شکل (۲) آسیاب‌های بادی محور عمودی ایران را نشان می‌دهد [۳].



شکل ۲- آسیاب‌های بادی ایران باستان (واقع در منطقه سیستان)

تاریخچه آسیاب‌های بادی محور افقی به قرن سوم قبل از میلاد، هنگامی که یک دانشمند مصری آسیاب بادی چهار پره محور افقی را طراحی کرد، باز می‌گردد. توسعه ماشین‌های بادی محور قائم نیز از چین و شرق مدیترانه شروع شد. افرادی که در جنگ‌های صلیبی بودند، تکنولوژی استفاده از آسیاب‌های بادی را از خاورمیانه به اروپا انتقال دادند.

پس از گذشت چند قرن از توسعه آسیاب‌های بادی، اقدامات مهم ادیسون در زمینه تولید الکتریسیته و اختراع نسخه‌ی اولیه لامپ الکتریکی در سال ۱۸۷۹، باعث شد تا دانشمندان متوجه این امر شوند که علاوه بر تولید انرژی مکانیکی، می‌توانند انرژی باد را به انرژی الکتریکی تبدیل کنند. در سال ۱۸۸۷ یک دانشمند اسکاتلندی به نام جیمز بلایت نخستین توربین بادی با کاربرد تولید برق را اختراع کرد [۲، ۶].

توربین‌های بادی عمود محور ساوننیوس، توسط یوهانس ساوننیوس که یک مهندس فنلاندی بود، در سال ۱۹۲۲ اختراع شدند. این نوع توربین‌ها حداقل از دو نیم استوانه تشکیل می‌شوند. گردش توربین حول محور خودش را می‌توان ناشی از بیشتر بودن نیروی پسا در ناحیه‌ی مقعر نسبت به قسمت محدب روتورها دانست. [۷].

توربین بادی محور عمودی داریوس نیز توسط یک مهندس فرانسوی به نام جورج مری جین داریوس، در سال ۱۹۳۱ اختراع شد. او با استفاده از نیروی برآ ایجاد شده در پرها، توربین بادی خود را به حرکت در آورد [۸]. سبزه پرور [۹] در سال ۲۰۰۵، با استفاده از یک مدل ملخ تک عنصری، پارامترهای بسیار زیاد و موثر ملخ هواپیما را به فرمول ضریب برآ و پسا در مقابل زاویه‌ی حمله کاهش داد، این کار باعث شد تا ویژگی‌های ملخ در یک محدوده عملیاتی گسترده توصیف شوند. سرعت هوا، ارتفاع پروازی، دریچه‌ی کنترل گاز، گشتاور و سرعت ملخ نیز به عنوان تنها پارامترهای مورد نیاز برای تخمین نیروی تراس در حین پرواز معرفی شدند.

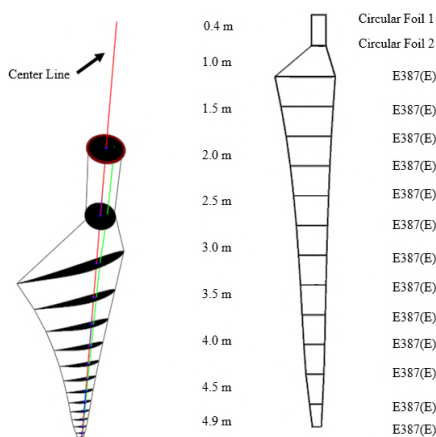
قدیمی و همکاران [۱۰] در سال ۲۰۱۲، به طراحی و آنالیز روتور توربین باد ۲ کیلو وات پرداختند. در این پژوهش مقادیر گشتاور، تراس و توان خروجی روتور با نتایج بدست آمده از نرم‌افزار Q-Blade و داده‌های تست مقایسه‌ای محاسبه و اعتبار سنجی شدند. به علت کنترل توان توربین با زاویه‌ی گام پره، در تمامی سرعت‌های کاری مقادیر زاویه‌ی حمله کمتر از زاویه‌ی حمله‌ی واماندگی ایرفویل می‌باشند. این پژوهش نشان داد که تئوری مومنتوم المان پره برای زاویه‌ی حمله کمتر از واماندگی مورد اعتماد است.

با استفاده از تئوری مونتوم المان و کد متلب، می‌توان مشخصات هندسه پره و ایرفویل‌های سازنده آن را محاسبه و در جدول (۱) بیان کرد.

جدول ۱- اجزای سازنده‌ی پره توربین بادی کوچک با ایرفویل E387(E)

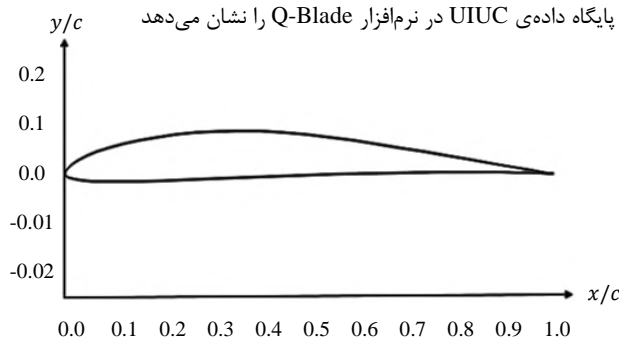
نوع ایرفویل	زاویه گام °	طول وتر (m)	موقعیت شعاعی	
Circular Foil 1	۱۷/۳۰۵	۰/۱۷۰	۰/۴۰۰	۱
Circular Foil 2	۱۷/۳۰۵	۰/۱۷۰	۰/۷۷۸	۲
E387	۱۷/۳۰۵	۰/۷۱۲	۱/۰۷۵	۳
E387	۱۲/۹۶۵	۰/۶۰۴	۱/۴۰۰	۴
E387	۹/۸۹۸	۰/۵۱۷	۱/۷۲۵	۵
E387	۷/۶۶۲	۰/۴۵۰	۲/۰۵۰	۶
E387	۵/۹۶۶	۰/۳۹۶	۲/۳۷۵	۷
E387	۴/۶۴۱	۰/۳۵۳	۲/۷۰۰	۸
E387	۳/۵۸۰	۰/۳۱۸	۳/۰۲۵	۹
E387	۲/۷۱۳	۰/۲۸۸	۳/۳۵۰	۱۰
E387	۱/۹۹۲	۰/۲۶۲	۳/۶۷۵	۱۱
E387	۱/۳۸۳	۰/۲۳۵	۴/۰۰۰	۱۲
E387	۰/۸۶۲	۰/۲۰۲	۴/۳۲۵	۱۳
E387	۰/۴۱۲	۰/۱۴۶	۴/۶۵۰	۱۴
E387	۰/۸۶۲	۰/۱۰۱	۴/۹۰۰	۱۵

در این توربین بادی، سیستم کنترل زاویه‌ی گام جهت کنترل توان خروجی در مواقعی که سرعت باد بیشتر از سرعت نامی است، وجود دارد. با توجه به محاسبات انجام شده در نرم‌افزار متلب و تئوری مونتوم المان پره، مشخصات پره‌ی توربین بادی کوچک محاسبه می‌شوند. برای اینکه طراحی بهینه شود، می‌توان با استفاده از تنظیمات نرم‌افزار Q-Blade (Thread at Center Line Max Thickness) تمام ایرفویل‌ها را با محور گام، نسبت به وتر پره با حداکثر ضخامت تراز کرد. پره‌ی مدلسازی شده با ایرفویل E387(E) و خط تراز در شکل (۶) آورده شده است.



شکل ۶- پره با ایرفویل E387(E) و خط تراز ایرفویل‌ها با محور گام آن

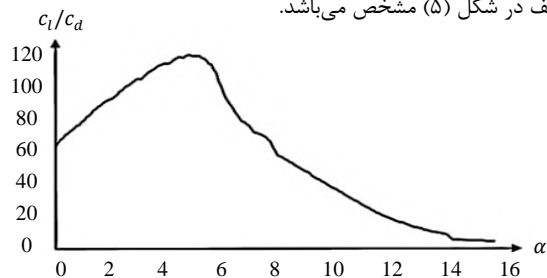
توربین بادی کوچک مورد مطالعه، یک توربین محور افقی با ۳ پره متساوی می‌باشد. پره‌ی توربین بادی ۲۰ کیلو وات از یک ایرفویل E387(E) ساخته شده است. برای ترسیم ایرفویل در Q-Blade از مختصات پایگاه دانشگاه ایلینوی واقع در اربانا - شمپین (UIUC) استفاده شده است [۱۲]. شکل (۴) هندسه ترسیم شده‌ی ایرفویل E387(E) با استفاده از مختصات پایگاه داده‌ی UIUC در نرم‌افزار Q-Blade را نشان می‌دهد



شکل ۴- هندسه‌ی ترسیم شده ایرفویل E387(E) در Q-Blade

آمار سالیانه سرعت باد در ۴۰ ایستگاه سینوپتیک (۱۹۷۵ - ۲۰۰۵) نشان می‌دهد با توجه به موقعیت جغرافیایی، میانگین سالیانه‌ی سرعت باد هر ایستگاه متفاوت خواهد بود. ایستگاه سنندج با میانگین سالیانه‌ی سرعت باد ۶/۷۴ متر بر ثانیه به عنوان ایستگاه مورد بررسی انتخاب می‌شود [۱۳]. محاسبات در یک روز استاندارد (دمای ۱۵ درجه سانتی گراد) انجام می‌شود، با توجه به ارتفاع سنندج (۱۵۳۸ متر از دریا) و ارتفاع برج توربین (۱۵ متر)، چگالی ۱/۰۲ کیلوگرم بر مترمکعب است. مطابق استاندارد ۲-۶۱۴۰۰ IEC سرعت طراحی توربین بادی کوچک می‌بایست ۱/۴ برابر میانگین سرعت سالیانه باد (۹/۴۳۶ متر بر ثانیه) باشد [۱۴].

مشخصات اولیه‌ی توربین بادی ۲۰ کیلو وات، با توجه به ویژگی‌های توربین بادی طراحی شده توسط شرکت Ryse-Energy انتخاب می‌شوند. بنابر این با توجه به محدودیت‌های طراحی اگر شعاع روتور قابل تغییر نباشد، می‌توان با توجه به چگالی و توان بهینه (۱۸ کیلو وات)، ضریب توان را محاسبه کرد (۲۷/۱ درصد، در نقطه توان بهینه). بیشینه‌ی سرعت دورانی ۱۲۰ دور بر دقیقه است، با توجه به شعاع روتور (۴/۹ متر) و سرعت طراحی (۹/۴۴ متر بر ثانیه) نسبت سرعت نوک برابر ۶/۵۲۵۶ بدست می‌آید [۱۵]. با استفاده از نرم‌افزار Q-Blade و منحنی ایرفویل E387(E) در عدد رینولدز نزدیک به ۴۶۰۰۰۰، می‌توان با توجه به بیشینه ضریب برآ به پسای نمودار (۱۱۶/۳)، زاویه حمله‌ی طراحی را برابر ۵/۷ درجه محاسبه کرد. منحنی ضریب برآ به پسای ایرفویل E387(E) نسبت به زوایای حمله‌ی مختلف در شکل (۵) مشخص می‌باشد.

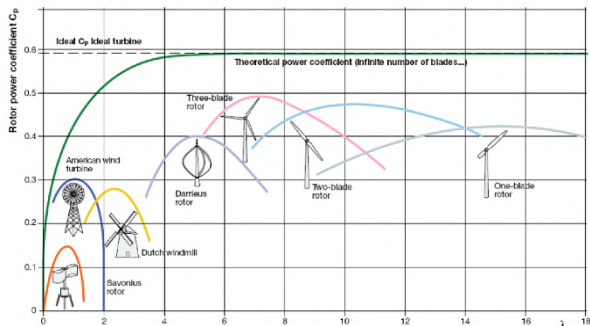


شکل ۵- منحنی ضریب برآ به پسای ایرفویل E387(E)

نسبت به زوایای حمله مختلف

۳-۲-۱- حد بتز

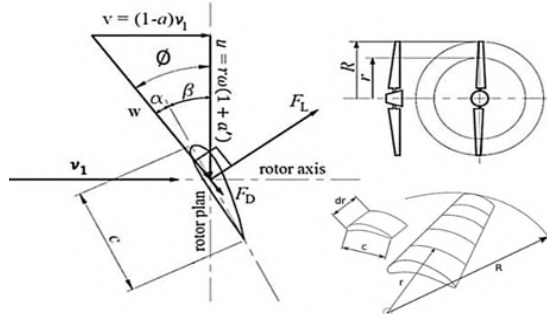
حد بتز، بیشینه قدرت توربین بادی است که با استفاده از تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی الکتریکی در حالت تئوری محاسبه شده و مقدار تقریبی آن برابر با $59/3\%$ است [۱]. البته در سال ۲۰۱۳ پژوهشی نشان داد که توربین‌های جزر و مدی به علت وجود سیال آب (۷۷۵ برابر چگال تر از هوا) می‌توانند از حد بتز کمی فراتر رفته و راندمان بیشتری را تجربه کنند [۱۷]. شکل (۸) منحنی ضریب توان (راندمان) انواع توربین‌های بادی را بر حسب نسبت‌های مختلف سرعت نوک پره نشان می‌دهد.



شکل ۸- منحنی راندمان بر حسب نسبت سرعت نوک پره انواع توربین‌ها

۳-۲-۲- تئوری مومنتوم المان پره

تئوری مومنتوم المان پره، در حقیقت پره‌ی روتور را به چندین المان مختلف در راستای دهانه بال تقسیم بندی می‌کند. با استفاده از این تئوری می‌توان مشخصات هندسه پره توربین بادی را محاسبه کرد. به طور معمول تعداد المان ۱۰ تا ۲۰ عدد، برای تقسیم بندی پره مناسب است [۱۸]. شکل (۹) المان کوچکی از پره‌ی روتور را نشان می‌دهد.



شکل ۹- المان و زوایای پره روتور یک توربین باد

با توجه به شکل (۹) هر کدام از المان پره‌ها یک سرعت محوری (v_0) و یک سرعت مماسی ($r\omega$) دارند. با توجه به نیروهای وارد شده باد به روتور، سرعت محوری به $v(1-a)$ کاهش و سرعت مماسی به $r\omega(1+a)$ افزایش پیدا می‌کند. به مجموع بردارهای سرعت مماسی و محوری پره، بردار سرعت نسبی پره (W) می‌گویند [۱۱]. برای درک زوایای مهم یک پره توربین بادی بهتر است با مفاهیم زیر آشنا شد:

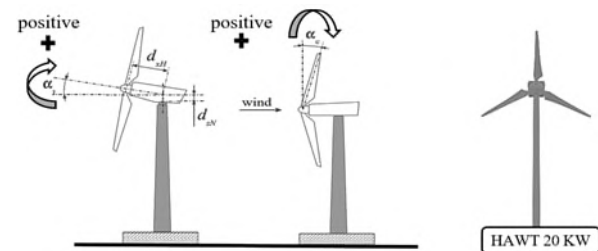
- زاویه‌ی حمله (α): زاویه بین سرعت نسبی و خط وتر
- زاویه‌ی جریان (ϕ): زاویه بین بردار سرعت نسبی و صفحه روتور
- زاویه‌ی گام پره (θ): زاویه‌ای که پره حول خودش می‌تواند بچرخد.

جدول (۲) مشخصات توربین باد کوچک مورد بررسی را نشان می‌دهد.

جدول ۲- مشخصات اولیه‌ی توربین بادی با ابرفویل E387(E)

مقدار	واحد	مشخصه‌ی توربین
۲۰۰۰۰	وات	توان خروجی
۱۸۰۰۰	وات	توان بهینه
۳	-	تعداد پره
۰/۸	متر	قطر هاب
۹	متر	قطر پره
۹/۸	متر	قطر روتور
۵/۷	درجه	زاویه حمله‌ی طراحی
۱۲۰	دور بر دقیقه	بیشینه سرعت دورانی
۷۰	متر بر ثانیه	سرعت بقا توربین بادی
۶/۷۴	متر بر ثانیه	سرعت متوسط باد سالیانه
۹/۴۳۶	متر بر ثانیه	سرعت باد طراحی
۶/۵۲۵۶	-	نسبت سرعت نوک پره
۱۵	متر	ارتفاع برج توربین باد از سطح زمین
سیستم کنترلی زاویه‌ی گام پره		سیستم کنترل توان
جهت گیری بادسو (موافق جریان باد)		جهت گیری روتور

اگر شعاع بالا و پایین برج توربین باد به ترتیب برابر $0/2$ و $0/3$ باشند و فاصله‌ی بین تلاقی محور روتور، تقارن برج و محور مختصات هاب (d_{XH}) مشخص باشد، می‌توان شکل توربین بادی کوچک با ابرفویل E387(E) را در Q-Blade ترسیم کرد. فاصله d_{XH} $0/75$ متر فرض شده و برای سادگی روند حل زاویه بین صفحه روتور و محور پره (α_c) و زاویه‌ی بین محور افقی و محور شفت روتور (α_t) صفر در نظر گرفته می‌شوند [۱۶]. شکل (۷) نمای توربین بادی طراحی شده در Q-Blade و این فواصل را نشان می‌دهد.

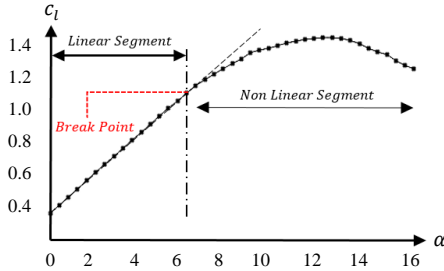


شکل ۷- توربین باد رسم شده در Q-Blade، فاصله d_{XH} ، زوایای α_t و α_c

۳-۲-۳- تئوری‌ها، مفاهیم و معادلات حاکم

توجه به تئوری‌های مهم آیرودینامیک توربین بادی، باعث دقیق‌تر شدن حل مسائل شده و همچنین مشکلات به وجود آمده در طراحی را کمتر می‌کند. از سوی دیگر توجه به مفاهیم اصلی آیرودینامیک توربین بادی، باعث درک صحیح‌تر حل مسائل می‌شود. در نهایت با استفاده از معادلات و پارامترهای موثر بر عملکرد توربین بادی می‌توان مسئله مورد نظر را حل کرد.

روش تخمین تراست با استفاده از روابط بدست آمده از برازش منحنی و ترکیب آن با تئوری لاک و معکوس آن معادلات محاسبه تراست، گشتاور و توان پره‌های هواپیماهای ملخی ارائه می‌کند [۹].
ابتدا نمودارهای ایرفویل E387(E) در Q-Blade استخراج و معادلات آنها با برازش منحنی در اکسل محاسبه می‌شوند. شکل (۱۰) نشان دهنده نمودار ضریب برآ ایرفویل E387(E) نسبت به زوایای حمله مختلف می‌باشد.



شکل ۱۰- منحنی ضریب برآ نسبت به زوایای حمله‌ی ایرفویل E387(E)

اگر به منحنی شکل (۱۰) دقت شود از دو بخش خطی و غیر خطی تشکیل شده و توسط نقطه‌ی انفصال منحنی، از یک دیگر جدا می‌شوند. چند جمله‌ای مرتبه اول برای قسمت خطی نمودار برابر است با:

$$c_{l1} = 0.4158 + 0.111 \alpha \text{ for } (\alpha < \alpha_p)$$

برای قسمت غیر خطی نمودار یک عبارت مرتبه دوم داریم:

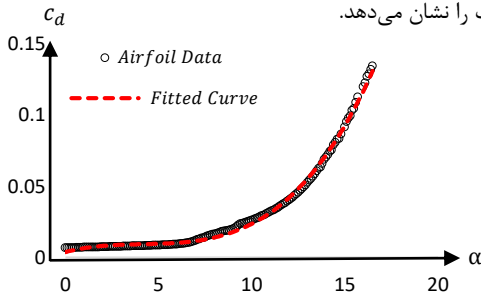
$$c_{l2} = 0.094 + 0.2177\alpha - 0.009 \alpha^2 \text{ for } (\alpha > \alpha_p)$$

برای انطباق دو منحنی، نقطه‌ی انفصال باید پیوستگی داشته باشد:

$$f(c_{l1}(\alpha_p)) = f(c_{l2}(\alpha_p)) \xrightarrow{\text{for } \alpha_p=5.8} c_{l1} = c_{l2} \approx 1.053$$

شکل (۱۱) نمودار ضریب پسا ایرفویل E387(E) در زوایای حمله

مختلف را نشان می‌دهد.

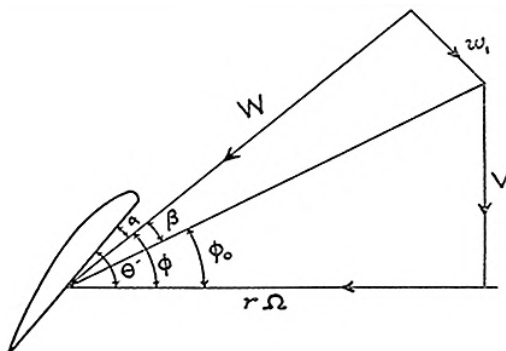


شکل ۱۱- منحنی ضریب پسا نسبت به زوایای حمله‌ی ایرفویل E387(E)

چند جمله‌ای مرتبه سوم منحنی نیز برابر است با:

$$c_d = 0.0038 - 0.0035 \alpha + 0.0008 \alpha^2 + 0.0001 \alpha^3$$

شکل (۱۲) مولفه‌های سرعت و زوایای تئوری لاک را نشان می‌دهد.



شکل ۱۲- سرعت و زوایای یک عنصر پره‌ی ملخ

زوایای حمله، گام و جریان ورودی را می‌توان با روابط زیر بدست آورد:

$$\alpha = \phi - \theta \quad (1)$$

$$\phi = \tan^{-1} \left(\frac{1-a}{1+a} \times \frac{v_0}{r\omega} \right) \quad (2)$$

نیروی برآ (L) با توجه به ضریب برآ (c_l) و نیروی پسا (D) با توجه به ضریب پسا (c_d) برای هرکدام از مقاطع پره با داشتن سرعت نسبی پره (W)، و تر پره (c) و چگالی (ρ) آن از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند:

$$L = \frac{1}{2} \rho w^2 c c_l \quad (3)$$

$$D = \frac{1}{2} \rho w^2 c c_d \quad (4)$$

در روش تئوری مومنوم المان پره برای محاسبه‌ی نیروی تراست (T) و راندمان (C_p) نیاز است تا ضریب اصلاح پرائنل (F) روی روابط اعمال شده و معادلات را اصلاح کند. ضریب پرائنل (F) به تعداد پره (B)، شعاع پره (r) و شعاع روتور (R) وابسته بوده و با روابط زیر قابل محاسبه است [۱۱، ۱۸]:

$$f = \frac{B}{2r} \frac{R-r}{\sin(\phi)} \quad (5)$$

$$F = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}(e^{-f}) \quad (6)$$

روابط ضرایب نیروهای عمود و موازی با صفحه‌ی روتور برابر است با:

$$c_y = c_l [\cos(\phi)] + c_d [\sin(\phi)] \quad (7)$$

$$c_x = c_l [\sin(\phi)] - c_d [\cos(\phi)] \quad (8)$$

عامل القای محوری (a) و مماسی (\hat{a}) به استحکام پره یا صلبیت (σ) وابسته است. از طرفی استحکام پره نیز به طول وتر (c)، تعداد پرها (B) و شعاع پره (r) بستگی دارد. رابطه زیر نشان دهنده‌ی استحکام پره (صلبیت) یک توربین بادی است:

$$\sigma = \frac{c B}{2\pi r} = \frac{\text{Blade Area}}{2\pi r} \quad (9)$$

با استفاده از روابط زیر عامل القای محوری (a) و القای مماسی (\hat{a})

قابل محاسبه است:

$$a = \frac{1}{\left(\frac{4F \sin^2(\phi)}{\sigma c_y} \right) + 1} \quad (10)$$

$$\hat{a} = \frac{1}{\left(\frac{4F \sin(\phi) \cos(\phi)}{\sigma c_x} \right) - 1} \quad (11)$$

نسبت سرعت نوک پره (λ) به شعاع روتور (R)، سرعت باد (v_0) و سرعت دورانی روتور (ω) وابسته بوده و از رابطه زیر قابل محاسبه است:

$$\lambda = \frac{R\omega}{v_0} \quad (12)$$

در روند حل به مقادیر دیگری مثل چگالی (ρ) بر حسب دما (K) و

ارتفاع (m)، نسبت سرعت نوک پره محلی (λ_{loc}) و طول وتر (c) نیاز می‌شود، مقادیر آنها را می‌توان با استفاده از روابط زیر محاسبه کرد [۱۱، ۱]:

$$\rho = \frac{353.049}{T} e^{(-0.034 \frac{T}{273})} \quad (13)$$

$$\lambda_{loc} = \lambda \frac{r}{R} \quad (14)$$

$$c = 4\pi r F \sin^2(\phi) \frac{1}{B} \frac{1}{c_y} \quad (15)$$

در نهایت با توجه به آنچه بیان شد، می‌توان ضریب تراست و راندمان

یک توربین بادی را با استفاده از روابط زیر محاسبه کرد:

$$C_T = \left[(1-a)^2 + \left(\lambda \frac{r}{R} \right)^2 (1+\hat{a})^2 \right] \sigma c_y \quad (16)$$

$$C_P = \left[(1-a)^2 + \left(\lambda \frac{r}{R} \right)^2 (1+\hat{a})^2 \right] \lambda \frac{r}{R} \sigma c_x \quad (17)$$

۳-۲-۳- تئوری معکوس لاک و روش تخمین تراست

تئوری معکوس لاک برخلاف تئوری مستقیم لاک، ابتدا مقادیر تراست ملخ، توان شفت و نسبت پیشروی را اندازه گیری کرده و سپس ضرایب برآ و پسا ایرفویل را با استفاده از برازش منحنی آنها محاسبه می‌کند.

مقادیر ضریب تراست (C_T)، ضریب گشتاور (C_Q) و ضریب توان (C_P) با توجه به روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند [۹، ۲۰]:

$$C_T = \left(\frac{\pi^4}{16}\right) s c_l W^2 \cos(\varphi) \quad (30)$$

$$C_Q = \left(\frac{l C_T}{2\pi}\right) + \left(\frac{\omega C_T}{2}\right) + \left(\frac{\pi^4}{32}\right) s c_d W^3 \quad (31)$$

$$C_P = 2 \pi C_Q \quad (32)$$

مقادیر تراست، گشتاور و توان از روابط زیر قابل محاسبه است [۹]:

$$Trust = C_T \rho \left(\frac{rpm}{60}\right)^2 (2R)^4 \quad (33)$$

$$Torque = C_Q \rho \left(\frac{rpm}{60}\right)^2 (2R)^5 \quad (34)$$

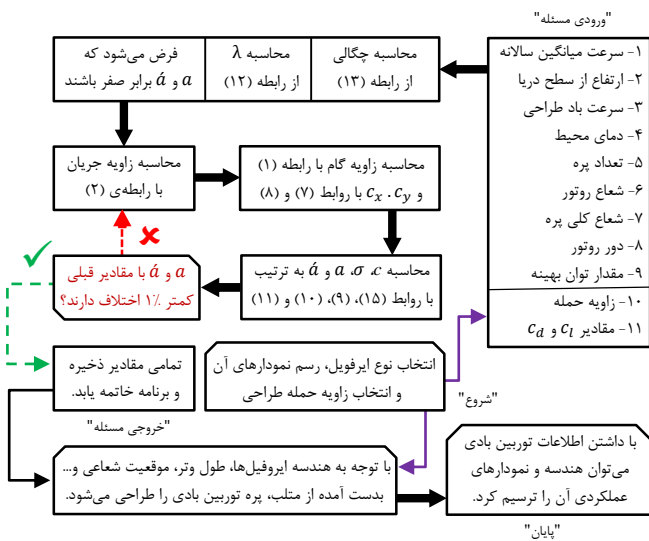
$$Power = C_P \rho \left(\frac{rpm}{60}\right)^3 (2R)^5 \quad (35)$$

۴- حل عددی

در این بخش، فلوجارت حل مسائل، صحت سنجی نتایج و حل عددی همراه با بررسی تاثیر تعداد پره‌ها، ارتفاع، چگالی، نسبت سرعت نوک پره، رینولدز، نوع ایرفویل و ... بر روی عملکرد توربین بادی بیان شده است.

۴-۱- فلوجارت (روند نما) حل مسئله

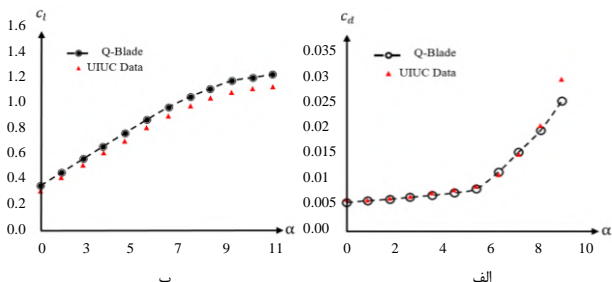
شکل (۱۳) نشان دهنده فلوجارت حل در نرم‌افزار متلب و Q-Blade است.



شکل ۱۳- فلوجارت حل مسئله در نرم‌افزار متلب و Q-Blade

۴-۲- صحت سنجی نتایج

برای صحت سنجی نتایج ایرفویل E387(E) در Q-Blade، از مختصات ایرفویل و مقادیر ضرایب برآ و پسای آن در پایگاه اطلاعات داده UIUC استفاده شده است [۱۲]. مقایسه‌ی نتایج تست تجربی ایرفویل E387(E) در رینولدز ۴۶۰۰۰۰ با نتایج Q-Blade، در شکل (۱۴) مشخص شده است.



شکل ۱۴- نمودار الف) ضرایب پسای، ب) ضرایب برآ، نسبت به زوایای حمله

با توجه به شکل (۱۲) به زاویه‌ی بین وتر پره (c) نسبت به محور صفحه‌ی چرخش، زاویه‌ی جریان (φ) گفته می‌شود. از تفاضل زاویه پره (θ) و زاویه‌ی حمله (α) می‌توان مطابق رابطه‌ی زیر مقدار زاویه‌ی واقعی جریان هوا (φ) را محاسبه کرد:

$$\varphi = \theta' - \alpha \quad (18)$$

نسبت پیشروی با داشتن قطر ملخ (D)، سرعت باد (v_0) و دور موتور (N) بر حسب rpm مطابق رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$J = \left(\frac{v_0}{ND}\right) \quad (19)$$

مقدار زاویه حمله‌ی القایی (φ_0) با داشتن نسبت پیشروی (J) و موقعیت شعاعی (X) قابل محاسبه است:

$$\varphi_0 = \tan^{-1}\left(\frac{J}{X\pi}\right) \quad (20)$$

زاویه تداخل (Interference Angle) (β) نیز با توجه به شکل (۱۲)

از رابطه‌ی زیر قابل محاسبه است:

$$\beta = \theta' - \alpha - \varphi_0 = \varphi - \varphi_0 \quad (21)$$

اگر مقادیر نسبت پیشروی (J) و نسبت شعاع پره به شعاع ملخ (X) مشخص باشد، سرعت رو به جلو (Forward Speed) (v_c) برابر است با:

$$v_c = \left(1 + \frac{\pi^2 X^2}{J^2}\right) \quad (22)$$

با داشتن مقادیر نسبت استحکام پره (s)، ضریب اتلاف نوک پره (χ)، زاویه‌ی واقعی جریان هوا (φ) و زاویه‌ی تداخل (β) می‌توان مقدار ضریب برآ (C_l) را محاسبه کرد [۹، ۱۹]:

$$\chi = \frac{2}{\pi} \cos^{-1}\left(e^{\left[-\frac{B}{2}\left(1 - \frac{4\chi c}{\lambda} \frac{1}{\sin(\varphi)}\right)\right]}\right), s = \left(\frac{B c}{2 \pi r}\right) \rightarrow s c_l = 4 \chi \sin(\varphi) \tan(\beta) \quad (23)$$

با توجه به ضرایب معادلات C_{l2} ، C_{l1} و C_d می‌توان معادلات نیروی تراست و توان شفت را برای دو حالت پیش از واماندگی جریان و پس از آن بازنویسی کرد. روابط زیر به ترتیب نیروی تراست و توان ملخ را برای نقاط پایین‌تر از بازه‌ی واماندگی جریان نشان می‌دهند [۹]:

$$T = \frac{1}{2} \rho B c R X W^2 [(A_1 + A_2 \alpha) \cos(\varphi) - (A_6 + A_7 \alpha + A_8 \alpha^2 + A_9 \alpha^3) \sin(\varphi)] \quad (24)$$

$$P_S = \frac{1}{2} \rho B c R X v^3 \cos^2(v_c) \left\{ [(A_1 + A_2 \alpha) \cos(\beta) - (A_6 + A_7 \alpha + A_8 \alpha^2 + A_9 \alpha^3) \sin(\varphi)] \left[1 + \frac{v_c \sin(\beta)}{\cos(\varphi)} \right] + \sqrt{v_c} \cos(\beta) (A_6 + A_7 \alpha + A_8 \alpha^2 + A_9 \alpha^3) \right\} \quad (25)$$

روابط نیروی تراست و توان برای نقاط بالاتر از واماندگی جریان را نیز

می‌توان به صورت زیر بازنویسی کرد [۹]:

$$T = \frac{1}{2} \rho B c R X W^2 [(A_3 + A_4 \alpha + A_5 \alpha^2) \cos(\varphi) - (A_6 + A_7 \alpha + A_8 \alpha^2 + A_9 \alpha^3) \sin(\varphi)] \quad (26)$$

$$P_S = \frac{1}{2} \rho B c R X v^3 \cos^2(v_c) \left\{ [(A_3 + A_4 \alpha + A_5 \alpha^2) \cos(\beta) - (A_6 + A_7 \alpha + A_8 \alpha^2 + A_9 \alpha^3) \sin(\varphi)] \left[1 + \frac{v_c \sin(\beta)}{\cos(\varphi)} \right] + \sqrt{v_c} \cos(\beta) (A_6 + A_7 \alpha + A_8 \alpha^2 + A_9 \alpha^3) \right\} \quad (27)$$

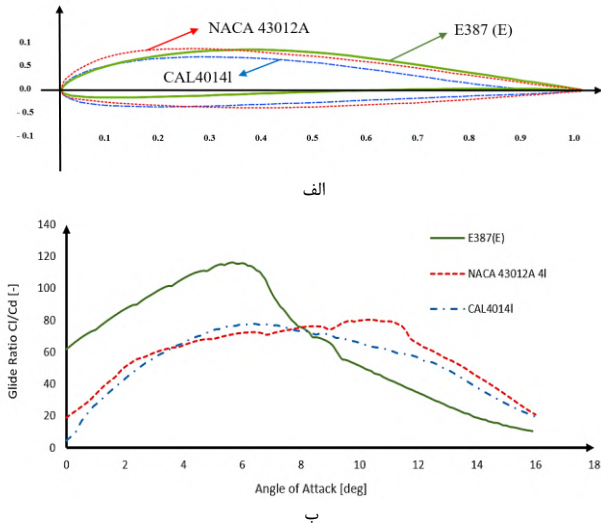
سرعت کل جریان هوای واقعی (W) و سرعت دورانی (ω) از روابط زیر قابل محاسبه می‌باشند [۹]:

$$W = \left(\frac{x \cos(\beta)}{\cos(\varphi_0)}\right) \quad (28)$$

$$\omega = \left(\frac{x \sin(\beta)}{\cos(\varphi_0) \cos(\varphi)}\right) \quad (29)$$

۳-۳-۴ تاثیر نوع ایرفویل بر روی عملکرد توربین بادی

در این بخش با تغییر نوع ایرفویل مد نظر مسئله (E387(E)، به دو ایرفویل CAL40141 و NACA 43012A، زاویه حمله‌ی طراحی هر کدام محاسبه شده و سپس با استفاده از Q-Blade به تحلیل تغییرات ضریب توان، تراست و توان توربین بادی پرداخته می‌شود. اطلاعات هندسه‌ی ایرفویل‌ها در پایگاه داده‌ی UIUC موجود است [۱۲]. شکل (۱۶) هندسه سه ایرفویل و نمودار ضریب برآ به پسا نسبت به زوایای حمله مختلف را نشان می‌دهد.



شکل ۱۶- الف) هندسه، ب) منحنی ضریب برآ به پسا نسبت به زاویه حمله، ۳ ایرفویل E387(E)، NACA 43012A و CAL40141

۳-۳-۴ تاثیر نسبت سرعت نوک پره بر روی عملکرد توربین بادی

نسبت سرعت نوک پره با دور روتور رابطه‌ی مستقیم دارد و با افزایش آن دور روتور افزایش می‌یابد. این افزایش، باعث افزایش ضریب تراست می‌شود، ضرایب توان و گشتاور نیز ابتدا روند افزایشی و سپس کاهش‌ی دارند. ۳-۳-۴ تاثیر تعداد پرها بر عملکرد و مقایسه نتایج روش تخمین تراست جدول (۴) مقادیر بدست آمده از روش تخمین تراست و مقایسه آن با تئوری مومنوم المان را به همراه مقادیر ضریب اتلاف ۲، ۳ و ۴ پره نشان می‌دهد.

جدول ۴- مقادیر تراست، گشتاور، توان، ضریب و ضریب اتلاف نوک برای توربین ۳، ۲ و ۴ پره و مقایسه روش تخمین تراست با تئوری مومنوم المان

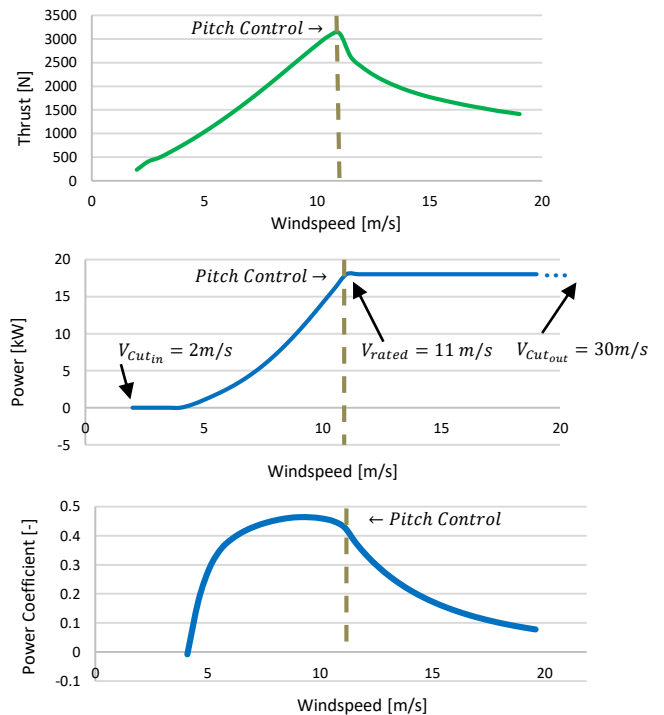
مقایسه روش تخمین تراست و تئوری المان در سرعت ۹/۴۳۶ متر بر ثانیه				
تعداد پره و روش حل	توان	تراست	گشتاور	ضریب
۳ پره (روش تئوری مومنوم)	۱۰۹۷۰	۲۶۵۶	۱۱۹۱	۰/۰۱۵
۳ پره (روش تخمین تراست)	۱۲۷۶۴	۲۶۵۵/۵	۱۰۱۵/۸	۰/۰۱۲۹
۲ پره (روش تخمین تراست)	۸۵۰۹/۵	۱۷۷۰/۴	۶۷۷/۱۷	۰/۰۰۸۶
۴ پره (روش تخمین تراست)	۱۷۰۱۹	۳۵۴۰/۷	۱۳۵۴/۳	۰/۰۱۷۲
مقایسه ضریب اتلاف نوک جدول لاک و روش تخمین تراست برای ۳، ۲ و ۴ پره				
ضریب اتلاف نوک پره	۲ پره	۳ پره	۴ پره	
خواندن از جدول لاک	۰/۸۲	۰/۹۱	۰/۹۶	
روش تخمین تراست	۰/۷۸۱۴	۰/۸۷۴۹	۰/۹۲۷۷	

با توجه به نتایج بدست آمده از روش تخمین تراست، می‌توان دریافت که این روش توافق خوبی با تئوری مومنوم المان پره دارد.

همان طور که در شکل (۱۴) مشاهده می‌شود، نمودار تست تجربی و نمودار بدست آمده از نرم‌افزار Q-Blade توافق خوبی با یک دیگر دارند. برای صحت سنجی نتایج متلب و Q-Blade نیز از نتایج حل عددی یک توربین بادی با ایرفویل E387 استفاده شد [۱۱].

۳-۴ نتایج حل عددی

در این بخش نمودارهای توان، تراست و راندمان توربین بادی نسبت به سرعت‌های مختلف باد که توسط ماژول تحلیل تئوری مومنوم Q-Blade با اعمال قید زاویه‌ی گام برای سرعت‌های بالاتر از V_{rated} بدست آمده است، مورد بررسی قرار می‌گیرد. شکل (۱۵) منحنی‌های توان، تراست و راندمان توربین بادی را قبل و بعد از V_{rated} نشان می‌دهد.



شکل ۱۵- نمودارهای تراست، توان و راندمان توربین بادی

۳-۳-۴ تاثیر نوع ایرفویل بر روی عملکرد توربین بادی

در این بخش با ثابت فرض کردن تمام پارامترهای اولیه‌ی توربین بادی و تغییر چگالی آن، تاثیر چگالی بر روی عملکرد توربین باد مشخص می‌شود. چگالی، به طور مستقیم با ارتفاع و دمای محیط رابطه دارد. از اطلاعات ارتفاع ۳ شهر بوشهر (۲ متر)، سنندج (۱۵۳۸ متر) و شهرکرد (۲۰۶۰ متر) و ۳ دمای ۵، ۱۵ و ۲۵ درجه‌ی سانتی‌گراد، اطلاعات جدول (۳) که چگالی و شعاع روتور در ارتفاعات و دماهای مختلف را نشان می‌دهند، محاسبه شد.

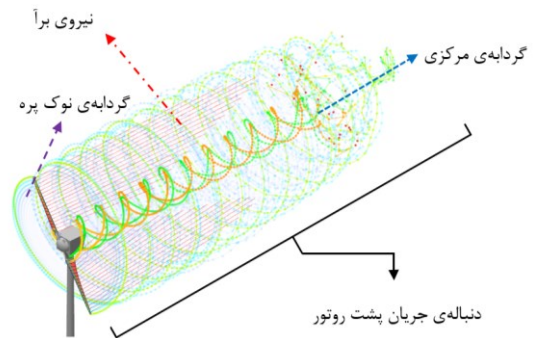
جدول ۳- تاثیر ارتفاع بر روی چگالی و شعاع روتور توربین بادی

شهر و ارتفاع آن	مقدار چگالی	شعاع روتور	مقدار نسبت نوک پره
بوشهر (۲ متر)	۱/۲۲	۴/۵	۶
سنندج (۱۵۳۸ متر)	۱/۰۲	۴/۹	۶/۵
شهرکرد (۲۰۶۰ متر)	۰/۹۶	۵	۶/۷
دمای فرض شده	مقدار چگالی	شعاع روتور	مقدار نسبت نوک پره
۵ درجه سلسیوس	۱/۰۵	۴/۸	۶/۴
۱۵ درجه سلسیوس	۱/۰۲	۴/۹	۶/۵
۲۵ درجه سلسیوس	۰/۹۹	۵	۶/۶

۶- مراجع

- [۱] س، عزیزی؛ «توربین‌های بادی؛ آشنایی با نظریه‌ها و اجزای سازنده»، کتاب، انتشارات آکادمیک، تهران، چاپ اول، سال ۱۳۹۶.
- [2] Al-Shemmeri; "Wind Turbines", *T Al-shemmeri and Ventus Publishing Aps*, 2010, ISBN 978-87-7681-692-6.
- [۳] آ، روشن، و م، مغربی؛ «بهبود عملکرد توربین بادی ترکیبی داریوس-ساوینوس»، *مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و سازه‌ها*، دوره ۶، شماره ۳، شماره صفحات ۱۹۵-۲۱۲، سال ۱۳۹۵.
- [۴] ع، عرب گلارچه، م، مقیمیان و م، جوادی مال آباد؛ «بررسی عوامل موثر بر راندمان توربین محور عمود داریوس به روش آیرودینامیکی»، *مجله مهندسی مکانیک مدرس*، دوره ۱۵، شماره ۵، مرداد ۱۳۹۴.
- [۵] ج، پیرکندی، و ر، حربی منفرد؛ «توربین‌های بادی نوین و نقش آنها در آینده سیستم‌های انرژی»، *مجله علمی ترویجی انجمن مهندسان مکانیک ایران*، دوره ۲۵، شماره ۳، شهریور ۱۳۹۵.
- [۶] ص، فرخی سور کی، م، نیمافر و ر، آزادی؛ «انرژی‌های تجدید پذیر»، کتاب، انتشارات آذرفر، تهران، چاپ اول، سال ۱۳۹۸.
- [7] M. D'Ambrosio, M. Medaglia; "Vertical axis wind turbines: History, technology and applications", M.s thesis, Hogskolan Halmstad, 2010.
- [۸] ز، سفیدگر، ع، اشرفی زاده و ا، عرب کوهسار؛ «توربین بادی مقیاس کوچک جریان متقاطع: مروری بر توسعه فناوری و کاربردها»، فصل نامه انرژی‌های تجدید پذیر و نو، سال نهم، شماره ۲، ۱۴۰۱.
- [9] M. Sabzehparvar; "In-Flight Thrust Measurements of Propeller-Driven Airplanes", *Journal of Aircraft*, Vol. 42, pp. 1543-1547, No. 6, 2005.
- [۱۰] ز، قدیمی، م، طباطبایی، و ا، رسولی، ابوالفضل؛ «طراحی و آنالیز روتور توربین بادی ۲ کیلو وات»، کنفرانس بین المللی سالانه انرژی پاک، شماره ۲، کرمان، ۲۱ و ۲۲ تیرماه ۱۳۹۱.
- [۱۱] س، شکوهی، ش، مرادی کلارده، و ع، مصطفوی؛ «طراحی پره توربین بادی محور افقی با استفاده از تئوری مومنت المان پره»، *همایش انجمن مهندسان مکانیک و صنعت نیروگاه‌های حرارتی*، ۱۴۰۰.
- [12] Michael S. Selig; "Summary of Low-Speed Airfoil Data", *SOARTECH publications*, UIUC, Vol. 5, 1195.
- [۱۳] ن، قهرمان، و ا، قره خانی؛ «بررسی روند تغییرات زمانی سرعت باد در گستره اقلیمی ایران»، *مجله آبیاری و زهکشی ایران*، جلد ۴، بهار ۱۳۸۹.
- [14] "Wind Turbines-Part2: Design Requirements for Small Wind Turbines", *CEI/IEC Std. 61400-2*, 2006.
- [15] www.ryse.energy/20kw-wind-turbines
- [16] ocw.tudelft.nl/wp-content/uploads/Terminology-1.pdf
- [17] Ross. Vennell; "Exceeding the Betz limit with tidal turbines", *Renewable Energy*, Vol. 55, July 2013.
- [۱۸] س، کریمیان علی آبادی، و ز، پیش بین؛ «بهبود ضریب توان در یک توربین بادی مگاواتی بر پایه تعمیم عملکرد سیستم کنترل زاویه‌ی گام»، فصلنامه علمی - پژوهشی علوم و مهندسی هوافضا، جلد ۱۳، بهار ۱۳۹۹.
- [19] E. Branlard, D. Kristian, & Mac Gaunaa; "Vortex methods to answer the need for improved understanding and modelling of tip-loss factors.", *IET Renewable Power Generation*, Vol. 7, No. 4, pp. 311-320, 2013.
- [20] C. N. H. Lock; "A Graphical Method of Calculating the Performance of an Airscrew", *Brit-AeronauticalResearch Council, ARC Rept. and Memoranda 1675*, 1935.

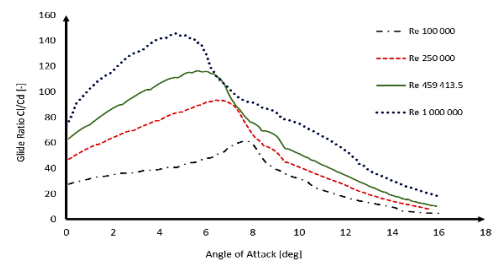
با اعمال تنظیمات در مازول تعریف توربین باد و مازول شبیه سازی و تغییر تعداد پره‌ها می‌توان دنباله و گردابه جریان پشت روتور و تاثیر تعداد پره‌ها بر روی آنها را مشاهده کرد. شکل (۱۷) به عنوان نمونه، دنباله و گردابه جریان پشت روتور توربین بادی ۲ پره را نشان می‌دهد.



شکل ۱۷- دنباله و گردابه جریان برای توربین بادی ۲ پره

۴-۵ تاثیر عدد رینولدز بر عملکرد توربین باد

شکل (۱۸) نشان دهنده‌ی نمودار ضریب برآ به پسا ایرفویل E387(E) نسبت به زوایای حمله، در اعداد رینولدز مختلف می‌باشد.



شکل ۱۸- منحنی ضریب برآ به پسا ایرفویل E387(E) نسبت به زاویه حمله ($Re = 100000$, $Re = 250000$, $Re \approx 460000$ & $Re = 1000000$)

۵- جمع‌بندی و ارائه پیشنهادات

آنچه در این مقاله مورد بررسی قرار گرفت، محاسبه‌ی تراست و راندمان توربین بادی محور افقی ۲۰ کیلو وات با ایرفویل E387(E) و بررسی تأثیر تغییر پارامترهای مختلف بر روی عملکرد آن بود. مقدار زاویه‌ی حمله‌ی طراحی برای ایرفویل‌های CAL40141 و NACA 43012A به ترتیب برابر ۱۰/۳ و ۶/۴ درجه است. با توجه به نمودار ضرایب توان و تراست بر حسب نسبت سرعت نوک پره، می‌توان دریافت که به ترتیب ایرفویل‌های E387(E)، CAL40141 و NACA 43012A مقادیر توان و تراست بیشتری دارند و ایرفویل بهینه، E387(E) می‌باشد. برای حل دقیق‌تر بهتر است که مقادیر ضرایب اتلاف نوک از جداول لاک انتخاب شود. با افزایش تعداد پره‌ها، هدایت آیرودینامیکی بیشتر شده و ملکول‌های کمتری از سطح پره‌ها عبور می‌کنند و گردابه‌ی نوک پره فشرده می‌شود، از طرفی افزایش تعداد پره‌ها روی هاب توربین بادی باعث افزایش سطح مقطع انسداد شده و با افت فشار و دبی همراه است و باعث افزایش نیروی تراست، توان و راندمان می‌شود. برای پژوهش‌های آینده توصیه می‌شود که نمونه‌ی آزمایشگاهی توربین بادی ساخته شود و نتایج تست تجربی با حل عددی Q-Blade مقایسه شوند. همچنین با شبیه سازی پره، هاب در نرم‌افزار فلوئنت، نتایج بدست آمده را با تست تجربی و حل عددی مقایسه شوند. در نهایت سیستم کنترل زاویه انحراف و استال نیز برای توربین طراحی شود.