

## مروری بر انرژی باد

در حال حاضر حدود 2.5% برق جهان از انرژی باد تامین می‌شود و این انرژی در ۵ سال گذشته رشد سالیانه‌ای در حدود 27.6% داشته و پیش‌بینی می‌شود سهم این انرژی در تولید برق در سال ۲۰۱۸ به 8% برق مصرفی جهان برسد.



شکل روبرو ظرفیت نصب شده توربین‌های بادی در جهان از سال ۱۹۹۷ تا ۲۰۰۶ و همچنین پیش‌بینی ۲۰۰۷ تا ۲۰۱۰ را نشان می‌دهد. بر اساس این نمودار ظرفیت نصب در سال ۱۹۹۷ برابر 7.4 GW که در سال ۲۰۰۶ به 74 GW رسیده و پیش‌بینی شده که تا سال ۲۰۱۰ این میزان به 160 GW برسد.

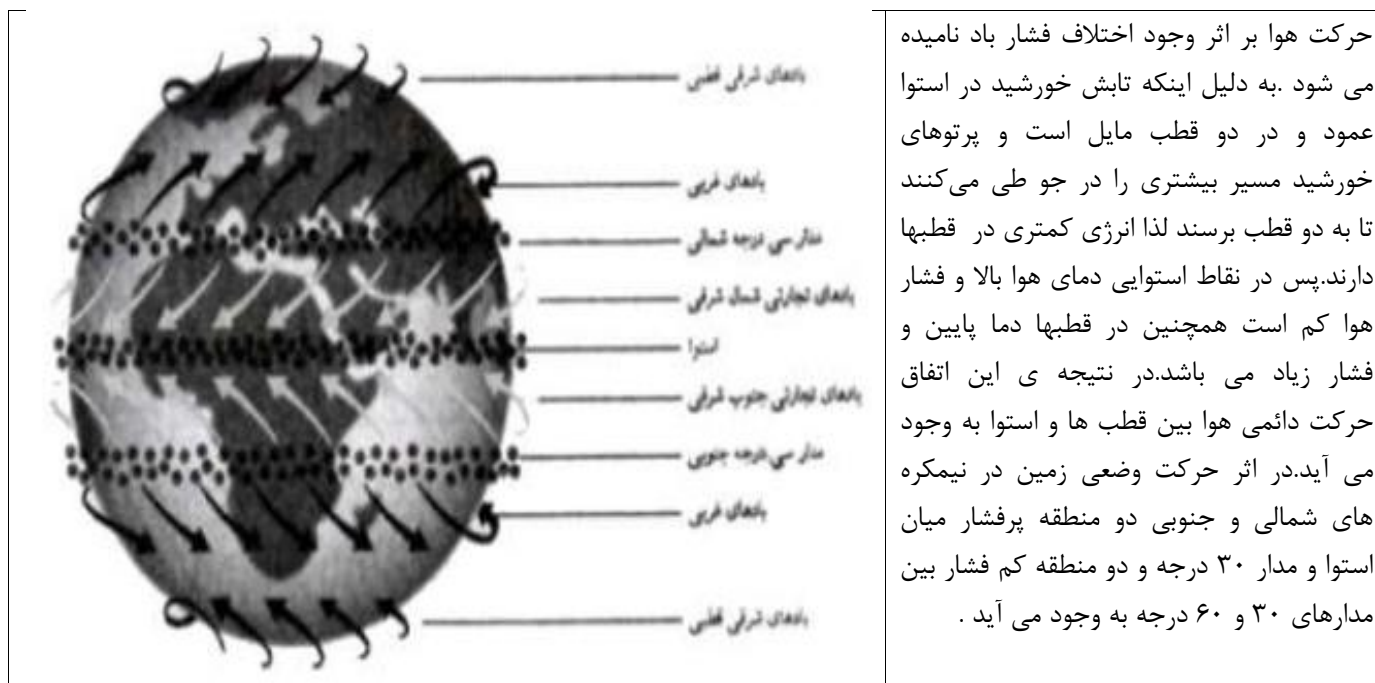
ظرفیت نصب ایران در سال ۲۰۰۸ برابر 82 MW بوده که در دو محل منجیل (استان گیلان) و بینالود (استان خراسان رضوی) نصب شده است.

### ۱- ظرفیت نصب تولیدکننده‌های بزرگ دنیا بر حسب GW

رتبه	کشور	۲۰۰۵	۲۰۰۶	۲۰۰۷	۲۰۰۹
۱	آمریکا	9.15	11.60	16.82	25.17
۲	آلمان	18.43	20.62	22.25	23.90
۳	اسپانیا	10.03	11.63	15.15	16.74
۴	چین	1.23	2.60	5.91	12.21
۵	هند	4.43	6.27	7.85	9.59

پرتغال با ۱۸ ، اسپانیا با در سال ۲۰۱۱ کشورهای دانمارک با ۲۱ ، ۱۶ ، ایرلند با ۱۴ و آلمان با ۹ از نظر درصد تولید برق بادی از کل تولید انرژی الکتریکی در جایگاه‌های نخست قرار دارند. در سال ۲۰۱۱، ۸۳ کشور در دنیا از توان بادی برای تولید برق استفاده کرده‌اند

### ۲- منشاء ایجاد باد



حرکت هوا بر اثر وجود اختلاف فشار باد نامیده می‌شود. به دلیل اینکه تابش خورشید در استوا عمود و در دو قطب مایل است و پرتوهای خورشید مسیر بیشتری را در جو طی می‌کنند تا به دو قطب برسند لذا انرژی کمتری در قطبها دارند. پس در نقاط استوایی دمای هوا بالا و فشار هوا کم است همچنین در قطبها دما پایین و فشار زیاد می‌باشد. در نتیجه ی این اتفاق حرکت دائمی هوا بین قطب ها و استوا به وجود می‌آید. در اثر حرکت وضعی زمین در نیمکره های شمالی و جنوبی دو منطقه پرفشار میان استوا و مدار ۳۰ درجه و دو منطقه کم فشار بین مدارهای ۳۰ و ۶۰ درجه به وجود می‌آید .

### ۳- انواع بادهای

**بادهای محلی:** بادهایی هستند که در ناحیه های خاصی می وزند ، مانند باد صد و بیست روزه سیستان . باد ملایمی ( نسیم ) که میان دریا و خشکی می وزد ، یکی از انواع بادهای محلی است . باد ملایمی که میان کوه و دره می وزد ، نیز از بادهای محلی است .

**بادهای موسمی:** بادهای موسمی بر اثر گرم شدن سطح خشکی های زمین در تابستان و سرد شدن آنها در زمستان به وجود می آیند . در تابستان که خشکی ها گرمتر از اقیانوس ها هستند ، بادهای موسمی از اقیانوس به سمت خشکی می وزند . در زمستان ، جریان بادهای موسمی از خشکی به سمت دریاست . مثل بادهای مانسون در جنوب و جنوب شرقی آسیا.

**بادهای تجارتي:** از منطقه پر فشار مدار ۳۰ درجه نیمکره شمالی و جنوبی به سمت منطقه کم فشار استوا می وزند . جریان بادهای تجارتي دائمی است . در گذشته کشتی های بادبانی تجارتي ، برای حرکت ، از نیروی دائمی این بادهای استفاده می کردند. جهت این بادهای در هر دو نیمکره از شرق به غرب است.

**بادهای غربی:** از منطقه پر فشار مدار 30 درجه به سمت منطقه کم فشار مدار 60 درجه می وزند . در نیمکره شمالی این بادهای از جنوب غربی و در نیمکره جنوبی از شمال غربی می وزند.

#### ۴- تاریخچه

بشر از زمانهای بسیار دور به نیروی باد پی برده بود. اولین آسیاب بادی با محور قائم برای آرد کردن غلات ، ۲۰۰ سال قبل از میلاد مسیح توسط ایرانیان بنا گردید. اولین کرجی که با نیروی باد کار می کرد ، توسط مصریان ساخته شد. بعدها از باد برای آبیاری به منظور آبیاری ، آرد کردن غلات و سرانجام اره کردن چوب استفاده شد.

این انرژی قبل از انقلاب صنعتی به عنوان یک منبع انرژی مورد استفاده قرار می گرفت . در طی انقلاب صنعتی ، سوخته های فسیلی به سبب فراوانی ، ارزانی و بخصوص قابلیت حمل آنها ، جای انرژی بادی را گرفتند . بحران نفتی سال 1971 میلادی سبب گردید تا دوباره به انرژی باد روی آوردند و از برق حاصل از آن برای اتصال به شبکه برق ، پمپ کردن آب و سرانجام تامین برق نواحی دور افتاده استفاده کنند.

نخستین توربین بادی با کاربرد تولید برق، یک ماشین شارژ باتری بود که در ژوئیه ۱۸۸۷ توسط یک مهندس اسکاتلندی به نام جیمز بلایث ساخته شد. چند ماه بعد، مخترع آمریکایی چارلز فرانسیس براش نخستین توربین باد خودکار را برای تولید برق در در اوهایو ساخت. در سال 1980 با اتصال توربین های بادی مولد برق به شبکه ، اولین بازار چند مگاواتی انرژی بادی در کالیفرنیا به وجود آمد.

#### ۵- انواع توربین

الف- توربین های با محور عمودی (VAWT) Vertical – axis turbine

اولین توربین ها براساس ساختار عمودی ساخته شد. محور اصلی این توربین ها بر راستای وزش باد عمود است انواع مختلفی از این توربین ها وجود دارد که ساوینیوس، داریوس، صفحه ای و کاسه ای از این دسته اند . معمولا VAWT شامل روتور نوع Darrius هستند.

**مزایا:** تعمیر و نگهداری آسان به دلیل نصب شدن ژنراتور و گیربکس روی زمین ، دریافت باد از هر جهت . نیازی به تنظیم جهت قرارگیری نسبت به جهت وزش باد ندارند ، طراحی ساده پره ها و هزینه کم ساخت ، وزن کم ، قیمت برج ارزانتر، نویز کمتر

**معایب:** کم بودن سرعت دورانی آنها و در نتیجه زیاده بودن گشتاور و هزینه بیشتر سیستم انتقال توان ، شوک بالا ، راندمان پایین

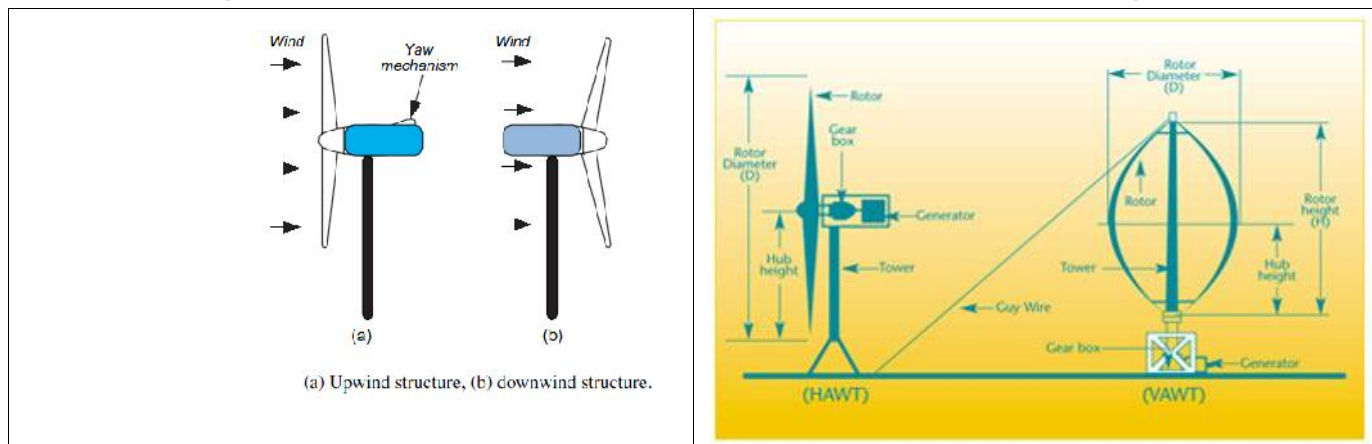
ب- توربین های با محور افقی (HAWT) Horizontal-axis wind turbines

توربین های مدرن امروزی براساس ساختار محور افقی ساخته شده اند. این توربین ها روی برج ها نصب می شوند. با استفاده از برج ها توربین در معرض بادهای شدیدتر قرار گرفته و دریافت انرژی افزایش می یابد.

**مزایا:** بازده بالاتر، قابلیت تولید انرژی در سرعت کم، نسبت هزینه بر توان کمتر.

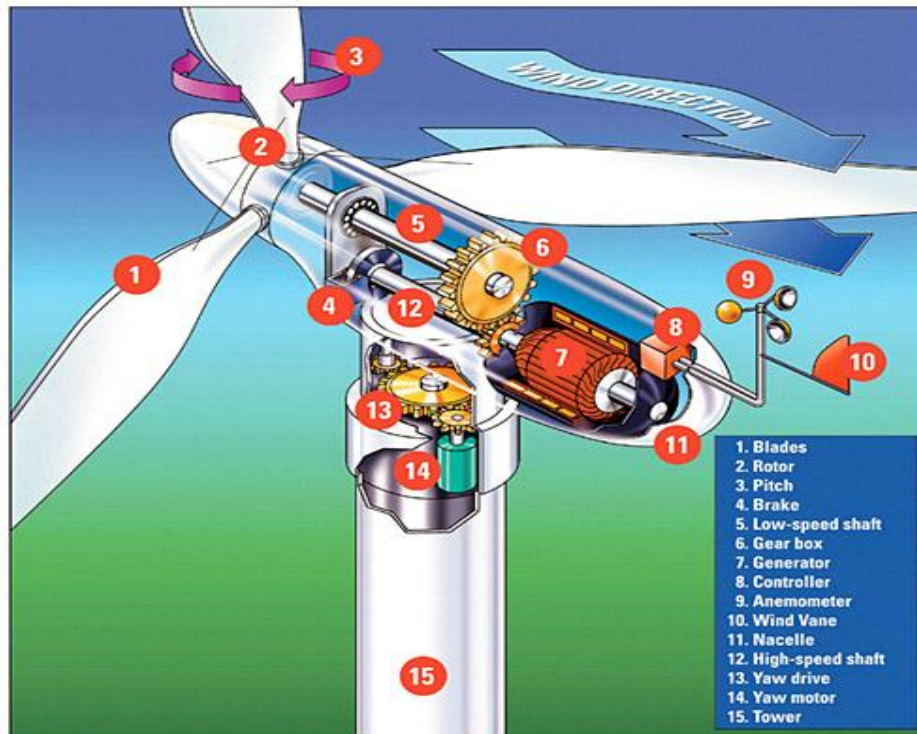
**معایب:** ژنراتور و گیربکس باید روی یک برج نصب شود که نتیجه ی آن تعمیر و نگهداری دشوارتر است، طراحی پیچیده به دلیل احتیاج به درایو تعقیب کننده جهت باد، هزینه بالاتر

توربین های با محور افقی خود به دو دسته ی ۱- خلاف جهت باد (رو به باد) و ۲- در جهت باد (پشت به باد) تقسیم می شوند.



## ۶- اجزاء توربین بادی افقی

- ۱- پره ها (Blades): بیشتر توربین ها دارای دو یا سه پره می باشند. وزش باد به پره ها باعث بلند کردن و چرخش پره ها می شود. با افزایش تعداد پره ها بازده آیرودینامیکی افزایش می یابد مثلاً دو پره 6% بازده بیشتر نسبت به یک پره و سه پره 3% بیشتر نسبت به دو پره دارد ولی بیشتر از این صرفه ندارد.
- ۲- روتور (Rotor): به مجموعه پره ها و هاب روتور می گویند.
- ۳- Pitch: به حرکت در می آیند تا سرعت باد را ثابت نگه دارند و در سرعت بالا و پایین امکان تولید برق وجود داشته باشد.
- ۴- ترمز (Brake): از این وسیله برای توقف روتور در مواقع اضطراری استفاده می شود. عمل ترمز کردن می تواند بصورت مکانیکی الکتریکی یا هیدرولیکی انجام گیرد.
- ۵- شفت با سرعت پایین (Low – speed shaft): روتور حول این محور چرخیده و سرعت آن 30-60 rpm است.
- ۶- Gear Box: از یک طرف به شفت سرعت پایین متصلند و از طرف دیگر به شفت سرعت بالا و تبدیل دور از 30-60 rpm به 1200-1500 rpm را انجام می دهند.
- ۷- Generator: وظیفه آن تولید برق متناوب می باشد.
- ۸- Controller: کنترلر در یک بازه سرعت مشخص ژنراتور را راه اندازی می کنند.
- ۹- باد سنج (Anemometer): سرعت باد را اندازه گرفته و اطلاعات را به کنترل کننده ها می دهد.
- ۱۰- بادنما (Wind vane): جهت وزش باد را تعیین می کند و کمک می کند جهت توربین نسبت به باد در وضعیت مناسبی قرار گیرد.
- ۱۱- Nacelle: قسمت اصلی توربین بادی که روتور به آن متصل است را ناسل می گویند. ناسل در بالای برج قرار دارد، شامل جعبه دنده، شافت اصلی ژنراتور، بخش کنترل و ترمز است.
- ۱۲- شفت با سرعت بالا (High – speed shaft): وظیفه آن به حرکت در آوردن ژنراتور می باشد.
- ۱۳- درایو انحراف (Yaw drive): وسیله ایست که وضعیت توربین را هنگامیکه باد در خلاف جهت می وزد کنترل می کند و زمانی استفاده می شود که قرار است روتور در مقابل وزش باد از روبرو قرار گیرد اما زمانی که باد در جهت توربین می وزد نیازی به استفاده از این وسیله نمی باشد.
- ۱۴- موتور انحراف (Yaw motor): برای به حرکت در آوردن درایو انحراف مورد استفاده قرار می گیرد.
- از سیستم کنترل Yaw برای توربین های توان بالا استفاده می شود. توربین های با توان پایین wind vane این کار را انجام می دهد.
- ۱۵- برج (Tower): برجهای معمولاً از فولاد استوانه ای یا شبکه ای از میله های فولادی ساخته می شوند



## ۷- تقسیم‌بندی نیروگاه بادی

نوع نیروگاه	ظرفیت ( KW )	قطر روتور بطور میانگین	توضیحات
کوچک	80 KW	تا ۲۰ متر	نیروگاه های خصوصی (خانه ها، مزارع )
متوسط	750 KW 80	از ۲۰ تا ۴۵ متر	تعاونی های تولید برق بادی یا شرکتهای خصوصی که به شبکه سراسری برق می دهند
بزرگ	750 KW	بیشتر از ۴۵ متر	نیروگاه های بادی به شکل دولتی

## ۸- مزارع بادی

**تعریف:** گروهی از توربین های بادی در یک منطقه که تولید برق می کنند.

چون ظرفیت توربین ها در مقایسه با نیروگاه های متداول سوخت فسیلی ( نفت کوره، گاز و ذغال سنگ) پائین است در عمل تعدادی از این توربینها به صورت یک مزرعه بادی بکار گرفته می شوند. که معمولاً شبکه سراسری برق را تغذیه می نمایند. انواع آن عبارتند از:

۱- **Onshore**: در فاصله بیش از 3Km از خط ساحلی و در دامنه نواحی کوهستانی یا تپه ای نصب می شوند. از شتاب گرفتن باد در دامنه استفاده می کنند.

۲- **near shore**: در فاصله کمتر از 3Km از ساحل در خشکی و 10 Km در آب نصب می شوند. از جریان دائمی باد بین دریا و ساحل استفاده می کنند. مشکلات این نیروگاه ها: وجود پرندگان مهاجر و آشیانه سازی آنها، زیست بوم های جانوران آبی، نویز، حمل و نقل ( دریانوردی و قایق رانی ) و زیبایی شناسی بصری است.

۳- **Offshore**: در فاصله بیش از 10 Km در دریا نصب می شوند. آب درجه سختی کمتری دارد و سرعت باد در دریا بیشتر است پس می توان از ارتفاع کمتری استفاده کرد. مشکلات این نیروگاه ها: هزینه بالای نصب، بلند بودن ارتفاع برج به دلیل نصب در زیر آب، ساخت بنای زیر آبی در نیروگاه های دور از ساحل گرانتر است. هزینه نگهداری و حفاظت در برابر خوردگی ناشی از شوری آب. تعمیرات و نگهداری دشوار. مزارع offshore تا سال ۲۰۱۰ در ۱۲ کشور (۱۰ کشور اروپایی و چین و ژاپن) وجود داشت.

بزرگترین مزرعه ساحلی دنیا: Roscoe Wind Farm u.s با ظرفیت 781.5 MW

بزرگترین مزرعه offshore دنیا: Walney Wind Farm u.k با ظرفیت 367 MW و London Array با 630 MW بزرگترین پروژه ی offshore در دست ساخت است.

## ۹- توان توربین بادی

$$p = \frac{1}{2} \rho \times \alpha \times A \times V^3$$

V: سرعت باد بر حسب متر بر ثانیه، A: سطح جاروب شده بر حسب متر مربع،  $\alpha$ : ضریب راندمان، چگالی هوا ( $\text{Kg/m}^3$ )

- با توجه به اینکه توان توربین به چگالی وابسته است لذا توان توربین در سرعت مساوی در تابستان و زمستان فرق دارد

- ثابت می شود مقدار ضریب راندمان هیچ توربین بادی از 59.3% تجاوز نخواهد کرد

- به عنوان مثال برای یک توربین با شعاع ۵۰ متر و سرعت باد ۸ متر بر ثانیه و چگالی 1.225 کیلو گرم بر متر مکعب حداکثر توان خروجی حداکثر برابر 1.45 MW است

## ۱۰- منحنی توان توربین

Cut-in wind speed

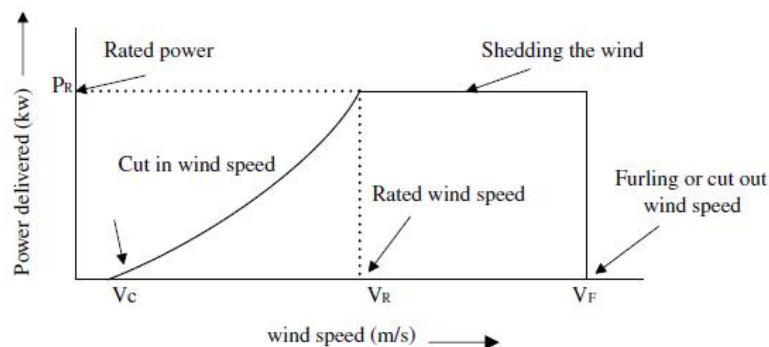
وقتی که سرعت باد کمتر از سرعت  $V_c$  - in (cut) باشد توربین های بادی نمی توانند کار خود را شروع کنند. توان موجود در باد با سرعت کم برای غلبه بر اصطکاک توربین کافی نیست. ژنراتور قادر به تولید توان مفید در سرعت های کمتر از  $V_c$  نیست. (4 m/s)

Rated wind speed

با افزایش سرعت، توان دریافتی توسط توربین با مکعب سرعت افزایش می یابد تا اینکه در  $V_R$  ژنراتور توان نامی را دریافت می کند. با افزایش سرعت از  $V_R$  باید توان دریافتی توسط ژنراتور کنترل شود و الا ژنراتور آسیب می بیند. (15 m/s)

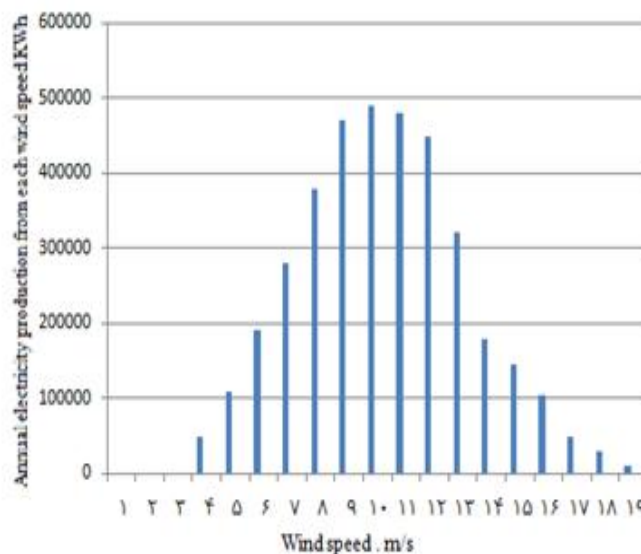
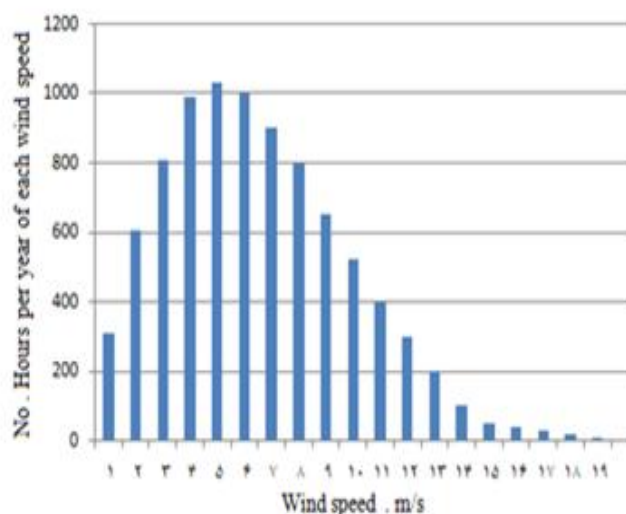
Cut-out wind speed

زمانی که سرعت باد از حدی بالاتر رود ( $V_F$ ) Cut-out باید توربین کاملاً از کار بیافتد (Shut down) والا احتمال صدمه دیدن توربین وجود دارد. (25 m/s)



Idealized power curve.

## ۱۱- تعیین دقیق توان توربین بادی



## ۱۲- تعیین سرعت باد:

ارزیابی دقیق سرعت کاری پرهزینه است با استفاده از روش‌های زیر می‌توان سرعت توربین را ارزیابی نمود:

- ۱- با استفاده از سرعت باد در همسایگی سایت و استفاده از روش‌های درون‌یابی و برون‌یابی
- ۲- استفاده از نقشه‌ها و اطلس‌های سرعت باد
- ۳- مدل‌های کامپیوتری شبیه‌سازی جریان باد.

## ۱۳- پروژه‌های مربوطه

- ۱- طراحی یک توربین بادی
- ۲- بررسی ژنراتورهای مختلف مورد استفاده در توربین بادی و روش‌های تزریق انرژی به شبکه سراسری.
- ۳- بررسی روش‌های مختلف گرفتن حداکثر توان از ژنراتور بادی
- ۴- طراحی یک توربین خانگی
- ۵- بررسی تاثیر نیروگاه بادی بر پایداری شبکه.