



دانشگاه سمنان  
دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر

پایان نامه دوره کارشناسی ارشد مهندسی برق-قدرت

موضوع:

کنترل فرکانس در شبکه های مجزا همراه با مولد های بادی

استاد راهنما:

جناب آقای دکتر مصطفی جزائری

استاد مشاور:

جناب آقای دکتر جعفر ادبی

نام دانشجو:

سیده نفیسه میرزایی هری کنده ئی

شهریور ماه ۱۳۹۳

تقدیم ہے:

مقدس ترین واژه دار لنت نامہ دلم،

پدرو مادر مہربانم۔ پاس حافظہ سرشار، و کرمای امید بخش و جوشان، پاس قلب ہی بزرگشان کہ فریادس است۔

بہسرم کہ نشاء لطف و عطاوت الہی در زندگی، و امید بودن من است۔

براد انم، ہمرانن ہمیشگی زندگی ام

و

روح پاک مادر محترم

کہ ہوارہ شوق و حامی من در این راہ بوہ اند، امید وارم روشن ترین رحمت الہی قرار گیرد۔

شکر و قدردانی

باسپاس بیکران و شکر بی انتہا۔ دکاہ ذات اقدس الہی، کہ توفیق انجام این رسالہ را بہ بندہ حقیر داد و با حمد و ثنای او کہ حمد قدر زیاد باشد، باز در مقابل لطف او اندکی بیش نیست۔

واجب می دانم سپاس فراوان خود را شمار استاد را بہنامی گرانقدرم جناب آقای دکتر مصطفی بزاز می بنامیم کہ بحق در طول این دورہ تحصیلی و تدوین پایان نامہ از بچ کوششی دریغ نورزیدند۔

برخیز لازم می‌دانم از مشاور محترم جناب آقای دکتر حضرت اوبی و سایر اساتید بخش مهندسی برق که از آن‌ها در موارد مختلف، کسب علم و تجربه نمودم تشکر نمایم.

از خانواده ام که موجدات تحصیل و پیشرفت تا این مرحله را برایتان فراهم نمودند، حامی ام بودند و زحمات مرا تحمل شدند، قدر دانی می‌نمایم و از خداوند رحمان و رحیم عزت، سربلندی و طول عمر با برکت برای همه‌آنان خواستارم.

از دوستان عزیزم که در این دوران را به‌همراهم بودند، صمیمانه قدر دانی می‌کنم و موفقیت‌های فراوان در تمام مراحل زندگی برای همه‌آنان خواستارم.

### چکیده

از مهمترین چالش‌های شبکه‌های قدرت مجزا، ایجاد تعادل بین توان تولیدی و توان مصرفی و در نتیجه پای‌مداری فرکانس در هنگام ایجاد اغتشاشات است. این موضوع موقعی اهمیت بیشتری پیدا می‌کند که ضریب نفوذ واحدهای بادی در شبکه تغذیه بالا باشد. در چنین شبکه‌هایی به علت تغیری‌رات مداوم بار و باد، نیاز به تنظیم پیوسته توان تولیدی متناسب با توان مصرفی بار می‌باشد، تا فرکانس در محدوده نامی حفظ شود. در شبکه‌های قدرت امروزی، در مزارع بادی از توربین‌های متصل به ژنراتور از دو سو تغذیه استفاده می‌شود. به دلیل مزایای از قبیل کاهش هزینه‌های نورتر، کنترل گشتاور و افزایش بازده مزارع بادی، استفاده از ژنراتورهای از دو سو تغذیه مورد توجه قرار گرفته است.

در این تحقیق، با طراحی و ارائه یک سیستم هماهنگ کننده علاوه بر افزایش بازدهی سیستم، فرکانس سیستم به بهترین شکل کنترل شده است. در این پایان‌نامه یک مزرعه بادی مستقل از شبکه که متشکل از ژنراتور القایی از دو سو تغذیه متصل به توربین بادی، بار ثانویه و یک ژنراتور سنکرون به همراه یک هماهنگ کننده است، به منظور بررسی کارایی سیستم معرفی شده تغیری‌رات فرکانس در هنگام تغیری‌رات سرعت باد و بار مصرف کننده مورد مطالعه قرار گرفته است. نتایج بدست آمده نشان می‌دهند، عملکرد سیستم در کنترل فرکانس به هنگام ایجاد اغتشاشات، در زمان استفاده از هماهنگ کننده نسبت به زمان استفاده از کنترل زاویه گام به تنهایی بهبود می‌یابد. شبیه‌سازی این سیستم توسط نرم افزار MATLAB انجام شده است.

کلمات کلیدی: مولدهای بادی، ژنراتور از دو سو تغذیه، کنترل فرکانس، سیستم هماهنگ کننده، بار ثانویه.

## فهرست مطالب

صفحه	عنوان
۱	<b>فصل اول - مقدمه</b> .....
۱	۱-۱ مقدمه .....
۲	۲-۱ هدف از انجام پایان نامه .....
۴	<b>فصل دوم- انرژی باد و توربین های بادی</b> .....
۴	۱-۲ تاریخیچه .....
۶	۲-۲ اهمیت انرژی باد .....
۸	۳-۲ روابط انرژی باد .....
۱۰	۴-۲ ساختار توربین های بادی .....
۱۱	۱-۴-۲ توربین های سرعت ثابت .....
۱۳	۲-۴-۲ توربین های سرعت متغییر .....
۱۶	۵-۲ مدل توربین بادی .....
۱۶	۱-۵-۲ مدل آئرودینامیکی توربین بادی .....
۲۰	۲-۵-۲ مدل مکانیکی توربین بادی .....
۲۱	۶-۲ کنترل توان و سرعت در توربین .....
۲۲	۱-۶-۲ حالت اول- سرعت باد کمتر از سرعت قطع پایینی ( $V_w < V_c$ ) .....
۲۲	۲-۶-۲ حالت دوم- عملکرد کنترل سرعت، گشتاور و توان ( $V_c < V_w < V_r$ ) .....
۲۳	۳-۶-۲ حالت سوم- سرعت باد بیش از مقدار نامی و کمتر از مقدار قطع بالا ( $V_r < V_w < V_f$ ) .....
۲۳	۴-۶-۲ حالت چهارم- سرعت باد بیش از حد سرعت بیشینه ی مجاز ( $V_w > V_f$ ) .....
۲۳	۷-۲ پیشینه تحقیق .....
۲۵	۷-۲ جمع بندی .....
۲۶	<b>فصل سوم- کنترل فرکانس با استفاده از توربین بادی</b> .....
۲۶	۱-۳ مقدمه .....
۲۷	۲-۳ پاسخ ایترسی واحدهای بادی .....
۲۹	۳-۳ کنترل اولیه فرکانس توسط واحدهای بادی .....

۳۲	۳-۳-۱ کنترل فرکانس با استفاده از کنترل مبدل سمت روتور
۳۴	۳-۳-۲ کنترل فرکانس با زاوی ۴ ی گام پره
۳۶	۳-۳-۴ کنترل فرکانس بوسیله بار ثانوی ۴
۳۷	۳-۵ جمع بندی
۳۸	<b>فصل چهارم - ساختاری ستم کنترلی</b>
۳۸	۴-۱ مقدمه
۳۹	۴-۲ ساختار کلی سی ستم
۴۰	۴-۲-۱ توربین بادی سرعت متغی ر
۴۱	۴-۲-۲ ژنراتور القای ی از دو سو تغذی ۴
۴۶	۴-۲-۳ کنترل زاوی ۴ گام
۴۹	۴-۲-۴ کنترل فرکانس توسط بار ثانوی ۴
۵۰	۴-۲-۵ معرفی ی یک سی ستم هماهنگ کننده
۵۴	۴-۲-۶ بار اصلی سی ستم
۵۴	۴-۲-۷ ژنراتور سنکرون سه فاز کمکی
۵۴	۴-۳ جمع بندی
۵۵	<b>فصل پنجم - نتایج عددی</b>
۵۵	۵-۱ مقدمه
۵۵	۵-۲ اطلاعات شبی ۴ سازی
۵۶	۵-۳ نتایج شبی ۴ سازی
۵۶	۵-۳-۱ تغیری باد
۵۶	۵-۳-۱-۱ بررسی اثر تغیری سرعت باد بدون حضور کنترل کننده و هماهنگ کننده
۶۲	۵-۳-۱-۲ بررسی اثر تغیری سرعت باد با حضور کنترل کننده و بدون هماهنگ کننده
۶۹	۵-۳-۱-۳ بررسی اثر تغیری سرعت باد با حضور کنترل کننده و هماهنگ کننده
۷۵	۵-۳-۲ تغیری همزمان باد و بار
۷۵	۵-۳-۲-۱ بررسی اثر تغیری همزمان باد و بار بدون حضور کنترل کننده و هماهنگ کننده
۸۱	۵-۳-۲-۲ بررسی اثر تغیری رات همزمان باد و بار با حضور کنترل کننده و بدون هماهنگ کننده
۸۷	۵-۳-۲-۳ بررسی اثر تغیری همزمان باد و بار با حضور کنترل کننده و هماهنگ کننده

۹۴	..... ۴-۵ نتیجه گیری
۹۵	..... فصل ششم - نتیجه گیری و پیشنهادات
۹۵	..... ۱-۶ نتیجه گیری
۹۷	..... ۲-۶ پیشنهادات
۹۹	..... پیوست ها
۱۰۶	..... مراجع

## فهرست شکل ها

صفحه

عنوان

- شکل ۱-۲ نمودار بزرگترین توربین های بادی ساخته شده در  
دنیای..... ۵
- شکل ۲-۲ ظرفیت تولید برق از انرژی باد از سال ۱۹۹۶ تا سال  
۲۰۱۱..... ۶
- شکل ۳-۲ مقایسه ده کشور جهان با بیشترین ظرفیت  
بادی..... ۷
- شکل ۴-۲ تابع چگالی احتمال توزیع رایلی. سرعت های متوسط باد ۵ (پیوسته) و ۷ (خط چین) و ۱۰ (نقطه  
چین)..... ۹
- شکل ۵-۲ توان الکتریکی بر حسب مقادیر مختلف سرعت  
توربین..... ۱۰
- شکل ۶-۲ ساختار سرعت ثابت توربین های  
بادی..... ۱۱
- شکل ۷-۲ توربین ژنراتورهای سرعت متغییر الف) ساختار ژنراتور سنکرون با القای بی مبدل کامل و جعبه دنده ب) ساختار ژنراتور  
سنکرون قطب بالا با مبدل کامل و بدون چرخ دنده ج) ساختار DFIG..... ۱۳
- شکل ۸-۰ تعامل اجزاء آئرویدی نامی کی، مکانی کی و  
الکتریکی..... ۱۵
- شکل ۹-۲ منحنی  $C_p$  بر حسب  $\lambda$  در مقادیر مختلف  
 $\beta$ ..... ۱۹
- شکل ۱۰-۲ منحنی توان گرفته شده از باد بر حسب سرعت بادهای متفاوت..... ۲۱
- شکل ۱-۳ پاسخ فرکانسی شبکه قدرت به اغتشاشات و کنترل اولیه  
فرکانس..... ۲۸
- شکل ۲-۳ حلقه ی کنترل کننده دروپ در تولیدات  
پراکنده..... ۲۹
- شکل ۳-۳ حلقه کنترل کننده دروپ در توربین های  
بادی..... ۲۹

شکل ۳-۴ شکل منحنی گشتاور توربین بادی بر حسب سرعت

روتور..... ۳۱

شکل ۲-۵ طرح کلی کنترل اولی‌ه فرکانس در سمت

روتور..... ۳۲

شکل ۳-۶ تغیری توان خروجی در اثر تغیری زاوی‌ه

گام..... ۳۳

شکل ۳-۷ کنترل دروپ زاوی‌ه ی

گام..... ۳۴

شکل ۴-۱ ساختار کلی سیستم مدل سازی

شده..... ۳۷

شکل ۴-۲ بلوک دی‌اگرام توربین

بادی..... ۳۸

شکل ۴-۳ معادله مداری تک فاز در حالت پای‌دار DFIG

..... ۴۰

شکل ۴-۴ ساختار یک DFIG.

..... ۴۱

شکل ۴-۵ ساختار کنترلی مبدل سمت روتور..... ۴۲

شکل ۴-۶ ساختار کنترلی مبدل سمت شبکه..... ۴۳

شکل ۴-۷ ساختار بلوک کنترلی زاوی‌ه

گام..... ۴۴

شکل ۴-۸ ساختار داخلی تنظیم کننده

فرکانس..... ۴۷

شکل ۴-۹ ساختار داخلی هماهنگ کننده..... ۴۸

شکل ۵-۱ نمودار روند تغیری‌رات سرعت

باد..... ۵۴

شکل ۵-۲ نمودار روند تغیری‌رات فرکانس

شبکه..... ۵۵

شکل ۵-۳ نمودار ولتاژ لاینک DC ژنراتور

القایی..... ۵۶



- شکل ۴-۵ نمودار تغیری رات زاوی ۴  
گام..... ۵۷
- شکل ۵-۵ نمودار توان اکتی و تولی دی توسط توربین  
بادی..... ۵۷
- شکل ۶-۵ نمودار توان راکتی و توربین  
بادی..... ۵۸
- شکل ۷-۵ نمودار توان اکتی و ژنراتور  
سنکرون..... ۵۹
- شکل ۸-۵ نمودار توان راکتی و ژنراتور  
سنکرون..... ۵۹
- شکل ۹-۵ نمودار روند تغیری رات سرعت  
باد..... ۶۰
- شکل ۱۰-۵ نمودار روند تغیری رات فرکانس  
شبکه..... ۶۱
- شکل ۱۱-۵ نمودار ولتاژ لی نک DC ژنراتور  
القایی..... ۶۱
- شکل ۱۲-۵ نمودار تغیری رات زاوی ۴  
گام..... ۶۲
- شکل ۱۳-۵ نمودار توان اکتی و تولی دی توسط توربین  
بادی..... ۶۳
- شکل ۱۴-۵ نمودار توان راکتی و توربین  
بادی..... ۶۴
- شکل ۱۵-۵ نمودار توان اکتی و بار  
ثانوی ۴..... ۶۵
- شکل ۱۶-۵ نمودار توان اکتی و ژنراتور  
سنکرون..... ۶۵
- شکل ۱۷-۵ نمودار توان راکتی و ژنراتور  
سنکرون..... ۶۶
- شکل ۱۸-۵ نمودار روند تغیری رات سرعت  
باد..... ۶۷

شکل ۱۹-۵ نمودار روند تغیری رات فرکانس

شبکه..... ۶۸

شکل ۲۰-۵ نمودار ولتاژ لی نیک DC ژنراتور

القایی..... ۶۹

شکل ۲۱-۵ نمودار تغیری رات زاوی

گام..... ۷۰

شکل ۲۲-۵ نمودار توان اکتی و تولی دی توسط توربین

بادی..... ۷۰

شکل ۲۳-۵ نمودار توان راکتی و توربین

بادی..... ۷۱

شکل ۲۴-۵ نمودار توان اکتی و بار

ثانوی..... ۷۱

شکل ۲۵-۵ نمودار توان اکتی و ژنراتور

سنکرون..... ۷۲

شکل ۲۶-۵ نمودار توان راکتی و ژنراتور

سنکرون..... ۷۲

شکل ۲۷-۵ نمودار سرعت باد..... ۷۳

شکل ۲۸-۵ نمودار توان اکتی و بار

اصلی..... ۷۴

شکل ۲۹-۵ نمودار روند تغیری رات فرکانس

شبکه..... ۷۵

شکل ۳۰-۵ نمودار ولتاژ لی نیک DC ژنراتور

القایی..... ۷۵

شکل ۳۱-۵ نمودار تغیری رات زاوی

گام..... ۷۶

شکل ۳۲-۵ نمودار توان اکتی و تولی دی توسط توربین

بادی..... ۷۶

شکل ۳۳-۵ نمودار توان راکتی و توربین

بادی..... ۷۷

شکل ۳۴-۵ نمودار توان اکتیو و ژنراتور سنکرون.....	۷۸
شکل ۳۵-۵ نمودار توان راکتیو و ژنراتور سنکرون.....	۷۸
شکل ۳۶-۵ نمودار سرعت باد.....	۷۹
شکل ۳۷-۵ نمودار توان اکتیو بار اصلی.....	۸۰
شکل ۳۸-۵ نمودار روند تغیری رات فرکانس شبکه.....	۸۱
شکل ۳۹-۵ نمودار ولتاژ لی نیک DC ژنراتور القای.....	۸۱
شکل ۴۰-۵ نمودار تغیری رات زاوی۴ گام.....	۸۲
شکل ۴۱-۵ نمودار توان اکتیو و تولیدی توسط توربین بادی.....	۸۳
شکل ۴۲-۵ نمودار توان راکتیو و توربین بادی.....	۸۳
شکل ۴۳-۵ نمودار توان اکتیو بار ثانوی۴.....	۸۴
شکل ۴۴-۵ نمودار توان اکتیو و ژنراتور سنکرون.....	۸۴
شکل ۴۵-۵ نمودار توان راکتیو و ژنراتور سنکرون.....	۸۵
شکل ۴۶-۵ نمودار سرعت باد.....	۸۶
شکل ۴۷-۵ نمودار توان اکتیو بار اصلی.....	۸۶
شکل ۴۸-۵ نمودار روند تغیری رات فرکانس شبکه.....	۸۷

شکل ۵-۴۹ نمودار ولتاژ لی-نیک DC ژنراتور

القای..... ۸۸

شکل ۵-۵۰ نمودار تغیری رات زاویء

گام..... ۸۹

شکل ۵-۵۱ نمودار توان اکتی و تولی دی توسط توربین

بادی..... ۸۹

شکل ۵-۵۲ نمودار توان راکتی و توربین

بادی..... ۹۰

شکل ۵-۵۳ نمودار توان اکتی و بار

ثانویء..... ۹۰

شکل ۵-۵۴ نمودار توان اکتی و ژنراتور

سنکرون..... ۹۱

شکل ۵-۵۵ نمودار توان راکتی و ژنراتور

سنکرون..... ۹۱

## فصل اول - مقدمه

### ۱-۱ مقدمه

امروزه انرژی الکتریکی به صورت وسیع در خانه ها و صنعت مصرف می شود و مقدار زیادی از این انرژی توسط سوخته های فسیلی تامین می شود. اثرات مخرب زیست محیطی ناشی از سوخت های فسیلی از یک سو و کاهش منابع سوختی و افزایش قیمت این سوخت ها از سوی دیگر، کشورها را به سمت استفاده از منابع تجدید پذیر سوق داده است. تولید بادی دارای مزیت های است که آن را از دیگر منابع تجدید پذیر متمایز می سازد. اول آنکه در اکثر نقاط دنیا انرژی باد به صورت گسترده و وسیع در دسترس می باشد و دوم نسبت به دیگر منابع تجدید پذیر مانند سلول خورشیدی دارای هزینه نصب پایینی تر بوده و بسیاری با محیط سازگار است. به دلیل ساختار خاص توربین های بادی و نحوه کنترل آنها که وابسته به سرعت باد که غیر قابل پیش بینی و متغییر است، استفاده گسترده از این توربین ها همراه با مشکلات فراوان در سطح انتقال و توزیع است. از جمله این مشکلات می توان به کنترل ولتاژ و توان راکتیو، ایجاد فلکریولتاژ و نوسانات ولتاژ، کنترل توان حقیقی و کنترل فرکانس اشاره نمود. تغییرات فرکانس در یک شبکه الکتریکی از نامتعادلی توان ناشی می شود. برای مثال، زمانی که توان تولیدی توربین های بادی از میزان مصرف بیشتر شود، ژنراتورها شتاب می گیرند و در نتیجه فرکانس افزایش می یابد. به طور مشابه زمانی که تولید ژنراتورها برای تقاضا کافی نباشد سرعت ژنراتورها و در نتیجه فرکانس کاهش خواهد یافت. هنگامی که یک توربین بادی کوچک به شبکه ای بزرگ متصل می شود، تأثیری بر فرکانس شبکه نمی گذارد. با این حال، وقتی توربین در یک سیستم جدا از شبکه کار می کند یا یک مزرعه بادی بزرگ به شبکه متصل می گردد، وضعیت فرق خواهد کرد، از آنجایی که سرعت باد یک پارامتر کاملاً غیر قطعی می

باشد بنابراین می‌توان تولید توان در توربین‌های بادی دائماً در معرض تغیری می‌باشد. علاوه بر این می‌توان اکتیو مصرفی نیز یک پارامتر متغیری می‌باشد. بنابراین نیازی به کنترل تعادل بین توان اکتیو تولیدی و مصرفی در سیستم‌های بادی ای‌زوله به جهت حفظ تعادل فرکانس با در نظر گرفتن عوامل متغیری تغیری کننده‌ای که در این شبکه‌ها قرار دارند، افزایش پیدا می‌کند.

## ۱-۲ هدف از انجام پایان نامه

هدف از انجام این پایان‌نامه کنترل فرکانس در شبکه‌های مستقلی است که از انرژی باد به عنوان منابع تولید انرژی الکتریکی بهره می‌گیرند. ایجاد چنین شبکه‌هایی در بسیاری از نقاط که به انرژی باد دسترسی داشته و نیازی به بهره‌برداری مستقل از شبکه سراسری نیازی وجود دارد، می‌سر است.

در یک شبکه تولید برق بادی، بار الکتریکی و باد ورودی‌های قابل کنترل سیستم می‌باشند و از آنجایی که بار الکتریکی و باد ماهیتی تغیری پذیر دارند، بنابراین فرکانس تمایل به تغیری دارد. لذا باید عواملی برای جبران‌سازی تغیری‌رات فرکانس ایجاد شود. در این پایان‌نامه، به منظور حفظ تعادل بین توان اکتیو تولیدی و توان اکتیو مصرفی از دو روش کنترل زاویه گام و کنترل توسط بار ثانویه بهره‌برده شده است. کنترل زاویه گام بوسیله‌ی تغیری زاویه پره‌ی توربین بادی امکان تنظیم توان اکتیو دریافتی مطابق با توان اکتیو مصرفی را می‌سر می‌کند. کنترل بار ثانویه با کمک تنظیم مقدار مقاومت بار ثانویه در هنگام کمبود می‌توان مصرف، تعادل بین توان اکتیو تولیدی و مصرفی را ممکن می‌سازد. به جهت کاهش انرژی تلف شده و بهبود عملکرد سیستم در کنترل فرکانس یک سیستم هماهنگ کننده طراحی شده است. با استفاده از این هماهنگ کننده، در مواقعی که تغیری‌رات همزمان در باد و بار مصرفی ایجاد می‌شود، بار ثانویه، زمان اغتشاش وارد مدار شده توان اضافی درون سیستم را مصرف می‌کند و پس از تثبیت فرکانس از

مدار خارج می شود. با این ایده تا حدودی راندمان سیستم بالا رفته و قابلیت اطمینان آن نیز به مراتب افزوده می شود.

تا آنجایی که مورد مطالعه قرار گرفته، برای اولین بار است که این روش در سیستمی که دارای ژنراتور از دو سو تغذیه به همراه توربین بادی سرعت متغیری است، استفاده شده است.

در فصل دوم، ابتدا تاریخیچه و اهمیت انرژی باد مورد بررسی قرار گرفته است. سپس روابط توان و ساختارهای توربین بادی از جمله توربین سرعت ثابت و توربین سرعت متغیری ارائه شده است. همچنین برتری های توربین سرعت متغیری نسبت به توربین سرعت ثابت که در این پایان نامه از آن استفاده شده، در این فصل مورد بررسی قرار گرفته و در پایان مروری بر تحقیقات انجام یافته در زمینه کنترل فرکانس توربین های بادی و مشارکت آنها در کنترل فرکانس شبکه پرداخته شده است.

در فصل سوم، روش های مختلف کنترل فرکانس در توربین های بادی ارائه و شرح داده شده است.

در فصل چهارم، مدل سیستم مورد مطالعه و شرح بلوک دیگرام های استفاده شده برای شبیه سازی سیستم و همچنین ساختار سیستم هماهنگ کننده ی طراحی شده، ارائه می شود.

در فصل پنجم، نمودارها و نتایج حاصل از شبیه سازی برای ارزیابی سیستم پیشنهادی با در نظر گرفتن دو نوع اغتشاش در سیستم از قبیل تغیری سرعت باد و تغیری همزمان سرعت باد و میزان بار مصرفی، بیان می شود.

در فصل ششم، نتایج بدست آمده از انجام این پایان نامه و همچنین پیشنهاداتی برای تحقیقات آینده ارائه شده است.

## فصل دوم- انرژی باد و توربین های بادی

### ۱-۲ تاریخچه

حدود ۳۵۰۰ سال است انسان از انرژی باد استفاده می کند و قدیمی ترین مورد استفاده از آن در مصر باستان بوده است. مصریان قایق های می ساختند تا بتوانند بر روی رودخانه نیل دریانوردی کنند و برای حرکت این قایق ها از نیروی باد استفاده می کردند [۱].

از اواخر قرن هجدهم میلادی و استفاده از ماشین بخار و ماشین های دیگ بر اساس روند ترمودینامیکی و دسترسی بالای سوخت های فسیلی، اقبال کلی را بسوی انرژی باد کم کرده بود. به همین دلیل در دوصده ی بعد استفاده از انرژی باد رو به کاهش نهاد اما تحقیقات همچنان بر روی آنها صورت می گرفت [۲].

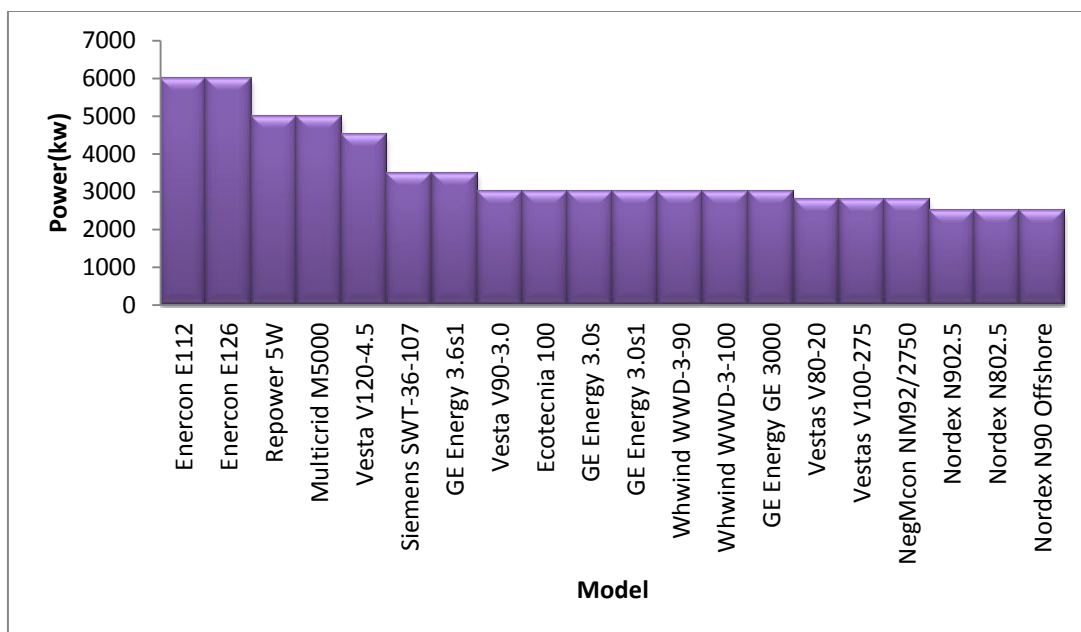
تا اوایل قرن بیستم از انرژی باد برای استحصال توان مکانیکی برای پمپ آب و آسیاب غلات مورد استفاده قرار می گرفت. با شروع صنعت مدرن کم کم انرژی باد با انرژی سوخت های فسیلی جایگزین گشت و این انرژی توسط شبکه های قدرت بکار گرفته شد [۳].

اولین توربین های بادی که انرژی الکتریکی را به شبکه ها تحویل می دادند در اوایل قرن بیستم تولید شدند. تکنولوژی آنها تا اوایل سال ۱۹۷۰ بهبود یافت و از اواخر سال ۱۹۹۰ میلادی به یکی از مهمترین منابع انرژی تجدید پذیری در دنیا تبدیل گشت [۳].



در سال ۱۹۲۰ در دانمارک از توربین های بادی کوپل شده با باتری برای مصارف روشنایی استفاده می شد. در بین سالهای ۱۹۲۵ تا ۱۹۵۷ تعداد بسیاری از بادی توربین بادی ۲/۵ تا ۳ کیلووات همراه با باتری ذخیره توسط کمپانی برادران جاکوب در آمریکا ساخته شد. در سال ۱۹۴۱ توربین بادی با توان ۱۲۵۰ کیلووات که شامل دو پره بادی بود در ورمونت آمریکا مورد آزمایش قرار گرفت. در بین سال های ۱۹۵۰ تا ۱۹۶۰ دو ژنراتور بزرگ در فرانسه مورد آزمایش قرار گرفت که اولی دارای پره ی با طول ۳۰ متر و توان نامی ۸۰۰ کیلووات بوده و دومی دارای توان نامی ۱۰۰۰ کیلووات که کوپل با یک ژنراتور سنکرون شده بود. در سال ۱۹۲۰ جورج داریوس، مهندس پرواز فرانسوی توربین های عمودی با دو پره را بهبود داد. توربین داریوس با قدرت ۴۰۰۰ کیلووات در سال ۱۹۸۳ در سواحل لورنس کبک در کانادا ساخته شد که بزرگترین توربین بادی در آن زمان بود [۲].

امروزه توربین های چندین مگاواتی برای کاربرد های مختلف ارائه می شود و تولیدکنندگان توربین های بادی در حال توسعه ی ۳ تا ۵ مگاواتی آنها هستند [۲]. بعد از سال ۲۰۰۵، توربین های بادی بزرگ به صورت سرعت متغییر ساخته شد و مورد استفاده قرار گرفت [۲]. بزرگترین توربینی که در بازار ارائه شده است، توربین E-126 متعلق به شرکت Enercon است، که توان ۶ مگاوات و قطر روتور ۱۲۶ متر را دارا می باشد. در شکل (۱-۲) بزرگترین توربین های بادی ساخته شده در دنیا با نام مدل آنها آورده شده است.



شکل ۱-۲ نمودار بزرگترین توربین های بادی ساخته شده در دنیا [۳].

امروزه توان تولیدی توربین ژنراتورهای بادی را به سه دسته تقسیم می کنند [۴]:

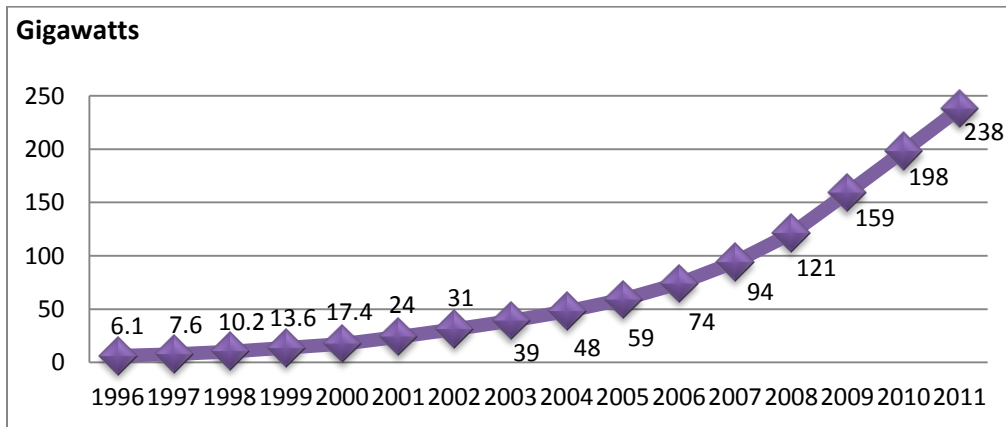
- ۱- توربین ژنراتور های بزرگ که برای بازار برق و شبکه انرژی تولید می کنند.
- ۲- توربین های با تولید متوسط برای تولیدات صنعتی (توان تولیدی بین ۵۰ تا ۲۵۰ کیلووات).
- ۳- توربین های با سایز کوچک در مصارف شهری (از ۴۰۰ وات تا ۵۰ کیلووات).

## ۲-۲ اهمیت انرژی باد

در گزارش سالانه ی شورای بین المللی انرژی باد<sup>۱</sup>، که در سال ۲۰۱۲ در مورد توربین و مزارع بادی بیش از ۵۰ کشور جهان منتشر شده است، نشان می دهد که درصد استفاده از انرژی باد در بین سال های ۱۹۹۶ تا ۲۰۱۱ افزایش یافته است. همچنین با توجه به این گزارش در سال ۲۰۰۹، دنیا با رشد ۳۱ درصدی انرژی باد مواجه بود که دارای رقم تقریبی ۶۳ میلیارد دلاری است [۵]. با توجه به بحران مالی در کشورها در سال

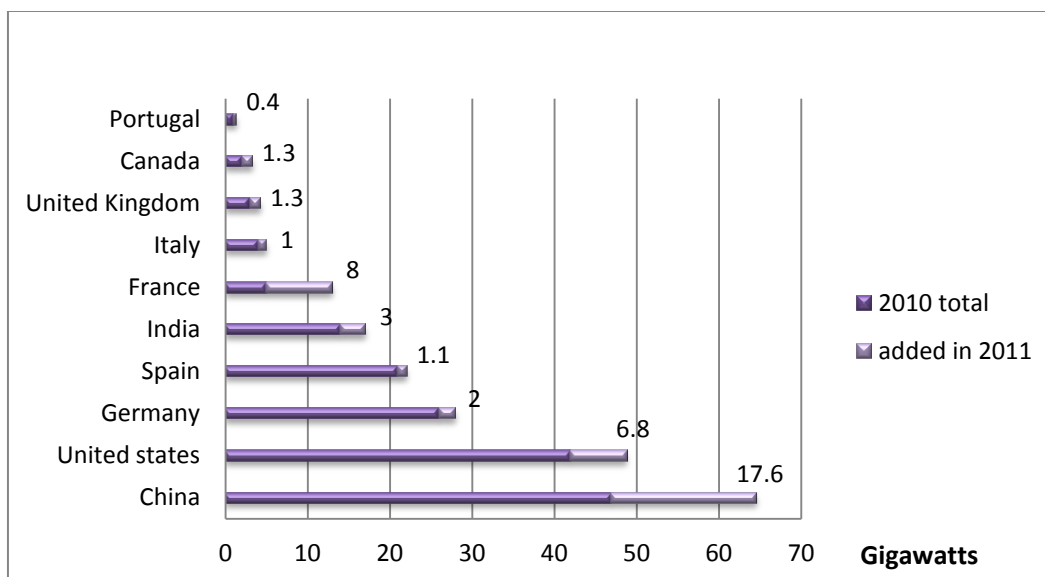
1 -World Energy Counsel Report

های اخیر تولید بادی همچنان رشد سریعی داشته و این رشد به علت پاک بودن، قابل اطمینان بودن و سرعت بالای نصب توربین های بادی است. ظرفیت تولید برق از انرژی باد از سال ۱۹۹۶ تا سال ۲۰۱۱ در شکل (۲-۲) نشان داده شده است.



شکل ۲-۲ ظرفیت تولید برق از انرژی باد از سال ۱۹۹۶ تا سال ۲۰۱۱ [۶].

همچنین ظرفیت بادی در ده کشور جهان که بیشترین استفاده را از انرژی باد دارند در شکل (۳-۲) نشان داده شده است. چین بزرگترین کاربر انرژی باد با ظرفیت تولید بیش از ۶۰ گیگاوات می باشد [۶].



شکل ۳-۲ مقایسه ده کشور جهان با بیشترین ظرفیت بادی [۶].

## ۳-۲ روابط انرژی باد

برای بررسی می‌زان وزش باد در یک منطقه از توابع چگالی احتمال سرعت باد استفاده می‌شود. تابع چگالی "احتمال وی‌بول"<sup>۲</sup> همخوانی مناسبی با توزیع سرعت باد در مناطق مختلف دارد [۷]، [۸] تابع وی‌بول به صورت رابطه ۱-۲ انگاشته می‌شود:

(۱-۲)

$$f(v_w) = \frac{k}{c} \left(\frac{v_w}{c}\right)^{k-1} e^{-\left(\frac{v_w}{c}\right)^k}$$

که در آن  $V_w$  سرعت باد،  $c$  ثابت نرمالیزه کننده سرعت می‌باشد که معمولاً برای مناطق مختلف عددی بین ۳ تا ۹ متر بر ثانیه است و  $k$  ثابتی است که به جهت وزش باد و ضریب‌های فصلی بستگی دارد و حدود ۲ است [۹].