

بِسْمِ اللَّهِ الرَّحْمَنِ الرَّحِيمِ



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی
دانشکده مهندسی مکانیک

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد

بررسی عددی کارایی توربین بادی محور عمودی برای مقیاس کوچک

نگارنده

علی اسفندیاری

استاد راهنما

دکتر مجید بازارگان

زمستان ۱۳۹۱



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

تاییدیه هیات داوران

هیات داوران پس از مطالعه پایان نامه و شرکت در جلسه دفاع از پایان نامه تهیه شده تحت عنوان:

بررسی عددی کارایی توربین بادی محور عمودی برای مقیاس کوچک

توسط علی اسفندیاری، صحت و کفایت تحقیق انجام شده را برای اخذ درجه کارشناسی ارشد رشته مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی در تاریخ ۱۳۹۱/۱۱/۳۰ مورد تایید قرار می دهند.

۱- استاد راهنما آقای دکتر مجید بازارگان امضا

۲- ممتحن داخلی آقای دکتر محمدحسین حامدی امضا

۳- ممتحن داخلی آقای دکتر مهرزاد شمس امضا

۴- نماینده تحصیلات تکمیلی دانشکده آقای دکتر محمدحسین حامدی امضا



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

اظهارنامه دانشجوی

اینجانب علی اسفندیاری دانشجوی دوره کارشناسی ارشد مهندسی مکانیک گرایش تبدیل انرژی دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی گواهی می‌نمایم که تحقیقات ارائه شده در پایان‌نامه با عنوان

بررسی عددی کارایی توربین بادی محور عمودی برای مقیاس کوچک

با راهنمایی استاد محترم جناب آقای دکتر مجید بازارگان، توسط اینجانب انجام شده و صحت و اصالت مطالب نگارش شده مورد تایید می‌باشد، و در موارد استفاده از کار دیگر محققان به مرجع مورد استفاده اشاره شده است. به‌علاوه گواهی می‌نمایم که مطالب مندرج در پایان‌نامه تاکنون برای دریافت هیچ نوع مدرک یا امتیازی توسط اینجانب یا هیچ فرد دیگری در هیچ‌جا ارائه نشده است و در تدوین متن پایان‌نامه چارچوب (فرمت) مصوب دانشگاه را به‌طور کامل رعایت شده است.

علی اسفندیاری

۱۳۹۱/۱۱/۳۰



دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

حق طبع و نشر و مالکیت نتایج

۱- حق چاپ و تکثیر این پایان نامه متعلق به نویسنده آن می باشد. هرگونه کپی برداری به صورت کل پایان نامه و یا بخشی از آن تنها با موافقت نویسنده یا کتابخانه دانشکده مهندسی مکانیک دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی مجاز می باشد.

ضمناً متن این صفحه نیز باید در نسخه تکثیر شده موجود باشد.

۲- کلیه حقوق معنوی این اثر متعلق به دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی می باشد و بدون اجازه کتبی دانشگاه به شخص ثالث قابل واگذاری نیست.

همچنین استفاده از اطلاعات و نتایج موجود در پایان نامه بدون ذکر مراجع مجاز نمی باشد.

تقدیم:

خدای رابس سناگرم که از روی کرم، پدر و مادری فدکار نسیم ساخت تا در سایه درخت پربار وجودشان بیاسیم و از ریشه آن هاشخ و برگ کیرم و در سایه وجودشان در راه کسب علم و دانش تلاش نمایم. والدینی که بودشان تاج افتخاری است بر سرم و نشان دلیلی است بر بودنم، چرا که این دو وجود، پس از پروردگار، مایه هستی ام بوده اند؛ دستم را گرفتند و راه رفتن را در این وادی زندگی پر از فراز و نشیب آموختندم. آموزگاری که برایم زندگی و انسان بودن را معنا کردند.

این پایان نامه را ضمن تشکر و سپاس سیکران، در کمال افتخار و امتنان تقدیم می نمایم

به مهربان فرشتگانی که خطه های ناب باور بودن، لذت و غرور دانستن، جسارت خواستن، عظمت رسیدن و تمام تجربه های یکتا و زیبای زندگی ام، مدیون حضور سبز آن هاست.

تقدیم به خانواده عزیزم.

تشکر و قدردانی:

پاس خدای را که سخوران، دستودن او بمانند

و شمارندگان، شمردن نعمت های او بدانند

و کوشندگان، حق او را گزاردن بتوانند.

بی شک جایگاه و منزلت معلم، برتر از آن است که در مقام قدردانی از زحمات بی شائبه او، با زبان قاصر و دست ناتوان، چیزی بنگارم. اما از آنجایی که تجلیل از معلم، پاس از انسانی است که هدف و غایت آفرینش را تائین می کند:

از استاد با کمالت و شایسته، جناب آقای دکتر بازرگان که در کمال سع صدر و با حسن خلق و فروتنی، زحمت راهمایی این رساله را بر عهده گرفتند و از بیچ گلی در این عرصه بر من دریغ ننمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم و خداوند بزرگ را شاکرم که افتخار نگاردی ایشان را نصیبم نمود.

از اساتید فرزانه و دلسوز، جناب آقایان دکتر جلدی و دکتر شمس که زحمت داوری این رساله را متقبل شدند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

از آقایان آذرباو تفنک ساز، مسئولین سایت محاسبات سریع دانشگاه خواجه نصیرالدین طوسی، کمال تشکر را دارم که در مدت انجام این

رساله در کمال سع صدر با اینجانب همکاری نمودند.

از دوستان گرانقدر آقایان رضوی، امینی، جلیل پور، محمد حسینیان، نظری، آزادی، کبوتری، درستی، جاویدی، محرابی، صحت پور و مرشد که در

انجام این رساله بهواره مایه دلگرمی اینجانب بوده و در این راه از بیچ گلی دریغ ننمودند، کمال تشکر و قدردانی را دارم.

امید است که این خردترین توانسته باشد بخشی هر چند اندک، از زحمات این عزیزان را پاس گوید.

چکیده

در سال‌های اخیر استفاده از انرژی باد به دلیل دسترسی بالا و انتشار آلاینده اندک، رشد چشمگیری داشته است. از میان انواع توربین‌های بادی، توربین‌های محور عمودی به دلیل برخورداری از مزایایی همچون عدم وابستگی به جهت وزش باد، سادگی ساخت و حساسیت کمتر به آشفتگی جریان توجه خاصی را به خود معطوف ساخته‌اند. عملکرد این توربین‌ها همچنان با مشکلاتی از جمله تولید گشتاور نوسانی و راندمان کمتر نسبت به توربین‌های مرسوم مواجه می‌باشد. در این پژوهش یک توربین بادی محور عمودی با ابعاد آزمایشگاهی از میان پژوهش‌های پیشین انتخاب گردیده و کارایی آن با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی به صورت سه بعدی مورد بررسی قرار گرفته است. به منظور بهبود کارایی این توربین، اثر چند پارامتر هندسی حاکم از جمله میزان پیچش پره‌ها به دور روتور، محل اتصال پره به بازوهای نگهدارنده و گام اولیه پره‌ها مورد بررسی قرار گرفته است. نتایج حاصل نشان داده است که انتخاب گام اولیه و محل اتصال مناسب پره می‌تواند بیشینه ضریب عملکرد توربین مورد بررسی را تا ۶۰ درصد افزایش دهد. همچنین نشان داده شده که استفاده از پره‌های با پیچش مناسب، ضمن افزایش ۴۵ درصدی ضریب عملکرد، حدود ۶۵ درصد از دامنه نوسانات گشتاور تولیدی توربین را کاهش می‌دهد.

کلمات کلیدی: انرژی بادی، توربین بادی محور عمودی، شبیه‌سازی سه بعدی

فهرست مطالب

۱	فصل ۱
۱	دبیاچه
۱	۱-۱. صنعت باد در جهان
۴	۲-۱. صنعت باد در ایران
۵	۳-۱. توربین‌های بادی
۵	۱-۳-۱. ابزارهای بادی اولیه
۷	۲-۳-۱. توربین بادی امروزی
۱۱	۴-۱. مقایسه انواع توربین‌های بادی
۱۲	۵-۱. پژوهش حاضر
۱۴	فصل ۲
۱۴	پیشینه پژوهش
۱۵	۱-۲. انواع مدل‌های عددی
۱۵	۱-۱-۲. مدل مومنتوم
۱۷	۲-۱-۲. مدل روش گردابه
۱۸	۳-۱-۲. روش دینامیک سیالات محاسباتی
۱۹	۲-۲. مطالعات انجام شده
۲۵	فصل ۳
۲۵	شبیه‌سازی توربین محور عمودی
۲۶	۱-۳. مشخصات مدل
۲۸	۲-۳. آیرودینامیک حاکم
۳۲	۳-۳. معادلات حاکم بر جریان
۳۴	۴-۳. مدل آشفتگی
۳۷	۵-۳. مدل‌سازی توربین
۳۷	۱-۵-۳. میدان حل
۳۸	۲-۵-۳. گسسته‌سازی میدان حل
۴۰	۳-۶-۳. شبیه‌سازی جریان
۴۰	۱-۶-۳. روش حجم محدود
۴۱	۲-۶-۳. گسسته‌سازی معادلات حاکم
۴۳	۳-۶-۳. شرایط مرزی

۴۴	..... ۴-۶-۳. حلگر فشارمبنا
۴۵	..... ۵-۶-۳. الگوریتم حل سیمپل
۴۶	..... ۷-۳. محاسبه گشتاور تولیدی توربین
۴۷	..... ۲-۷-۳. پارامترهای حاکم
۵۰	..... ۸-۳. استقلال نتایج عددی از شرایط حل
۵۰	..... ۱-۸-۳. استقلال نتایج از اندازه شبکه
۵۲	..... ۲-۸-۳. استقلال حل از گام زمانی
۵۴	..... ۳-۸-۳. استقلال حل از تعداد دوران روتور
۵۵	..... ۹-۳. اعتبارسنجی نتایج

۵۷ فصل ۴

۵۷ نتایج شبیه‌سازی

۵۸	..... ۱-۴. بررسی کارکرد روتور در یک دوران
۵۸	..... ۱-۱-۴. الگوی جریان در مقاطع مختلف روتور
۶۱	..... ۲-۱-۴. الگوی جریان در موقعیت‌های مختلف روتور
۶۳	..... ۳-۱-۴. نیروهای وارد بر پره
۶۵	..... ۴-۱-۴. گشتاور تولیدی پره و روتور
۶۹	..... ۲-۴. بررسی اثر نسبت سرعت لبه
۷۲	..... ۳-۴. بررسی اثر محل اتصال پره
۷۸	..... ۴-۴. بررسی اثر گام اولیه پره
۸۳	..... ۵-۴. بررسی اثر نسبت صلبیت
۸۶	..... ۶-۴. بررسی پیچش پره حول روتور

۹۱ فصل ۵

۹۱ نتیجه‌گیری و پیشنهادها

۹۲	..... ۱-۵. نتیجه‌گیری
۹۳	..... ۲-۵. پیشنهادها

۹۴ پیوست

۹۵ مراجع

فهرست شکل‌ها

- شکل ۱-۱. نمودار میزان مصرف سالیانه توان الکتریکی جهان در سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۱ بر حسب تراوات ساعت ۱
- شکل ۱-۲. ظرفیت بادی نصب شده جهان طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۱ بر حسب مگاوات ۲
- شکل ۱-۳. سهم ۱۰ کشور برتر در ظرفیت توان بادی نصب شده بر حسب مگاوات در پایان سال ۲۰۱۱ میلادی ۳
- شکل ۱-۴. نمودار ظرفیت توان بادی نصب شده در ایران بر حسب مگاوات طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۸ ۴
- شکل ۱-۵. توربین هالادای که به منظور پر کردن مخازن آب راه‌آهن استفاده می‌گردید ۶
- شکل ۱-۶. توربین بادی آزمایشی پل لاکور به منظور تولید برق در سال ۱۸۹۱ ۶
- شکل ۱-۷. شماتیکی از دو نوع مختلف توربین بادی، (الف) توربین بادی محور افقی، (ب) توربین بادی محور عمودی ۷
- شکل ۱-۸. شماتیکی از توربین بادی محور عمودی مبتنی بر نیروی پسا و نحوه عملکرد آن ۸
- شکل ۱-۹. نمایی از اولین توربین‌های بادی محور عمودی مبتنی بر نیروی برآ ۹
- شکل ۱-۱۰. چند نمونه از روتور توربین‌های بادی محور عمودی امروزی مبتنی بر نیروی پسا ۱۰
- شکل ۱-۱۱. چند نمونه از روتور توربین‌های بادی محور عمودی امروزی مبتنی بر نیروی برآ ۱۰
- شکل ۱-۱۲. نمونه‌ای از روتور توربین بادی محور عمودی ترکیبی ۱۰
- شکل ۱-۱۷. شماتیکی از مدل‌های مومنتوم، (الف) تک لوله جریانی، (ب) چند لوله جریانی، (ج) چند لوله جریانی دوگانه ۱۷
- شکل ۲-۲. شماتیکی از گردابه‌های مورد استفاده در مدل‌سازی روتور در مدل روش گردابه ۱۸
- شکل ۳-۱. شماتیکی از روتور توربین محور عمودی با پره مستقیم ۲۶
- شکل ۳-۲. شماتیکی از جریان گذرنده از روتور و نواحی تشکیل دهنده روتور ۲۸
- شکل ۳-۳. شماتیکی از نیروهای وارد بر پره روتور در ۴ موقعیت مختلف پره ۲۹
- شکل ۳-۴. نمودار تغییرات زاویه حمله بر حسب زاویه موقعیت پره در نسبت سرعت‌های مختلف ۳۰
- شکل ۳-۵. مراحل پیدایش استال دینامیکی روی ایرفویل و نحوه تغییرات نیروهای آیرودینامیکی وارد بر پره در طی آن ۳۱
- شکل ۳-۶. شکل‌گیری گردابه‌ها روی پره روتور، (الف) گردابه شکل گرفته از نوک پره، (ب) گردابه شکل گرفته از انتهای پره ۳۲
- شکل ۳-۷. نمایی از میدان حل و شرط‌های مرزی در سطوح، (الف) ناحیه ساکن، (ب) ناحیه دوار ۳۸
- شکل ۳-۸. نمایی از شبکه‌بندی مورد استفاده در گسسته‌سازی فضای حل روی سطح تقارن تونل باد ۳۹
- شکل ۳-۹. نمایی از شبکه مورد استفاده بر روی یک پره ۴۰
- شکل ۳-۱۰. فلوجارت حل در حلگر فشارمبنای غیروابسته ۴۵
- شکل ۳-۱۱. بررسی استقلال از شبکه با مقایسه ضریب گشتاور پره مرجع در سه شبکه مختلف ۵۱
- شکل ۳-۱۲. بررسی استقلال از شبکه با مقایسه ضریب گشتاور کل روتور در سه شبکه مختلف ۵۱
- شکل ۳-۱۳. بررسی استقلال از گام زمانی با مقایسه ضریب گشتاور پره مرجع در ۴ گام زمانی مختلف ۵۳
- شکل ۳-۱۴. بررسی استقلال از گام زمانی با مقایسه ضریب گشتاور کل روتور در ۴ گام زمانی مختلف ۵۳
- شکل ۳-۱۵. بررسی استقلال از تعداد دوران روتور با مقایسه ضریب گشتاور پره مرجع در دوران‌های مختلف ۵۴
- شکل ۳-۱۶. بررسی استقلال از تعداد دوران روتور با مقایسه ضریب گشتاور کل روتور در دوران‌های مختلف ۵۵
- شکل ۳-۱۷. اعتبار سنجی نتایج عددی حاصل با نتایج آزمایشگاهی هاوول ۵۶
- شکل ۴-۱. میدان جریان حول روتور در مقاطع با ارتفاع مختلف، (الف) کانتورهای شدت آشفتگی، (ب) کانتورهای سرعت ۶۰

- شکل ۴-۲. میدان جریان حول روتور در زوایای مختلف، (الف) کانتورهای فشار، (ب) کانتورهای سرعت ۶۲
- شکل ۴-۳. ضرایب نیروهای وارد بر پره مرجع در یک دوران روتور، (الف) ضریب نیروی مماسی، (ب) ضریب نیروی عمودی ... ۶۴
- شکل ۴-۴. ضریب گشتاور تولیدی پره مرجع در یک دوران روتور ۶۵
- شکل ۴-۵. شماتیکی از تقسیم‌بندی پره به منظور بررسی گشتاور تولیدی توسط بخش‌های مختلف آن ۶۶
- شکل ۴-۶. ضریب گشتاور تولیدی توسط بخش‌های مختلف پره در یک دوران روتور ۶۷
- شکل ۴-۷. ضریب گشتاور تولیدی روتور و پره‌های آن در یک دوران ۶۸
- شکل ۴-۸. ضریب گشتاور پره مرجع و نیروی عمودی وارد بر آن در یک دوران روتور برای نسبت سرعت لبه‌های مختلف ۷۰
- شکل ۴-۹. ضریب گشتاور تولیدی کل روتور در یک دوران برای نسبت سرعت لبه‌های مختلف ۷۱
- شکل ۴-۱۰. منحنی ضریب عملکرد توربین بر حسب نسبت سرعت لبه ۷۲
- شکل ۴-۱۱. شماتیکی از نقاط مورد استفاده به منظور اتصال پره‌های روتور به بازوهای نگهدارنده ۷۳
- شکل ۴-۱۲. منحنی ضریب عملکرد توربین بر حسب نسبت سرعت لبه برای محل اتصال‌های مختلف پره به بازوها ۷۴
- شکل ۴-۱۳. ضرایب نیروی وارد بر پره برای محل اتصال‌های مختلف پره، (الف) نیروی عمودی، (ب) نیروی مماسی ۷۴
- شکل ۴-۱۴. ضریب گشتاور تولیدی پره مرجع در یک دوران روتور برای محل اتصال‌های مختلف پره ۷۵
- شکل ۴-۱۵. ضریب گشتاور ناشی از نیروی عمودی حول محور دوران، برای محل اتصال‌های مختلف پره ۷۶
- شکل ۴-۱۶. شماتیک چگونگی وارد آمدن گشتاور ناشی از نیروهای عمودی با تغییر محل اتصال پره به بازوها ۷۸
- شکل ۴-۱۷. نمایی از گام اولیه پره و جهت قراردادی آن ۷۸
- شکل ۴-۱۸. منحنی ضریب عملکرد بر حسب نسبت سرعت لبه برای روتورهای با گام اولیه مختلف ۸۰
- شکل ۴-۱۹. بررسی اثر تغییر گام اولیه پره بر منحنی ضریب عملکرد توربین در مطالعات آزمایشگاهی ۸۱
- شکل ۴-۲۰. ضرایب نیروی وارد بر پره مرجع برای گام‌های اولیه مختلف، (الف) نیروی عمودی، (ب) نیروی مماسی ۸۲
- شکل ۴-۲۱. ضریب گشتاور تولیدی روتور در یک دوران برای گام‌های اولیه مختلف ۸۲
- شکل ۴-۲۲. نمودار ضریب عملکرد بر حسب نسبت سرعت لبه برای روتور با نسبت صلبیت‌های مختلف ۸۴
- شکل ۴-۲۳. ضریب گشتاور پره مرجع در یک دوران روتور برای روتور با نسبت صلبیت‌های مختلف ۸۴
- شکل ۴-۲۴. کانتورهای سرعت حول پره برای موقعیت ۹۰ درجه برای ۳ نسبت صلبیت مختلف ۸۵
- شکل ۴-۲۵. ضریب گشتاور کل روتور در یک دوران برای روتور با نسبت صلبیت‌های مختلف ۸۶
- شکل ۴-۲۶. نمایی از روتور با پره‌های مارپیچ ۸۷
- شکل ۴-۲۷. ضریب گشتاور کلی روتور برای روتور با پیچش‌های مختلف پره ۸۸
- شکل ۴-۲۸. شماتیکی از نحوه تقسیم‌بندی پره به منظور بررسی گشتاور مقاطع مختلف پره ۸۹
- شکل ۴-۲۹. گشتاور تولید شده توسط قسمت‌های مختلف پره، (الف) روتور با پیچش پره ۹۰ درجه، (ب) روتور با پره مستقیم .. ۹۰
- شکل ۴-۳۰. ضریب گشتاور پره مرجع در یک دوران روتور برای روتور با پیچش‌های مختلف پره ۹۰

فهرست جدول‌ها

- جدول ۱-۱. ظرفیت توان بادی نصب شده به تفکیک مناطق جهان بر حسب مگاوات در پایان سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۱. ۳۰
- جدول ۱-۳. مشخصات هندسی روتور مورد بررسی ۲۷
- جدول ۲-۳. ابعاد تونل باد استفاده شده در بررسی توربین محور عمودی ۲۷
- جدول ۳-۳. روش‌های مورد استفاده در گسسته‌سازی معادلات حاکم ۴۲
- جدول ۴-۳. مشخصات شبکه‌های مورد استفاده در بررسی استقلال حل از شبکه ۵۱
- جدول ۵-۳. مشخصات گام‌های زمانی مورد استفاده در بررسی استقلال حل از گام زمانی ۵۲
- جدول ۱-۴. ضرایب نیروی مماسی ناشی از لزجت و فشار در موقعیت‌های مختلف ۶۳
- جدول ۲-۴. میزان مشارکت بخش‌های مختلف پره در تولید گشتاور ۶۷
- جدول ۳-۴. نسبت سرعت لبه‌های مورد بررسی و سرعت دورانی روتور در هر یک ۶۹
- جدول ۴-۴. نسبت صلبیت و طول وتر پره‌های مورد بررسی ۸۳
- جدول ۵-۴. مقایسه ضریب عملکرد و دامنه نوسانات گشتاور برای روتور با پیچش‌های مختلف پره ۸۸

فهرست علامتها و اختصارها

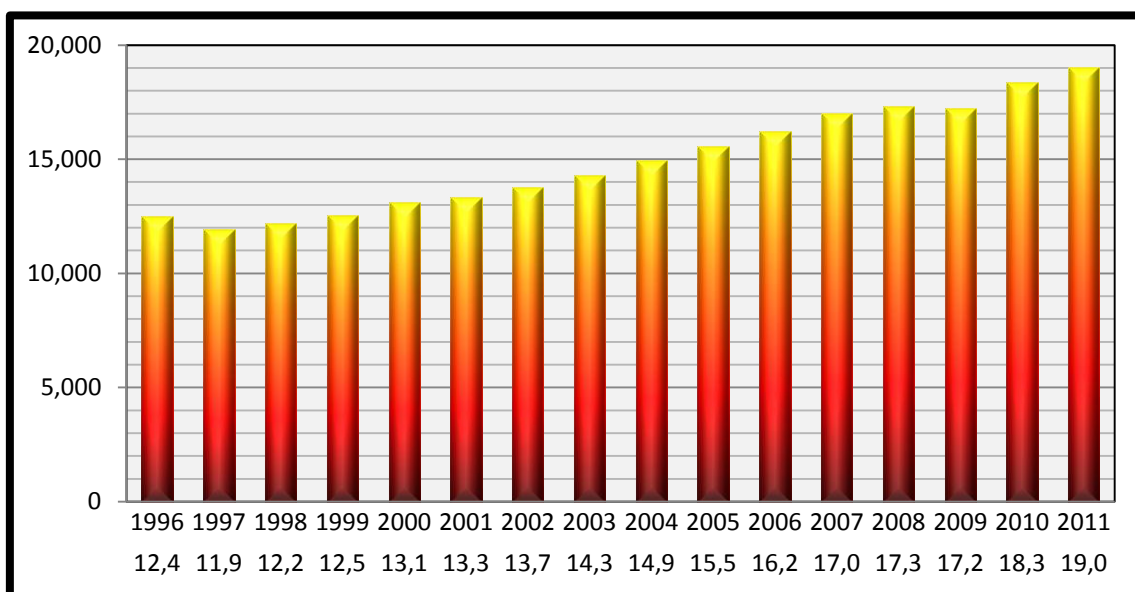
[deg]	زاویه حمله پره	α
[deg]	زاویه حمله ظاهری سرعت صفر	α_0
[deg]	گام پره	β
[-]	نسبت سرعت لبه	λ
[deg]	زاویه موقعیت پره	θ
[-]	نسبت صلبیت روتور	σ
[rpm]	سرعت زاویه‌ای دورانی روتور	ω
[kg/m ³]	چگالی	ρ
[deg]	زاویه پیچش پره به دور روتور	ϕ
[m]	فاصله محل اتصال پره به بازوهای نگهدارنده از لبه حمله پره	a
[m]	طول وتر پره	c
[-]	ضریب گشتاور	C_m
[-]	ضریب عملکرد توربین	C_P
[-]	ضریب نیروی مماسی پره	C_T
[-]	ضریب نیروی عمودی پره	C_N
[m]	قطر روتور	D
[m]	نیم ارتفاع پره	h
[-]	عدد ماخ جریان	Ma
[Nm/s]	توان خروجی توربین	P_T
[Nm/s]	توان باد در دسترس توربین	P_W
[m]	شعاع پره	R
[-]	عدد رینولدز جریان	Re
[m ²]	مساحت پیش‌روی جریان روتور	S
[Nm]	گشتاور متوسط روتور	\bar{T}
[Nm]	گشتاور پره	T_B
[Nm]	گشتاور روتور	T_R
[m/s]	سرعت جریان آزاد	V_∞
[m/s]	سرعت مماسی پره	V_B
[m/s]	سرعت صوت	V_s
[m/s]	سرعت نسبی جریان	W

فصل ۱

دیباچه

۱-۱. صنعت باد در جهان

در جهان امروز، میزان مصرف انرژی به ویژه انرژی الکتریکی، به صورت روزافزون رو به افزایش است. همان طور که در شکل ۱-۱ نشان داده شده است، توان الکتریکی مصرفی جهان در طی دهه اخیر رشدی در حدود ۵۰ درصد داشته است که بخش عمده‌ای از این توان مصرفی، از منابع سوخت‌های فسیلی تامین می‌گردد. از آنجا که منابع سوخت‌های فسیلی محدود است و دسترسی به آن‌ها برای تمامی کشورها یکسان نمی‌باشد، بایستی به فکر منابع انرژی جایگزین برای این سوخت‌ها بود.

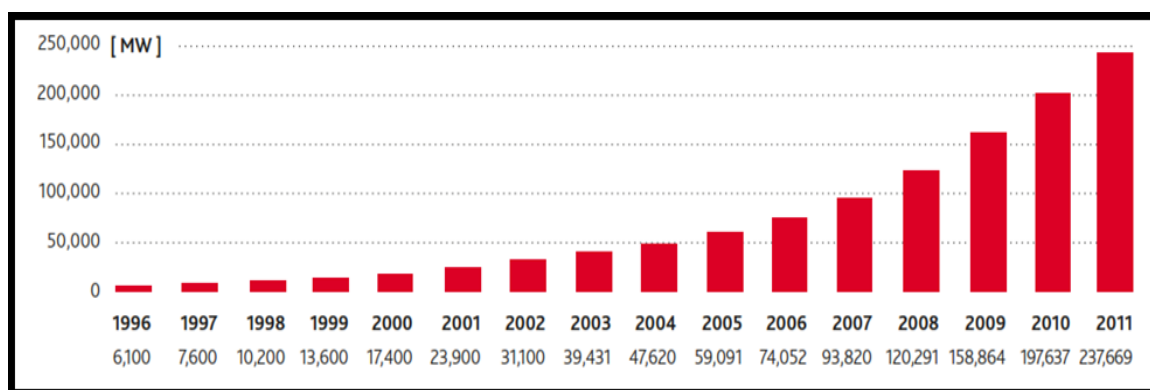


شکل ۱-۱. نمودار میزان مصرف سالیانه توان الکتریکی جهان در سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۱ بر حسب تراوات ساعت [۱]

از سوی دیگر استفاده از سوخت‌های فسیلی، انتشار گازهای گلخانه‌ای را به دنبال دارد که به نوبه خود موجب افزایش دمای زمین می‌گردد. پس نه تنها منابع انرژی جایگزین باید نامحدود باشند بلکه بایستی تا حد امکان حداقل انتشار آلاینده‌ها و گازهای گلخانه‌ای را در فرایند تولید توان به همراه داشته باشند.

با توجه به مطالب فوق، هر ساله تمایل به استفاده از منابع انرژی تجدیدپذیر برای تولید توان

الکتریکی بیشتر می‌گردد. انرژی باد که یکی از منابع انرژی تجدیدپذیر می‌باشد، از فراوانی و دسترسی بالایی برخوردار می‌باشد و در فرایند تولید انرژی الکتریکی از آن، هیچ‌گونه گاز گلخانه‌ای منتشر نمی‌گردد. لذا در طی دهه گذشته، تامین توان الکتریکی از منابع انرژی باد یکی از موضوعات مورد توجه متخصصین این امر بوده است. شکل ۱-۲ نمودار ظرفیت بادی نصب شده جهان را در طی سال‌های ۱۹۹۶ تا پایان سال ۲۰۱۱ میلادی نشان می‌دهد.



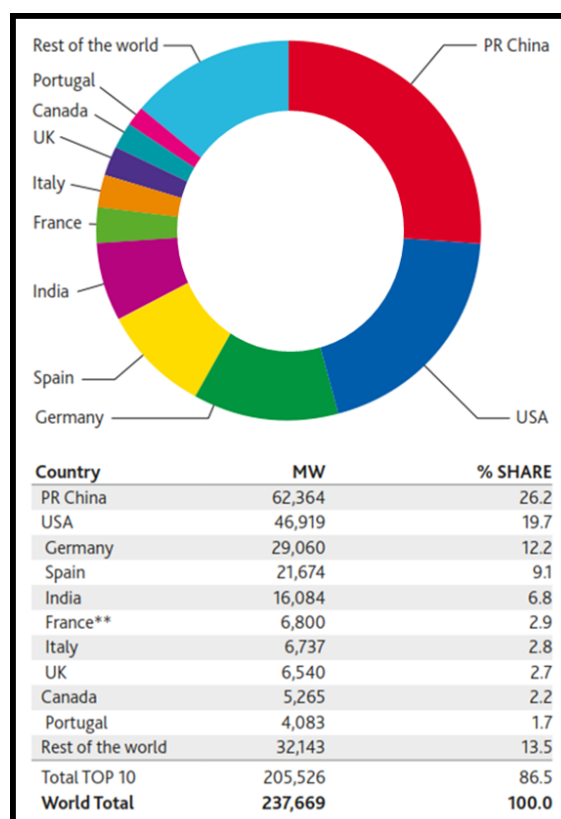
شکل ۱-۲. ظرفیت بادی نصب شده جهان طی سال‌های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۱ برحسب مگاوات [۲]

چنانچه در شکل ۱-۲ مشاهده می‌شود، در طی دهه اخیر ظرفیت توان بادی نصب شده جهان تقریباً ۱۰ برابر شده است که این نشان از اشتیاق موجود برای به‌کارگیری این منبع انرژی می‌باشد. واضح است که توزیع این ظرفیت در سراسر جهان یکسان نیست، بلکه متاثر از میزان دسترسی به سوخت‌های فسیلی و دسترسی به میادین بادی مناسب می‌باشد. به منظور مقایسه رشد این صنعت در مناطق مختلف، در جدول ۱-۱ میزان توان بادی نصب شده به تفکیک مناطق در پایان سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۱ آورده شده است. قابل ملاحظه است که این صنعت در مناطقی که دسترسی به منابع سوخت‌های فسیلی محدود بوده، رشد چشمگیری داشته است.

جدول ۱-۱. ظرفیت توان بادی نصب شده به تفکیک مناطق جهان بر حسب مگاوات در پایان سال‌های ۱۹۹۶، ۲۰۰۶ و ۲۰۱۱

منطقه	۱۹۹۶ [۳]	۲۰۰۶ [۲]	۲۰۱۱ [۲]
آسیا و اقیانوسیه	۸۹۷	۱۱۵۶۹	۸۴۸۸۸
آفریقا و خاورمیانه	۱۳	۳۷۸	۱۰۹۳
آمریکای جنوبی و مرکزی	۳۲	۵۰۷	۲۳۳۰
آمریکای شمالی	۱۶۸۱	۱۳۰۳۵	۵۲۷۵۳
اروپا	۳۲۱۶	۴۸۵۶۳	۹۶۶۰۶
مجموع	۵۸۳۹	۷۴۰۵۱	۲۳۷۶۶۹

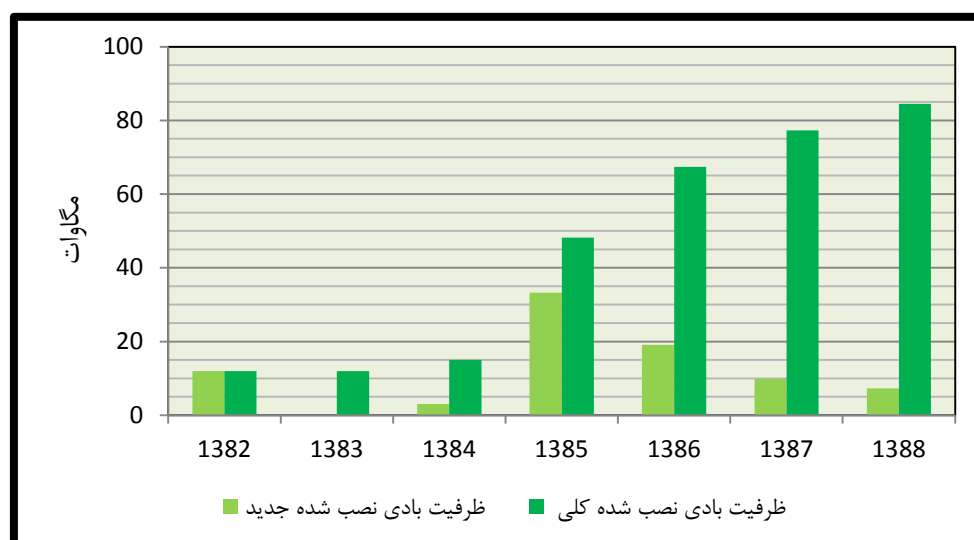
در شکل ۱-۳ ظرفیت توان بادی نصب شده در پایان سال ۲۰۱۱ میلادی ارائه شده است، که در آن سهم ۱۰ کشور پیش‌تاز این امر به تفکیک بیان شده است. قابل ملاحظه است که کشورهای چین، آمریکا و آلمان، به ترتیب از بیش‌ترین توان بادی نصب شده برخوردار می‌باشند و به تنهایی بیش از نیمی از ظرفیت توان بادی نصب شده جهان را به خود اختصاص داده‌اند.



شکل ۱-۳. سهم ۱۰ کشور برتر در ظرفیت توان بادی نصب شده بر حسب مگاوات در پایان سال ۲۰۱۱ میلادی [۲]

۲-۱. صنعت باد در ایران

کشور ایران به دلیل موقعیت جغرافیایی مناسب و برخورداری از سواحل کم‌عمق در کرانه خلیج فارس، از پتانسیل بالایی برای دریافت انرژی از جریان باد برخوردار است. براساس مطالعات آژانس بین-المللی انرژی، پتانسیل انرژی باد در ایران حداقل ۶۵۰۰ مگاوات تخمین زده شده است [۲]. بهره‌برداری از انرژی باد در ایران به منظور تولید توان الکتریکی با نصب دو توربین بادی به ظرفیت ۵۵۰ کیلووات در سال ۱۳۷۳ آغاز گردید [۴] و پس از آن با راه‌اندازی و بهره‌برداری از مزرعه بادی منجیل در استان گیلان و بینالود در استان خراسان رضوی ایران نیز به کشورهای صاحب فناوری تولید توان الکتریکی از جریان باد پیوست. در شکل ۱-۴، نمودار ظرفیت بادی نصب شده در ایران طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۸ نشان داده شده است.



شکل ۱-۴. نمودار ظرفیت توان بادی نصب شده در ایران برحسب مگاوات طی سال‌های ۱۳۸۲ تا ۱۳۸۸ [۵]

در حال حاضر عمده توان بادی ایران از مزارع بادی واقع در استان‌های گیلان و خراسان رضوی تامین می‌گردد. البته در طی سال‌های اخیر مزارع بادی جدیدی در استان‌های آذربایجان غربی، سیستان و بلوچستان، فارس و اصفهان آغاز به کار نموده‌اند.

۳-۱. توربین‌های بادی

در این بخش به بیان تاریخچه‌ای از ابزار استخراج انرژی از جریان باد پرداخته می‌شود و تحول این ابزار در مقاطع مختلف تاریخ به صورت مختصر بیان می‌گردد. برای این منظور این بخش در دو قسمت ابزارهای بادی اولیه و ابزارهای بادی امروزی بیان شده است.

۱-۳-۱. ابزارهای بادی اولیه

آسیاب‌های بادی اولین ابزاری بودند که توسط بشر به منظور دریافت انرژی از جریان باد مورد استفاده واقع شدند. گرچه توسط برخی نگارندگان بیان شده است که بقایای آسیاب‌های بادی به قدمت ۳۰۰۰ سال در مصر یافت شده است، اما اولین مدارک قابل اعتماد در این باره مربوط به سال ۶۴۴ میلادی می‌باشد که بیانگر وجود آسیاب‌های بادی با محور دوران عمودی در ناحیه سیستان در مزر ایران و افغانستان می‌باشد [۶]. تقریباً در همان زمان، در چین نیز از چرخ‌های بادی با محور دوران عمودی به منظور آبرسانی به مزارع برنج استفاده می‌شده است. آسیاب‌های بادی با ظاهر مرسوم آن‌ها، برای اولین بار در شمال غرب اروپا به کار گرفته شدند که اولین مدارک معتبر آن مربوط به سال ۱۱۸۰ می‌باشد [۶]. با گذشت زمان کاربرد آسیاب‌های بادی در سراسر اروپا مرسوم گشت ولی با ورود موتورهای بخار به عرصه تولید توان، تعداد آسیاب‌های بادی در اروپا روندی نزولی در پیش گرفت و مرگ واقعی آن‌ها با برق‌رسانی به مناطق روستایی آغاز گردید.

با آغاز مهاجرت اروپاییان به غرب، تکنولوژی آسیاب‌های بادی به منظور تامین آب مورد نیاز مهاجران در دشت‌ها، به آمریکا راه یافت. در سال ۱۸۵۰، دانیل هالادای^۱ توانست با تغییر خصوصیات آیرودینامیکی آسیاب‌های بادی، توربین‌های بادی طراحی نماید که ضمن تولید گشتاور بالا به منظور راه‌اندازی پمپ‌های رفت و برگشتی آب، قادر به تطبیق خود با جهت وزش باد بوده و در مقابل طوفان‌های بادی مقاوم باشند [۶]. در شکل ۱-۵ یکی از توربین‌های طراحی شده توسط هالادای، نشان داده شده است.

^۱ Daniel Halladay