جلد ۱، شماره ۱، مرداد ۱۴۰۳، صفحه: از ۸ تا ۱۶

مطالعه‌ای روی انرژی باد و مفاهیم مقدماتی توربین‌های بادی

علیرضا محمودی فرد[1*]

[1]کارشناس ارشد مدیریت صنعتی (و مدرس دانشگاه‌ها)، گروه مدیریت صنعتی، دانشکده علوم انسانی، دانشگاه شاهد، تهران، ایران
alireza10.m10@gmail.com

چکیده

مباحث تولید انرژی، مدیریت انرژی و مطالب اقتصادی مربوط به آن‌ها، همواره از اهمیت زیادی برخوردار بوده‌اند. مشخص است کماکان سوختهای فسیلی، بخش اعظمی از انرژی امروزی جهان را تولید می‌کنند. با توجه به آسیب‌های سوخت‌های فسیلی به طبیعت و همچنین محدود بودن و پایان‌پذیر بودن آن‌ها، انسان معقولانه به‌سمت تولید انرژی در حیطه انرژی‌های تجدیدپذیر رفته است؛ یکی از این انرژی‌ها، انرژی باد است. در پایان سال ۲۰۱۹، ظرفیت برق بادی نصب شده در سراسر جهان، ۶۲۳ گیگاوات بود؛ به‌وضوح بشر به این انرژی امید دارد و به آن چشم دوخته است. در این مقاله به مطالعه‌ای در مورد توربین‌های بادی، انواع آن‌ها و مزایا و معایبشان، توربین ساونیوس، پره توربین بادی، آزمایش آن و سایر مباحث مرتبط پرداخته شده است.

واژه‌های کلیدی: اقتصاد، انرژی باد، توربین بادی، انرژی‌های تجدیدپذیر، انرژی‌های نو، پره توربین بادی، مزرعه بادی

۱. مقدمه

منشأ باد، یک موضوع پیچیده است؛ از آنجایی‌که زمین به‌طور نامساوی به‌وسیله نورخورشید گرم می‌شود، بنابراین در قطب‌ها انرژی گرمایی کمتری نسبت به مناطق استوایی وجود دارد؛ همچنین در خشکی‌ها تغییرات دما با سرعت بیشتری انجام می‌پذیرد و بنابراین خشکی‌های زمین نسبت به دریاها زودتر گرم و زودتر سرد می‌شوند؛ این تفاوت دمای جهانی موجب به‌وجود آمدن یک سیستم جهانی تبادل حرارت خواهد شد که از سطح زمین تا هوای کره، که مانند یک سقف مصنوعی عمل می‌کند، ادامه دارد. بیشتر انرژی که در حرکت باد وجود دارد را می‌توان در سطوح بالای جو پیدا کرد؛ جایی‌که سرعت مداوم باد به بیش از ۱۶۰ کیلومتر بر ساعت می‌رسد و سرانجام باد انرژی خود را در اثر اصطکاک با سطح زمین و جو از دست می‌دهد [۱].

امروزه با گسترش روزافزون صنعت، نیاز به استفاده از انرژی به‌طور قابل توجهی افزایش یافته است؛ به‌طور کلی استفاده از انرژی در تمام شئون زندگی انسان‌ها وارد شده و با رشد روز افزون جمعیت و پیشرفت صنعت و زندگی ماشینی، نیاز فزاینده‌ای به منابع مختلف انرژی احساس می‌شود [۲].

از طرفی ذخایر سوخت‌های فسیلی در روی کره زمین، رو به پایان است؛ سوخت‌های فسیلی که بیش از ٪۸۰ انرژی جهان را تامین می‌کنند، طی ۳۰۰ سال اخیر به‌طور روز افزون مورد بهره‌برداری قرار گرفته‌اند؛ علاوه‌بر مشکل کاهش ذخایر، ملاحظات زیست‌محیطی گرم شدن کره زمین و ذوب یخچال‌ها، نازک شدن لایه ازون، بالا آمدن سطح آب دریاها، آلودگی‌ها و ... انسان را برآن داشته که درصدد دست‌یابی به منابع دیگر انرژی باشد. آلودگی‌های زیست‌محیطی و مشکلات اکولوژیکی ناشی از احتراق سوخت‌های فسیلی به‌ویژه نفت و مشتقات آن، نگرانی‌ها را تشدید کرده است. یکی از راه‌های چاره‌اندیشی شده در چند دهه اخیر، استفاده روزافزون از انرژی هسته‌ای برای تولید انرژی است؛ اما انفجار نیروگاه هسته‌ای و حوادث متعاقب آن و همچنین دفن زباله‌های هسته‌ای موجب اعتراض طرفداران محیط زیست شده است. یک روش عملی برای فایق آمدن بر چنین مشکلاتی، استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر از جمله انرژی باد است [۲].

۲. متن بررسی

۱،۲. باد و انرژی آن

باد، عنصری است که با استفاده از آن انرژی پاک تولید می‌شود؛ اما این عنصر در صورتی‌که تغییری در آستانه‌ی سرعت (به‌صورت افزایشی یا کاهشی) و جهت آن صورت بگیرد، یا با عناصر یا پدیده‌های دیگر ترکیب شود، در زمان‌های مختلف، خسارات جانی و مالی به بشر وارد می‌کند [۳].

ایران سرشار از منابع انرژی تجدیدپذیر و تجدیدناپذیر است. موقعیت جغرافیایی کشور ایران موجب شده است که منبع بسیار بزرگی از انرژی‌های خورشیدی و بادی در آن موجود باشد؛ این دو منبع انرژی تجدیدپذیر، رایگان و با محیط زیست سازگار هستند. بررسی آمار ده ساله وزش باد در ایستگاه‌های سینوپت یک کشور ایران نشان داد که بسیاری از نواحی ایران از جمله نواحی ساحلی دریای عمان و جزایر خلیج فارس، نواحی ساحلی استان خوزستان و نواحی شرقی کشور به همراه چند نقطه پراکنده مانند منجیل، رفسنجان، اردبیل و بیجار، بادخیز هستند و در آن‌ها توان تولید برق بادی به‌ویژه در فصل تابستان وجود دارد؛ البته در بسیاری از نقاط دیگر کشور هم در زمان‌های محدودی از سال، توان تولید برق بادی وجود دارد. بر اساس یافته‌های پژوهش‌ها، ایستگاه‌های سینوپت یک از نظر سرعت وزش باد، در چهار گروه مختلف قرار می‌گیرند:

گروه اول، در بیشتر زمان‌های سال توان باد خیزی بالایی دارند؛

گروه دوم، در برخی زمان‌های سال در بخش‌هایی از شبانه‌روز، توان بادخیزی بالایی دارند؛

گروه سوم، در زمان‌های محدودی از سال توان بادخیزی دارند؛
گروه چهارم، نیز در تمام طول سال توان بادخیزی درخور توجه ندارند [۴].
استفاده از انرژی باد از گذشته تا به امروز همواره از اهداف بشر بوده است. با به‌کارگیری و ترکیب علوم مهندسی دریایی، مهندسی مکانیک و مهندسی برق، می‌توان به طراحی و نصب توربین‌های بادی در مناطق دور از ساحل اقدام نمود. امروزه توربین‌های بادی فراساحلی با توجه به ویژگی‌های متمایز و خاص خود و توانایی‌های این‌گونه توربین‌ها در دریافت انرژی باد موجود در دریاها و تبدیل آن به انرژی برق، مورد توجه بسیاری از کشورهای پیشرفته به‌خصوص کشورهایی که دسترسی به دریا را دارند، قرار گرفته است. از این‌رو با توجه به دسترسی کشور به دریاهای عمان، خزر و خلیج فارس و پیشرفت‌هایی چه در زمینه ساخت توربین‌های بادی و چه در زمینه طراحی ساخت و اجرای سازه‌های گوناگون دریایی در کشور صورت گرفته است [۵].
امروزه توربین‌های بادی فراساحلی با توجه به ویژگی‌های متمایز و خاص خود و توانایی‌های این‌گونه توربین‌ها در دریافت انرژی باد موجود در دریاها و تبدیل آن به انرژی برق، مورد توجه بسیاری از کشورهای پیشرفته به‌خصوص کشورهایی که دسترسی به دریا را دارند، قرار گرفته است [۵].
برای مثال، کشور ژاپن که به‌دنبال کاهش وابستگی به نیروگاه‌های هسته‌ای است، برنامه ساخت بزرگ‌ترین مزرعه‌ی بادی دریایی (فراساحلی) جهان را در دستور کار دارد [۵].
پس از فاجعه نیروگاه اتمی فوکوشیما در ماه مارس سال ۲۰۱۱ میلادی، ژاپن به‌دنبال توقف فعالیت ۳۵ نیروگاه هسته‌ای و استفاده حداکثری از انرژی‌های سبز است [۵].
در مزارع باد فراساحلی، محل مصرف نزدیک است و نیازی به ساخت خطوط انتقال نیروی جدید در خشکی نیست؛ از دیگر مزایای توربین‌های بادی فراساحلی نسبت به توربین‌های بادی در خشکی این است که کمتر بر روی دید انسان از چشم‌انداز طبیعت اثر می‌گذارند و همچنین سر و صدای آن‌ها بسیار کمتر است [۶].

۲،۲. مزایایی برای استفاده از انرژی باد

انرژی باد نیز مانند سایر منابع انرژی تجدیدپذیر از ویژگی‌ها و مزایای بالاتری نسبت به سایر منابع انرژی برخوردار است، که اهم این مزایا عبارتند از [۷]:

۱. عدم نیاز توربین‌های بادی به سوخت و در نتیجه کاهش میزان مصرف سوخت‌های فسیلی
۲. رایگان بودن انرژی باد
۳. توانایی تأمین بخشی از تقاضای انرژی برق
۴. کمتر بودن نسبی قیمت انرژی حاصل از باد نسبت به انرژی‌های فسیلی
۵. کمتر بودن هزینه‌های جاری و هزینه‌های سرمایه‌گذاری انرژی باد در بلندمدت
۶. تنوع بخشیدن به منابع انرژی و ایجاد سیستم پایدار انرژی
۷. قدرت مانور زیاد، جهت بهره‌برداری در هر ظرفیت و اندازه (از چند وات تا چندین مگاوات)
۸. عدم نیاز به آب
۹. عدم نیاز به زمین زیاد برای نصب
۱۰. نداشتن آلودگی محیط زیست نسبت به سوخت‌های فسیلی

۳،۲. توربین بادی

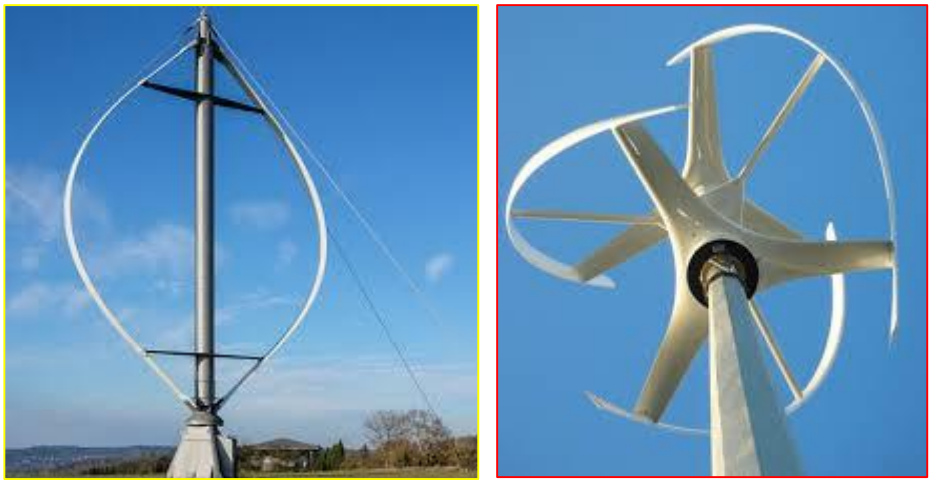
تکنولوژی انرژی بادی در سال‌های اخیر به سرعت رشد کرده است و اروپا در راس این صنعت قرار گرفته است. توربین‌ها در حال ارزان‌تر و قدرتمندتر شدن هستند؛ با طول پره بیشتر که قادر است از مقدار باد زیادتری استفاده کند و بنابراین الکتریسیته بیشتری تولید می‌نماید و هزینه تولید برق از منابع غیرقابل تجدید را کاهش دهد [۷].

توربین‌های بادی با استفاده از نیروی طبیعی باد برای به حرکت درآوردن ژنراتور، الکتریسیته تولید می‌کنند. باد یک منبع سوخت پاک و پایدار است که مواد دفعی ندارد و هرگز تمام نخواهد شد چون دائما توسط انرژی خورشید تجدید می‌شود. از بسیاری جهات توربین‌های بادی تکامل طبیعی آسیاب‌های بادی سنتی هستند؛ اما اکنون معمولا سه پره دارند که حول یک حلقه مرکزی افقی می‌چرخند که به نیروی الکترونیکی واقع در موتورخانه که در نوک برج فولادی قرار دارد، اتصال دارند. بیشتر توربین‌های بادی، زمانی که سرعت باد حدود ۳،۴ متر بر ثانیه است، شروع به تولید برق می‌نمایند و حداکثر مجاز برق را در حدود ۱۵ متر بر ثانیه تولید می‌کنند و برای جلوگیری از خسارات حاصل از طوفان در ۲۵ متر بر ثانیه و یا بیشتر، متوقف شده و از کار می‌ایستند [۵].

۴،۲. تقسیم‌بندی توربین‌های بادی از نظر استقرار

۱،۴،۲. توربین‌های بادی با محور چرخش عمودی

این توربین‌ها از دو بخش اصلی تشکیل شده‌اند؛ یک میله اصلی که رو به باد قرار می‌گیرد و میله‌های عمودی دیگر که عمود بر جهت باد کار گذاشته می‌شوند. این توربین‌ها شامل قطعاتی با اشکال گوناگون بوده که باد را در خود جمع کرده و باعث چرخش محور اصلی می‌گردند. ساخت این توربین‌ها بسیار ساده بوده، ولی بازده پایینی دارند. در این توربین‌ها در یک طرف توربین، باد بیشتر از طرف دیگر جذب می‌شود و باعث می‌گردد سیستم لنگر پیدا کرده و بچرخد. یکی دیگر از مزایای این سیستم، وابسته نبودن به جهت وزش باد می‌باشد. در شکل ۱، تصاویری از توربین بادی محور عمودی، آمده است.



شکل ۱: توربین بادی محور عمودی

۲،۴،۲. توربین‌های بادی با محور چرخش افقی

این توربین‌ها نسبت به مدل عمودی رایج‌تر بوده، همچنین از لحاظ تکنولوژی، پیچیده‌تر و گران‌تر نیز می‌باشند. ساخت آن‌ها مشکل‌تر از نوع محور عمودی بوده، ولی راندمان بسیار بالایی دارند. در سرعت‌های پایین نیز توانایی تولید انرژی الکتریکی را داشته و توانایی تنظیم جهت در مسیر وزش باد را دارند. این توربین‌ها سه یا در مواردی دو پره می‌باشند، که روی یک برج بلند نصب می‌شوند؛ این پره‌ها همواره در جهت وزش باد قرار می‌گیرند.

توربین‌های محور افقی معمولا از نظر سرعت، به دو دسته‌ی کم سرعت و پرسرعت تقسیم می‌شوند. مهم‌ترین عامل در تعیین سرعت

توربین‌های بادی محور افقی، تعداد پره‌ها می‌باشد؛ هر چه تعداد پره‌ها بیشتر باشد، سرعت کمتر است و گشتاور بیشتری تولید می‌کند. پرطرفدارترین نوع این توربین‌ها، سه پره می‌باشد، چرا که در انواع با پره‌های بیشتر، به‌دلیل پیچیدگی شکل توپی توربین، صرفه اقتصادی ندارند [۸]. در شکل ۲، تصاویری از توربین بادی محور افقی، آمده است.

شکل ۲: توربین بادی محور افقی

۵,۲. بررسی اجمالی تفاوت‌های انواع توربین‌های بادی از نظر استقرار

تفاوت‌های توربین‌های محور افقی و محور عمودی در جدول ۱ ارائه شده است.

جدول ۱: تفاوت‌های توربین‌های محور افقی و محور عمودی [۹]

نوع توربین	نکات مثبت	نکات منفی
توربین‌های محور افق	راندمان بالا سرعت شروع پایین هزینه تولید پایین	نیازمند جریان آرام نیازمند مکانیزم چرخش یا یاو
توربین‌های محور عمودی	کار در جریان‌های باد متلاطم پتانسیل بالا برای پیشرفت	راندمان کمتر سرعت شروع بالا هزینه تولید زیاد

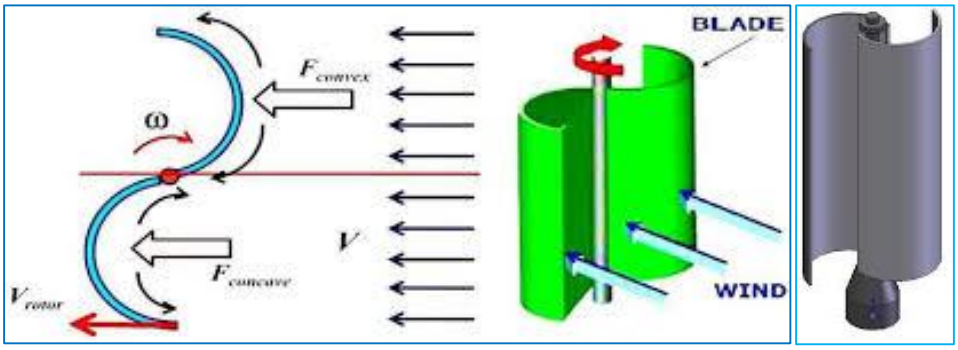
۶,۲. انواع توربین‌های بادی محور عمودی

مجموعه توربین‌های محور عمودی، خود به دو دسته داریوس که کارکرد ان به نیرو استوار است و ساونیوس که کارکرد آن به‌ویژه در اغاز حرکت مبتنی‌بر نیرو پسا است، تقسیم می‌شود. توربین ساونیوس، بازده کمتری دارد، ولی دارای مزایایی از جمله طراحی ساده، ساخت ارزان، سرعت کارکرد نسبتا پایین و گشتاور راه‌اندازی اندک نسبت به داریوس است. گشتاور منفی زیاد و ضریب توان پایین، باعث شده تحقیقات زیادی رروی این توربین صورت گیرد تا بازده آن افزایش یابد. تحلیل نسبت منظری، بررسی اثر تعداد پره‌ها، تغییر در شکل پره، چند طبقه‌ای کردن و افزودن دیواره، از جمله‌ی این تلاش‌ها بوده است [۱۰].

- اصول کارکرد توربین ساونیوس

توربین ساونیوس در سال ۱۹۳۱ میلادی توسط معمار و مخترع فنلاندی زیگورد یوهانس ساونیوس ابداع شد. این توربین در ساده‌ترین شکل خود از دو نیم استوانه تشکیل شده است که در مخالف جهت هم با یک شفت به هم متصل شده‌اند، به‌طوری‌که اگر از بالا به

آن نگاه کنیم، شکلی شبیه حرف اس انگلیسی خواهیم دید و به همین دلیل به آن روتور اس نیز گفته می‌شود؛ به هر یک از این نیم‌استوانه‌ها یک پره گفته می‌شود [۱۰]. در شکل ۳، طرح‌واره‌ی توربین بادی ساونیوس ارائه شده است.



شکل ۳: طرح‌واره‌ی توربین بادی ساونیوس [۱۰]

همان‌طور که در شکل ۳ ملاحظه می‌شود، پره‌ی پایینی در جهت باد مقعر است و بخشی از باد وارد آن شده و نیروی پسا ایجاد می‌کند؛ به این پره، پره‌ی پس رونده گفته می‌شود؛ چون نیروی پسای حاصل آن را دور می‌کند؛ پره‌ی بالایی که بخش محدب آن رو به جریان باد است و در حال نزدیک شدن است، پره‌ی بازگشتی نامیده می‌شود؛ چون سطح مقابلِ جریان پره‌ی بازگشتی کمتر از پره‌ی پس رونده است، نیروی پسای پایینی، بیشتر از بالایی است [۱۰].

۷,۲. آزمایش پره‌های توربین بادی

پره یکی از مهم‌ترین اجزای توربین بادی است که خرابی آن می‌تواند سبب تخریب کل توربین بادی و حتی محیط اطراف آن گردد [۱۱]؛ لذا امروزه آزمون‌های پره کامل برای اطمینان از توانایی آن در تحمل بارهای ثابت و نوسانی وارده در طول مدت عمر توربین بادی، لازم است؛ این آزمون قابلیت اطمینان لازم را برای سازنده و طراحان توربین تضمین می‌کند.

پره‌های توربین بادی در طول عمر خود در معرض بارهای نوسانی با تعداد بارهای فروان قرار می‌گیرد. تعداد سیکل بارگذاری برای یک پره توربین بادی در طول مدت ۲۰ سال طول عمر آن حدود 10^8 تا 10^9 است [۱۱]؛ به خرابی این پره در اثر این بارهای نوسانی، خرابی خستگی یا شکست خستگی گفته می‌شود. به مدت‌زمان یا تعداد سیکل بار نوسانی نیز عمر خستگی اطلاق می‌شود.

تحلیل فرآیند خستگی و محاسبه عمر نمونه بسیار پیچیده است و مدل‌های ریاضی ارائه شده در این زمینه باید با نتایج آزمون‌های عملی مطابق با استانداردهای معتبر تایید شود [۱۲،۱۳].

روش‌های مختلفی در زمینه تخمین عمر پره توربین بادی بیان گردیده که رایج‌ترین آن‌ها استفاده از رابطه ماینر و استحکام باقی‌مانده است [۱۱،۱۴].

برای محاسبه طول عمر پره باید خواص خستگی مواد کامپوزیتی به‌کار رفته، تاریخچه بارهای وارد شده به پره و نحوه توزیع تنش و کنش در نقاط مختلف پره مشخص باشد؛ تاریخچه بارگذاری با استفاده از شبیه‌سازی رفتار توبین بادی محاسبه می‌شود [۱۵،۱۶].

آزمون خستگی پره بر اساس بار معادل انجام و در طول مدت چند هفته‌ای اجرا می‌شود [۱۱].

دستگاه آزمون پره توربین بادی کوچک طراحی شده، توانایی انجام انواع آزمون‌های استاتیکی و خستگی را دارد [۱۱]؛ توربین بادی را مطابق استاندارد IEC61400-23 طراحی می‌کنند.

مهم‌ترین قابلیت این دستگاه در مقایسه با سایر نمونه‌های طراحی شده، انجام آزمون‌های استاتیکی و خستگی با یک عملگر و امکان تنظیم میانگین و دامنه نیرو در طول انجام آزمون خستگی است [۱۷].

۸,۲. تست عملکرد توان توربین بادی

هدف از انجام این تست، تعیین مشخصات عملکردی توربین‌های بادی می‌باشد بدین‌منظور از استاندارد IEC61400-12 استفاده می‌شود [۱۸]؛ این استاندارد شامل پروسه ارزیابی مشخصات عملکردی سیستم‌های مولد توربین بادی تک و به‌کارگیری آن برای تست کلیه توربین‌های بادی از هر نوع و با هر سایز که به شبکه متصل می‌شوند، می‌باشد [۱۸].

در این تست، مشخصات عملکردی توان به‌وسیله منحنی توان و میزان انرژی تولیدی سالیانه تعیین می‌شود. منحنی توان از طریق اندازه‌گیری همزمان سرعت باد و توان خروجی در سایت تست، طی یک دوره معین تعیین می‌گردد. مدت دوره اندازه‌گیری باید به‌گونه‌ای باشد که محدوده معینی از سرعت باد و شرایط مختلف باد را در برگیرد [۱۸].

میزان انرژی تولیدی سالیانه با استفاده از منحنی توان اندازه‌گیری شده بر حسب توزیع فرکانسی سرعت باد مرجع و با فرض در دسترس بودن ٪۱۰۰ توربین بادی قابل محاسبه می‌باشد [۱۸].

۹,۲. تست اندازه‌گیری بارهای مکانیکی

به‌منظور انجام تست تعیین بارهای مکانیکی توربین بادی به‌ویژه توربین‌های ویژه توربین‌های بزرگ محور افقی که برای تولید جریان الکتریسیته به‌کار برده می‌شود، از استاندارد IEC61400-13 استفاده می‌گردد؛ البته روش‌های مذکور برای سایر توربین‌های بادی نیز قابل استفاده می‌باشند [۱۹].

هدف این تست ارائه متدولوژی و تکنیک های مرتبط با آن برای تعیین تجربی بار های مکانیکی وارده بر توربین بادی می باشد. از این معیارهای مکانیکی به‌عنوان راهنمایی جهت انجام اعتباردهی و یا محاسبات مستقیم بارهای سازه‌ای استفاده می‌شود [۱۹].

۱۰,۲. تست اندازه‌گیری انتشارات صوتی توربین بادی

از استاندارد IEC 61400-11 به‌منظور انجام تست نویز توربین‌های بادی استفاده می‌شود. نویز ایجاد شده توسط توربین‌های بادی منشأ مکانیکی و آیرودینامیکی دارد. در اغلب موارد نویزهای مکانیکی از ماشین‌های دوار در ناسل به‌ویژه گیربکس و ژنراتر و از قسمت‌هایی مانند فن‌های خنک‌کننده، تجهیزات کمکی مانند موتورها و کمپرسورها و سیستم یاو تولید می‌شود [۲۰].

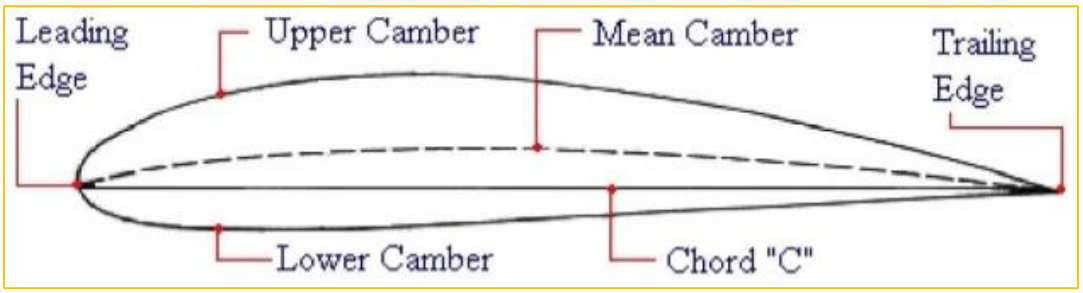
از تکنیک‌های کاهش نویز مکانیکی در توربین‌های بادی می‌توان به طراحی دقیق و ماشین‌کاری گیربکس، استفاده از قرارگاه‌ها وکوپلینگ‌های ضد ارتعاشی به‌منظور محدود نمودن نویزهای سازه‌ای، استفاده از دمپرهای آکوستیکی در ناسل و خنک‌کاری ژنراتور با آب اشاره نمود [۲۰].

۱۱,۲. ایرفویل

توربین‌های بادی، از مقاطعی به‌نام ایرفویل ساخته می‌شوند. ایرفویل‌ها بر اساس ضخامت و انحنای آن‌ها در دسته‌هایی طبقه‌بندی می‌شوند که به آن‌ها سری‌های ایرفویل یا خانواده‌های ایرفویل می‌گویند. یکی از معروف‌ترین استانداردهای ایرفویل، مربوط به ایرفویل‌هایی موسوم به NACA است که این استاندارد ایرفویل، دارای سری‌های متفاوتی است. برای مثال در سری چهار رقمی، رقم اول نشان‌دهنده‌ی بیشترین خمیدگی بر حسب صدم وتر، دومین رقم، فاصله نقطه بیشترین خمیدگی از لبه حمله بر حسب دهم وتر و دو رقم آخر، بیشترین ضخامت بر حسب صدم وتر را بیان می‌کند [۲۱].

قسمت جلویی ایرفویل، لبه حمله نامیده می‌شود و اولین محل تماس با هوا است. قسمت انتهایی، لبه فرار نامیده می‌شود و در این محل هوای قسمت بالایی و قسمت پایینی به یکدیگر می‌رسند. خط وتر، خط مستقیمی است که لبه‌ی حمله را به لبه فرار وصل

می‌کند؛ روی آن انحنای بالا و زیر آن، انحنای زیرین نامیده می‌شود. در بسیاری از موارد ابعاد موردنظر ایرفویل بر اساس طول وتر تعیین می‌گردند؛ برای مثال ضخامت یک ایرفویل معمولا با بیشینه درصد ضخامتیک ایرفویل نسبت به طول وتر بیان می‌شود [۲۱]. در شکل ۴، سطح مقطع یک ایرفویل آمده است.



شکل ۴: سطح مقطع یک ایرفویل [۲۱]

به‌منظور طراحی پره و پیش‌بینی عملکرد پره توربین بادی محور افقی، تئوری‌های متعددی توسعه یافته‌اند که مهم‌ترین آن‌ها تئوری مومنتوم پره، تئوری المان پره و تئوری المان مومنتوم پره هستند. تئوری المان مونتوم پره با ترکیب دو تئوری نخست، یک روش مناسب، سریع و کارآمد برای طراحی پره ارائه می‌کند، به‌صورتی‌که با ارایه فرضیات اولیه‌ی شرایط توربین مانند سرعت باد و تعداد پره توربین، می‌توان به توزیع پارامترهای مختلف طراحی پره مانند توزیع وتر و زاویه نسبی باد دست یافت [۲۱].

۳. نتیجه‌گیری

بحث انرژی و کلیه‌ی مباحث مربوط به آن، در گذشته و در این روزگار، همواره مهم بوده و محققان زیادی لاجرم به آن پرداخته‌اند؛ مباحث تولید انرژی، مدیریت انرژی و مطالب اقتصادی مربوط به آن‌ها، همواره از اهمیت زیادی برخوردار بوده‌اند. مشخص است کماکان سوختهای فسیلی، بخش اعظمی از انرژی امروزی جهان را تولید می‌کنند. با توجه به آسیب‌های سوخت‌های فسیلی به طبیعت و همچنین محدود بودن و پایان‌پذیر بودن آن‌ها، انسان معقولانه به‌سمت تولید انرژی در حیطه انرژی‌های تجدیدپذیر رفته است؛ یکی از این انرژی‌ها، انرژی باد است. در پایان سال ۲۰۱۹، ظرفیت برق بادی نصب شده در سراسر جهان، ۶۲۳ گیگاوات بود؛ به‌وضوح بشر به این انرژی امید دارد و به آن چشم دوخته است. در این مقاله به مطالعه‌ای در مورد توربین‌های بادی، انواع آن‌ها و مزایا و معایبشان، توربین ساونیوس، پره توربین بادی، آزمایش آن و سایر مباحث مرتبط پرداخته شد.

مراجع

[۱] صفحه مربوط به باد در ویکی‌پدیا
[۲] عبدلی، حبیب، ساری صراف، بهروز و حسینی شمع چی، عباس. (۱۳۸۸). امکان‌سنجی پتانسیل انرژی باد و کاربرد آن در طرح‌های توسعه صنتی دانشگاه آزاد اسلامی واحد اهر، مجله علمی-پژوهشی فضای جغرافیایی.
[۳] عساکره، حسین، بیرانوند، آذر و دوستکامیان، سیدمهدی. (۱۳۹۷). ارزیابی انرژی باد در ایستگاه سینوپتیک اردبیل. برنامه‌ریزی فضایی.
[۴] گندمکار امیر. (۱۳۸۸). ارزیابی انرژی پتانسیل باد در کشور ایران جغرافیا و برنامه‌ریزی محیطی (مجله پژوهشی علوم انسانی دانشگاه اصفهان).
[۵] رزاقی کلجاهی. امین و محمدعلی لطف اللهی یقین. (۱۳۹۲). بررسی و ارزیابی امکان استفاده از گزینه‌های مختلف توربین‌های بادی فراساحلی با توجه به شرایط محیطی و ژئوتکنیکی سواحل و دریاهای ایران، اولین همایش ملی انرژی‌های نو و پاک، همدان، شرکت هم‌اندیشان محیط زیست فردا.

[۶] وسفی، آرش. (۱۳۹۴). پتانسیل انرژی باد در ایران و دنیا و استفاده از انرژی‌های تجدیدپذیر در دنیا، دومین کنفرانس ملی انرژی و توسعه پایدار، تاکستان، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تاکستان.

[۷] آقامیری، سیدرضا و قدمی، فرید. (۱۳۹۵). بررسی توربین‌های بادی و توربین‌های بادی فراساحلی, مزایا و محدودیت‌ها. همایش ملی فناوری در مهندسی کاربردی باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان.

[۸] شمس‌آبادی، حسینعلی، رزداری، آیت محمد، کیانی، حسن و رزداری، ولی محمد. (۱۳۹۲). کاربرد توربین‌های بادی در مناطق بادخیز کشور، همایش ملی بیوانرژی ایران.

[۹] علی زاده، جواد و قهرایی، امید. (۱۳۹۶). بررسی عددی اثر شکل کانال در توربین بادی بر ضریب توان توربین. همایش ملی پژوهش‌های نوین در علوم و فناوری.

[۱۰] زهیر صبوحی، مسعود امین، هاشی مهنه، حامد، قائمی اسگویی، کامبیز. (۱۴۰۱). بررسی عوامل موثر بر عملکرد توربین بادی ساونیوس، فصلنامه علمی انرژی‌هایت تجدیدپذیر و نو.

[11] GREAVES, PETER, Robert (2013) Fatigue Analysis and Testing of Wind Turbine Blades, Durham thesis, Durham Universit

[۱۲] نادری، رضا و خادم الرسول، عبدالغفور. (۱۳۹۰). مدلسازی خودکار رشد ترک در مود مرکب و رشد ترک خستگی بدون مش‌بندی مجدد. مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها.

[۱۳] ملک زاده، امیر، فرهنگ دوست سید حدیدی مود، خلیل. (۱۳۹۲). بررسی اثر بارگذاری ضربه در فرایند رشد ترک در فولاد فورج، مجله مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها.

[14] R. P. L. Nijssen (2007) Fatigue life prediction and strength degradation of wind turbine rotor blade, Sandia National Laboratory report: SAND2006-7810P

[15] Van Buren, K. L., Mollineaux, M. G., Hemez, F. M. and Atamturktur, S. (2013) Simulating the dynamics of wind turbine blades: part II, model validation and uncertainty quantification. Wind Energy

[16] Fleming, I. and Luscher, D.J. (2013) A model for the structural dynamic response of the CX-100 wind turbine blade. Wind Energy

[۱۷] حسن قرئی خلیل ابادی، سعید و متکعلف ایمانی، بهنام. (۱۳۹۴). کنترل مقاومت و تصلیغ دستگاه آزمایش پره، مجله علمی پژوهشی مکانیک سازه‌ها و شاره‌ها.

[18] IEC 61400-12, "Wind Turbine Power Performance Testing", First Edition, 1998-02.

[19] IEC 61400-13, "Wind Turbine Measurement of Mechanical Loads", First Edition, 2001-06.

[20] IEC 61400-11, "Wind Turbine Generator Systems, Acoustic Noise Measurement Techniques", Second Edition, 2002-12.

[۲۱] محمدی، علیرضا، فراهت، سعید، محمدی، مونا و محمدی، محمدرضا. (۱۳۹۳). بررسی تاثیر کاربرد ایرفویل‌های گوناگون در توان خروجی پره توربین بادی محور افقی. کنفرانس بین‌المللی رویکردهای نوین در نگهداشت انرژی.