**به نام خدا**

# نیروگاه‌های بادی

مولف :

**حامد کریم زاده سورشجانی**

انتشارات ارسطو

(سازمان چاپ و نشر ایران – ۱۴۰۲)

**نسخه الکترونیکی این اثر در سایت سازمان چاپ و نشر ایران و اپلیکیشن کتاب رسان موجود می باشد**

**chaponashr.ir**

سرشناسه : کریم‌زاده سورشجانی، حامد، ۱۳۷۶-
عنوان و نام پدیدآور : نیروگاه‌های بادی/مولف حامد کریم‌زاده‌سورشجانی.
مشخصات نشر : ارسطو ( سامانه اطلاع رسانی چاپ و نشر ایران )، ۱۴۰۲.
مشخصات ظاهری : ۲۲۳ص.: مصور (بخشی رنگی)، جدول، نمودار.
شابک : ۶-۴۵۴-۳۳۹-۶۲۲-۹۷۸
وضعیت فهرست نویسی : فیپا
یادداشت : واژه‌نامه.
یادداشت : کتابنامه: ص. ۲۲۱.
موضوع : نیروگاه‌های بادی
Wind power plants
توربین‌های بادی
Wind turbines
رده بندی کنگره : TK۱۵۴۱
رده بندی دیویی : ۶۲۱/۳۱۲۱۳۶
شماره کتابشناسی ملی : ۹۴۳۰۹۵۷
اطلاعات رکورد کتابشناسی : فیپا

نام کتاب : نیروگاه‌های بادی
مولف : حامد کریم زاده سورشجانی
ناشر : ارسطو ( سامانه اطلاع رسانی چاپ و نشر ایران )
صفحه آرایی، تنظیم و طرح جلد: پروانه مهاجر
تیراژ : ۱۰۰۰ جلد
نوبت چاپ : اول – ۱۴۰۲
چاپ : زبرجد
قیمت : ۱۸۰۰۰۰ تومان
فروش نسخه الکترونیکی - کتاب‌رسان :
https://chaponashr.ir/ketabresan
شابک : ۶-۴۵۴-۳۳۹-۶۲۲-۹۷۸
تلفن مرکز پخش : ۰۹۱۲۰۲۳۹۲۵۵
www. chaponashr. ir

انتشارات ارسطو
چاپ و نشر ایران
Chaponashr.ir

**تقدیم به**

**ساحت مقدس حضرت ولی‌عصر (عجل‌الله تعالی فرجه)**

## پیشگفتار

بازار تأمین انرژی یک بازار رقابتی است که در آن تولید برق در نیروگاه‌های بادی در مقایسه با نیروگاه‌های سوخت‌های فسیلی برتری‌های نوینی را پیش روی کاربران قرار داده است. از برتری‌های نیروگاه‌های بادی این است که در طول مدت زمان عمر خود، سال‌های زیادی را بدون نیاز به هزینه سوخت تولید خواهند کرد، در حالی که هزینه دیگر منابع تولید انرژی در طول این سال‌ها افزایش خواهند یافت. فعالیت‌های گسترده بسیاری از کشورهای جهان برای تولید الکتریسیته از انرژی باد، سرمشقی برای دیگر کشورهایی است که در این زمینه راه درازی در پیش دارند. بسیاری از مناطق اقتصادی درحال‌رشد در منطقه آسیا واقع شده‌اند و اقتصاد رو به رشد کشورهای آسیایی از جمله ایران، باعث شده تا این کشورها بیش از پیش به تولید الکتریسیته احساس نیاز کرده و اقدام به تولید الکتریسیته از منابع غیر فسیلی کنند. در کتاب حاضر سعی شده است تا ضمن شناخت نیروگاه‌های بادی، جدیدترین دستاوردهای علمی در زمینه انرژی بادی ارائه گردد. این کتاب از ۷ فصل تشکیل شده است که حاصل تجربه‌های عملی و پژوهش‌های دانشگاهی هست که باتوجه‌به اهمیت نیروگاه‌های بادی در کشور به‌صورت مجموعه‌ای مدون تقدیم حضور خوانندگان محترم می‌شود.

مخاطبین اصلی این کتاب پژوهشگران و دانشجویان رشته‌های مهندسی مکانیک، مهندسی برق، مهندسی عمران و مهندسی انرژی است.

در این کتاب ابتدا به معرفی کلی و تاریخچه‌ای از نیروگاه‌های بادی اشاره مفید و مختصری شده است سپس در ادامه فصل اول مزایا و معایب توان بادی توضیح داده شده است. فصل دوم این کتاب انواع توربین را دسته‌بندی و معرفی کرده است. فصل سوم ساختار امولاتور توربین را به طور مفصل شرح داده و جدیدترین پژوهش‌ها در این زمینه را معرفی و بررسی کرده است. در فصل چهارم، به بیان مشخصات و انواع توربین‌های بدون پره پرداخته شده است. فصل پنجم کتاب به تفصیل به بررسی ژنراتورهای بادی در توربین پرداخته است. فصل ۶ کتاب نیروگاه‌های بادی اصول انتقال انرژی از نیروگاه‌های بادی و سیستم‌های کلکتور را بیان کرده است. در نهایت در فصل انتهایی در مورد هوشمندسازی نیروگاه‌های بادی بحث شده است.

خوانندگان محترم می‌توانند دیدگاه‌ها و نظرات ارزشمند خویش را پیرامون این کتاب به آدرس hamedkarimzade.s@gmail.com ارسال نمایند.

# فهرست

**فصل ۱: مقدمه‌ای بر نیروگاه‌های بادی..... ۱۶**

۱-۱- مقدمه ..... ۱۶

۱-۲- روند گسترش مزارع بادی در جهان ..... ۱۷

۱-۳- مزایای استفاده از توان بادی ..... ۱۸

۱-۴- معایب استفاده از توان بادی ..... ۱۸

۱-۵- حضور نیروگاه‌های بادی در بازار برق ..... ۱۹

۱-۶- باد و منبع انرژی آن ..... ۲۰

۱-۷- انواع بادها ..... ۲۳

۱-۷-۱- بادهای محلی ..... ۲۳

۱-۷-۲- بادهای موسمی ..... ۲۳

۱-۷-۳- بادهای تجارتی ..... ۲۴

۱-۷-۴- بادهای غربی ..... ۲۴

۱-۸- طبقه بندی بادها بر اساس میزان نیرو ..... ۲۵

۱-۹- تاریخچه استفاده از انرژی باد ..... ۲۵

۱-۱۰- مشخصه‌های نیروگاه‌های بادی ..... ۲۷

۱-۱۰-۱- توزیع سرعت باد ..... ۲۷

۱-۱۰-۲- محدودیت‌های تولید ..... ۲۸

۱-۱۰-۳- ضریب ظرفیت ..... ۲۸

۱-۱۰-۴- پیش‌بینی‌پذیری ..... ۲۹

۱-۱۱- ظرفیت‌های انرژی باد ..... ۲۹
۱-۱۲- توربین بادی ..... ۳۳
۱-۱۲-۱- کاربردهای غیر نیروگاهی ..... ۳۳
۱-۱۲-۲- کاربردهای نیروگاهی ..... ۳۳
۱-۱۳- انواع توربین‌های بادی ..... ۳۳
۱-۱۳-۱- تقسیم بندی از نظراندازه ..... ۳۴
۱-۱۳-۲- تقسیم بندی توربین‌های بادی از نظر استقرار ..... ۳۵
۱-۱۴- مقیاس نیروگاههای بادی ..... ۳۷
منابع فصل ۱ ..... ۳۸

**فصل ۲: توربین‌های بادی..... ۳۹**

۲-۱- مقدمه ..... ۳۹
۲-۲- دسته‌بندی توربین‌های بادی از نظر سرعت چرخش ..... ۴۱
۲-۲-۱- توربین‌های بادی سرعت ثابت ..... ۴۱
۲-۲-۲- توربین‌های بادی سرعت متغیر ..... ۴۲
۲-۳- دسته‌بندی توربین‌های بادی از نظر محور چرخش روتور ..... ۴۵
۲-۳-۱- توربین بادی محور عمودی ..... ۴۶
۲-۳-۲- توربین بادی محور افقی ..... ۵۳
۲-۴- توربین‌های مقیاس کوچک، متوسط و بزرگ ..... ۵۷
۲-۵- توربین‌های رو به باد و پشت به باد ..... ۵۷

۲-۶- توربین‌های فاقد سیستم yaw و شامل سیستم yaw ..... ۵۸
۲-۷- ساختمان توربین بادی ..... ۵۸
۲-۸- روابط محاسباتی توربین ..... ۶۱
منابع فصل ۲ ..... ۶۸

**فصل ۳: ساختار امولاتور توربین بادی ..... ۶۹**

۳-۱- مقدمه ..... ۶۹
۳-۲- امولاتور توربین بادی ..... ۶۹
۳-۳- سخت‌افزار پیاده‌سازی شده ..... ۷۱
۳-۳-۱- مبدل (back to back convertor) ..... ۷۲
۳-۳-۲- قسمت محرک ..... ۷۹
۳-۳-۳- ژنراتور الکتریکی ..... ۸۰
۳-۳-۴- موتور الکتریکی ..... ۸۱
۳-۳-۵- پایه فلزی قسمت محرک ..... ۸۲
۳-۳-۶- درایو ..... ۸۲
۳-۴- نرم‌افزار مورد استفاده ..... ۸۵
۳-۴-۱- معرفی نرم‌افزار LabVIEW ..... ۸۵
۳-۴-۲- دلایل استفاده از نرم‌افزار LabVIEW ..... ۸۶
۳-۴-۳- کاربردهای نرم‌افزارLabVIEW ..... ۸۶
۳-۵- برقراری ارتباط بین سخت‌افزار و نرم‌افزار ..... ۸۶

۳-۵-۱- برقراری ارتباط از طریق درگاه سریال ..... ۸۷
۳-۵-۲- برقراری ارتباط از طریق کارت (General Purpose Interface Bus) GPIB ..... ۸۷
۳-۵-۳- برقراری ارتباط از طریق کارت DAQ (Data Acquisition) ..... ۸۷
۳-۵-۴- نحوهٔ انتخاب کارت DAQ مورد نظر ..... ۸۸
۳-۶- اصول مدل‌سازی گشتاور خروجی توربین بادی ..... ۸۹
۳-۷- مدل‌سازی گشتاور خروجی توربین بادی ..... ۸۹
۳-۸- مدل استاتیکی توربین بادی ..... ۹۰
۳-۸-۱- توان و گشتاور توربین بادی ..... ۹۰
۳-۹- مدل دینامیکی توربین بادی ..... ۹۳
۳-۹-۱- گرادیان باد ..... ۹۳
۳-۹-۲- سایه برج ..... ۹۵
۳-۹-۳- تعیین میدان باد مجموع ..... ۹۸
۳-۹-۴- فرموله کردن سرعت باد معادل برمبنای گشتاور معادل ..... ۹۹
۳-۹-۵- تعیین سرعت باد معادل ..... ۱۰۰
۳-۹-۶- گشتاور نوسانی ..... ۱۰۲
۳-۱۰- سیستم امولاتور پیاده‌سازی شده ..... ۱۰۴
مسائل فصل ۳ ..... ۱۰۵
منابع فصل ۳ ..... ۱۰۶

**فصل ۴: توربین‌های بادی بدون پره..... ۱۰۷**

۴-۱- ضرورت توسعه انرژی‌های تجدیدپذیر ..... ۱۰۷

۴-۲- توربین بادی با محور افقی ..... ۱۰۹

۴-۳- توربین‌های بادی بدون پره ..... ۱۱۰

۴-۴- توضیحات مختصری در مورد سازوکار سنسورهای پیزوالکتریک..... ۱۲۳

۴-۵- مقایسه توربین‌های بادی بدون پره با توربین‌های بادی پره‌دار در مقیاس کوچک ..... ۱۲۸

۴-۶- برداشت انرژی..... ۱۳۰

۴-۷- سازوکار تبدیل پیزوالکتریک ..... ۱۳۱

۴-۸- انواع پدیده‌های آیرودینامیکی..... ۱۳۴

۴-۸-۱- فلاتر..... ۱۳۶

۴-۸-۲- ارتعاشات ناشی از گردابه..... ۱۳۸

۴-۸-۳- گلوپینگ ..... ۱۴۱

۴-۸-۴- بافتینگ..... ۱۴۲

۴-۹- خواص ارتعاشی توربین ..... ۱۴۴

۴-۱۰- نحوه و شرایط چینش اجزا ..... ۱۴۴

۴-۱۱- هندسه جسم ضخیم ..... ۱۴۸

۴-۱۲- بررسی عوامل فیزیکی و محیطی ..... ۱۵۱

منابع فصل ۴ ..... ۱۵۷

**فصل ۵: ساختار توربین - ژنراتورهای بادی..... ۱۵۸**

۵-۱- مقدمه ..... ۱۵۸

۵-۲- مدل آئرودینامیک توربین‌های بادی ..... ۱۵۸

۵-۳- اجزای توربین- ژنراتور بادی ..... ۱۶۳

۵-۴-ساختارهای مختلف توربین- ژنراتورهای بادی ..... ۱۶۶

۵-۴-۱- روش‌های کنترل توان مکانیکی ورودی ..... ۱۶۶

۵-۴-۲-ساختارهای کنترل سرعت روتور ..... ۱۶۷

۵-۴-۳- بررسی ساختارهای توربین- ژنراتور موجود در صنعت ..... ۱۷۱

۵-۵- ماشین‌های مورد استفاده در ساختارتوربین- ژنراتورهای بادی ..... ۱۷۳

۵-۵-۱-ژنراتور آسنکرون (القایی) ..... ۱۷۳

۵-۵-۲- ژنراتور سنکرون ..... ۱۷۵

۵-۶- مدارهای واسطه الکترونیک‌قدرت مورد استفاده در توربین- ژنراتورهای بادی ..... ۱۷۶

۵-۶-۱- راه‌انداز نرم ..... ۱۷۶

۵-۶-۲- مبدل‌های الکترونیک قدرت ..... ۱۷۶

منابع فصل ۵ ..... ۱۷۹

**فصل ۶: سیستم‌های کلکتور و انتقال انرژی نیروگاه بادی..... ۱۸۰**

۶-۱- مقدمه ..... ۱۸۰

۶-۲- تعریف مزرعه یا نیروگاه بادی ..... ۱۸۰

۶-۲-۱- سرعت باد و تقسیم‌بندی نیروگاه‌های بادی ..... ۱۸۲
۶-۲-۲- نیروگاه‌های فراساحل ..... ۱۸۳
۶-۳- سیستم‌های کلکتور نیروگاه‌های بادی ..... ۱۸۵
۶-۳-۱- سیستم‌های کلکتور ac ..... ۱۸۵
۶-۳-۲- سیستم‌های کلکتور dc ..... ۱۸۸
۶-۴- سیستم‌های انتقال توان ..... ۱۹۳
۶-۴-۲- سیستم انتقال HVAC ..... ۱۹۴
۶-۴-۳- سیستم انتقال HVDC ..... ۱۹۶
منابع فصل ۶ ..... ۲۰۳

**فصل ۷: هوشمندسازی توربین بادی ..... ۲۰۴**
۷-۱- مقدمه ..... ۲۰۴
۷-۲- مزایای هوشمندسازی توربین بادی ..... ۲۰۴
۷-۳- هوشمندسازی مکانیزم حرکتی توربین بادی ..... ۲۰۵
۷-۴- هوشمندسازی توربین بادی با استفاده از مکانیزم‌های مکانیکی ..... ۲۰۵
۷-۵- کنترل دور توربین با پره گام ثابت ..... ۲۰۵
۷-۶- سیستم پاریس - رون ..... ۲۰۷
۷-۷- کنترل آیرودینامو - ونتیموتور ..... ۲۰۸
۷-۸- کنترل دور توربین با پره گام متغیر ..... ۲۱۰
۷-۸-۱- کنترل ژاکوب ..... ۲۱۱

۷-۸-۲- کنترل دور روسی ..... ۲۱۱
۷-۸-۳- به‌کارگیری کاورنر ..... ۲۱۲
۷-۸-۴- کنترل دور با استفاده از سرو موتور ..... ۲۱۲
۷-۹- هوشمندسازی توربین بادی با استفاده از حسگر ..... ۲۱۳
منابع فصل ۷ ..... ۲۲۱
واژه نامه ..... ۲۲۲

# علائم اختصاری

| | |
|---|---|
| $D$ | rotor diameter (m) |
| $R$ | rotor radius (m) |
| $A$ | rotor swept area ($m^2$) |
| $H$ | height (hub height) (m) |
| $\Phi$ | wind speed frequency distribution (%) |
| $A$ | scale parameter (wind speed distribution) (m/s) |
| $k$ | form (shape) parameter (wind speed distribution) (—) |
| $\sigma_o$ | turbulence intensity (%) |
| $\alpha$ | wind shear exponent (—) |
| $p$ | air pressure (mbar) |
| $t$ | temperature (°C) |
| $\varrho$ | air density ($kg/m^3$) |
| $\nu$ | kinematic air viscosity ($m^2/s$) |
| $v_w$ | wind speed (m/s) |
| $\bar{v}_w$ | mean (annual) wind speed (m/s) |
| $v_e$ | extreme wind speed (m/s) |
| $v_{(e),ref}$ | (extreme) reference wind speed (m/s) |
| $v_g$ | gust wind speed (m/s) |
| $v_{CI}$ | cut-in wind speed (m/s) |
| $v_{CO}$ | cut-out wind speed (m/s) |
| $v_{wR}$ | rated wind speed (m/s) |
| $v_{res}$ | relative flow velocity (m/s) |
| $n$ | rotor speed (rpm) |
| $\omega$ | angular velocity (deg/s) |
| $r$ | local rotor radius (m) |
| $r \cdot \omega$ | local tangential velocity (m/s) |
| $\alpha$ | angle of attack (deg) |
| $\vartheta$ | blade pitch angle (deg) |
| $\lambda$ | tip-speed ratio |
| $c$ | rotor blade chord length (m) |
| $L$ | aerodynamic lift (N) |
| $D$ | aerodynamic drag (N) |
| $M_T$ | aerodynamic torsional moment (Nm) |
| $T$ | thrust (force) (N) |

| | |
|---|---|
| $Q$ | torque (Nm) |
| $P$ | power (W) |
| $c_{\mathrm{P\,R}}$ | rotor power coefficient (—) |
| $c_{\mathrm{P}}$ | turbine power coefficient (—) |
| $c_{\mathrm{L}}$ | lift coefficient (—) |
| $c_{\mathrm{L\,D}}$ | design lift coefficient (—) |
| $c_{\mathrm{D}}$ | drag coefficient (—) |
| $c_{\mathrm{Q}}$ | rotor torque coefficient (—) |
| $c_{\mathrm{T}}$ | rotor thrust coefficient (—) |
| $c_{\mathrm{M}}$ | coefficient of aerodynamic torsional moment |
| $\psi$ | azimuth angle (of rotation) (deg) |
| $f$ | frequency (Hz) |
| $U$ | voltage (V) |
| $R$ | resistance (electrical) (Ω) |
| $I$ | current intensity (A) |
| $\varphi$ | phase angle (deg) |
| $n_{\mathrm{syn}}$ | synchronous speed (rpm) |
| $n_{\mathrm{mech}}$ | mechanical speed (rpm) |
| $s$ | slip (electrical) (—) |
| $\eta$ | efficiency (electrical, mechanical) (%) |
| $a$ | year |
| $E$ | annual energy yield (kWh/a) |

# فصل ۱

# مقدمه‌ای بر نیروگاه‌های بادی

## ۱-۱- مقدمه

بیش از ۵۵۰۰ سال است که بشر از انرژی باد برای تأمین نیازهای خود استفاده می‌کند. اولین استفادهٔ بشر از انرژی باد، به تأمین انرژی لازم برای حرکت کشتی‌ها و بعدها تهویهٔ هوای ساختمان‌ها برمی‌گردد. از قرن هفدهم میلادی اولین توربین‌های بادی برای آس‌های بادی نصب شد. از این توربین‌ها برای پمپ آب و آسیاب حبوبات استفاده می‌کردند. استفاده از باد برای تولید انرژی الکتریکی از قرن نوزدهم آغاز شد. در سال ۱۸۸۷، پروفسور جیمز بلیس[1] آزمایش‌هایی در این زمینه انجام داد. چارلز اف. براش[2] در ایالات متحده در سال ۱۸۸۸ یک مولد توان بادی ساخت که برق مورد نیاز منزل و آزمایشگاه وی را تا سال ۱۹۰۰ تأمین می‌کرد. در دهه‌ی ۱۸۹۰، دانشمندان دانمارکی و مخترعی به نام پاول لاکور [3]توربین‌های بادی را برای تولید انرژی الکتریکی ساختند. در نیمه اول قرن بیستم، توربین‌های بادی کوچک برای تأمین روشنایی روستاهای دور افتاده مورد استفاده قرار گرفت. واحدهای بزرگتری نیز برای اتصال به شبکه‌ی توزیع طراحی شد. واحد ۲۵/۱ مگاواتی نصب شده در ورمونت[4] در سال ۱۹۴۱ از این جمله است. صنعت توان بادی مدرن در سال ۱۹۷۹ از دانمارک آغاز شد. ظرفیت توربین‌های بادی ساخته شده توسط شرکت‌های دانمارکی در مقایسه با امروز خیلی کم بود و هر یک تنها قادر به تولید ۲۰ تا ۳۰

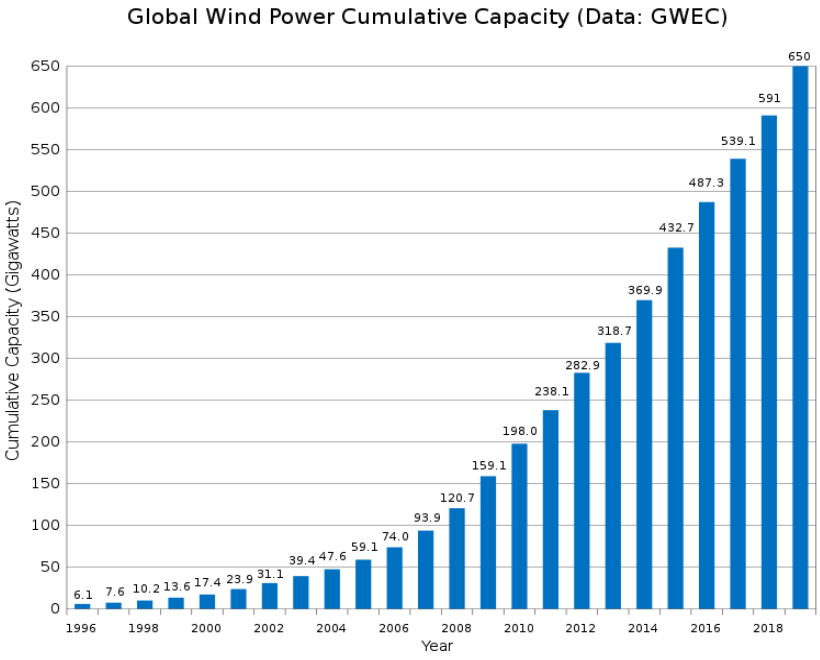
---

[1] Professor James Blyth
[2] Charles F. Brush
[3] Poul la Cour
[4] Vermont

کیلو وات توان بودند. از آن پس، کشورهای مختلفی به ساخت توربین‌های بادی ظرفیت بالا روی آوردند و با گذشت زمان توربین‌هایی با اندازه‌های خیلی بزرگ‌تر ساخته شد. بزرگ‌ترین توربینی که تاکنون ساخته شده ۷ مگاوات ظرفیت دارد. طول هر یک از پره‌های این توربین حدود ۸۰ متر است. هزینه‌ی ساخت توربین‌های بادی نیز به مرور زمان کاهش یافته به طوری که این هزینه نسبت به بیست سال پیش ۸۰ درصد کم‌تر شده است.

## ۱-۲- روند گسترش مزارع بادی در جهان

تمایل کشورها در جهان به استفاده از انرژی باد طی سالهای اخیر رشد چشم‌گیری داشته است. شکل ۱-۱ ظرفیت نصب شده‌ی توان بادی در جهان را از سال ۱۹۹۶ تا ۲۰۲۰ نشان می‌دهد.




شکل ۱-۱- میزان تولید توان بادی در سالیان اخیر

## ۱-۳- مزایای استفاده از توان بادی

نیاز روزافزون به انرژی از یک سو و محدودیت منابع انرژی فسیلی از سوی دیگر دولت‌های مختلف را بر آن داشته تا به دنبال جایگزینی مناسب برای سوخت‌های فسیلی باشند. یکی از این جایگزین‌ها بدون شک انرژی باد است. هر چند نیروگاه‌های هسته‌ای در سالهای اخیر به عنوان یکی از تولیدکنندگان مهم توان الکتریکی مطرح شده‌اند، اما هزینه‌ی بالای احداث و دفن زباله‌ی آنها، آلودگی زیست‌محیطی ناشی از پسماندهای هسته‌ای و به ویژه ترس از سوانح هسته‌ای و پیامدهای مخرب آن (مانند آنچه به صورت محدود در فوکوشیما و یا در چرنوبیل اتفاق افتاد) موجب مردد شدن دولت‌ها در استفاده از این منابع شده است. تولید انرژی الکتریکی از انرژی باد از گزینه‌های دیگر تأمین نیاز روزافزون انرژی است که دارای مزایای زیر است:

- ✓ توربین‌های بادی برخلاف نیروگاه‌های حرارتی آلاینده‌هایی مثل اکسیدهای سولفور و نیتروژن، جیوه، ذرات معلق و دی اکسیدکربن منتشر نمی‌کنند.
- ✓ توربین‌های بادی نیاز به استخراج زغال سنگ، تأمین اورانیوم، حفاری‌های مربوط به سوخت‌های فسیلی ندارند و ساخت و تعمیر سدهای آبی را کاهش می‌دهند.
- ✓ ساخت مزارع بادی به توسعه‌ی روستایی از طریق اجاره‌ی زمین‌های روستایی از صاحبان آنها کمک می‌نماید. در این صورت منبع درآمد اضافی برای این روستائیان فراهم خواهد شد.
- ✓ طرفداران توربین‌های بادی معتقدند این واحدها در مقایسه با سایر روش‌های تولید توان در ساخت، احداث، خدمات جانبی و... بیش‌تر به ایجاد اشتغال کمک می‌کنند.
- ✓ زمان ساخت این واحدها نسبت به واحدهای سنتی کم‌تر است.
- ✓ این منبع نامحدود بوده و می‌توانند نیاز بشر به انرژی را برای همیشه رفع سازند.
- ✓ برای بهره‌برداری به آب نیاز ندارند.

## ۱-۴- معایب استفاده از توان بادی

برخی معایب تولید انرژی الکتریکی از انرژی بادی به شرح زیر می‌باشد:

- توان تولیدی توسط نیروگاه بادی قابل پیش‌بینی به شکل دقیق نیست.
- نمی‌توان خروجی واحد بادی را به منظور کاهش یا افزایش تولید به میزان مطلوب کنترل کرد.

- بیشینه‌ی توان تولیدی این واحدها همزمان با پیک مصرف نیست.
- برای ایجاد مزارع بادی جدید در اغلب موارد زیرساخت‌های انتقال جدید مورد نیاز است.
- در اکثر نقاط جهان، اداره‌ی این واحدها نیاز به کمک‌های دولتی داشته و هزینه‌بر است.
- برخی از حامیان حقوق حیوانات معتقدند که این واحدها موجب مرگ‌ومیر پرندگان در اثر برخورد با پره‌های توربین می‌شوند؛ هر چند احتمال این برخوردها کم است.
- در مواردی این توربین‌ها با کار رادارها اختلال ایجاد کرده‌اند.
- ساخت این توربین‌ها با ظرفیت بالا ممکن است به دلیل تاثیر بر سرعت باد، عوارض زیست‌محیطی به بار آورد.

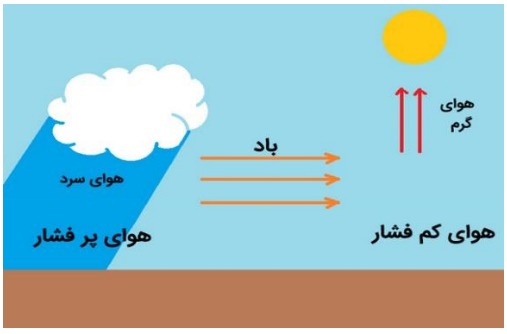
## ۱-۵- حضور نیروگاه‌های بادی در بازار برق

تجدید ساختار صنعت برق، نقطه‌ی عطفی در تاریخ این صنعت بود. با واگذاری واحدهای تولید توان به بخش خصوصی، امکان رقابت این شرکت‌ها به عنوان بازیگران بازار فراهم شد. در چنین بازاری هر شرکت کننده سعی می‌کند توان تولید شده خود را بسته به نوع بازار، به بیشترین میزان و یا قیمت ممکن بفروش برساند. در ابتدا، تجدید ساختار چالشی بزرگ پیش روی دولت‌ها که صاحبان نیروگاه‌های بادی بودند، قرار داد. این مشکل هزینه بالای تولید توان الکتریکی برای این واحدها بود که امکان رقابت این واحدها با سایرهای واحدهای شبکه را غیر ممکن ساخته بود. اما مزایای تولید توان از نیروگاه‌های بادی، دولت‌ها را برآن داشت تا به هر شکل ممکن، طی برنامه‌های بلند مدت، عرصه را برای افزایش گرایش سرمایه‌گذاران به سمت تولید توان بادی افزایش دهند. ابتدا، دولت‌ها تصمیم گرفتند خود ادارهی این واحدها را به عهده گرفته و این واحدها خارج از بازار و تمام توان تولیدی خود را بصورت مستقیم به شبکه تحویل دهند. به مرور زمان، برخی از این واحدها کم کم تحت شرایط خاصی (که باز هم حاکی از حمایت کامل دولت‌ها بود) به بخش‌های خصوصی واگذارشد. در این شرایط، واحدها همواره می‌توانستند تمام توان تولیدی خود را به شبکه تزریق کنند و بر اساس میزان تولیدی، قیمتی مانند قیمت حدی گرهی به علاوه مبلغی حمایتی را از دولت دریافت می‌کردند. این روش تا به امروز نیز در بسیاری از کشورها اجرا می‌شود. به مرور زمان، با پیشرفت تکنولوژی هزینه‌ی تولید این واحدها کاهش یافته است. به گونه‌ای که در مواردی، نیروگاه‌های بادی توانایی تبدیل شدن به بازیگران بازار را پیدا کردهاند. از طرفی حمایت‌های دولتی نیز در حال کاهش هستند. به عنوان، مثال در کالیفرنیا مبلغ حمایتی نیروگاه‌های بادی حذف شد و از سال

۱۹۹۹ این واحدها تنها قیمت حدی گرهی را دریافت می‌کنند. این مسائل کم کم نیروگاه‌های بادی را برآن داشت تا خود به عنوان بازیگر بازار وارد میدان شوند تا از این طریق بتوانند درآمد بیشتری را کسب کنند. این کار چند سالی است در اروپا و ایالات متحده آغاز شده است و دولت‌ها نیز مشغول ایجاد شرایط مناسب برای حضور این واحدها در بازار هستند. اما شرکت این واحدها با ظرفیت بالا در شبکه، به مرور زمان مشکلاتی برای بهره بردار سیستم ایجاد کرد.

## ۱-۶- باد و منبع انرژی آن

باد هوایی است که حرکت دارد و جابه جا می‌شود. منشا باد یک موضوع پیچیده است. از آنجایی که زمین بطور نامساوی به وسیله نور خورشید 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 خشکی‌ها زمین نسبت به دریاها زودتر گرم و زودتر سرد می‌شوند. در مناطق گرمسیر، تابش نور خورشید سبب افزایش حرارت محیط می‌گردد و در مناطق قطبی افت درجه حرارت بوجود می‌آید. اتمسفر بوسیله چرخش زمین حول محور PP خود که از قطبین زمین عبور می‌کند، و همچنین در عرض‌های مختلف کره زمین موجب تغییراتی در فشار و دمای هوا می‌شود و گرما را از مناطق گرمسیر به مناطق قطبی انتقال می‌دهد. در مقیاس جهانی، این جریانات اتمسفری به صورت یک عامل مهم انتقال گرما عمل می‌نماید. این تفاوت دمای جهانی موجب به وجود آمدن یک سیستم جهانی تبادل حرارتی خواهد شد که از سطح زمین تا هوا کره، که مانند یک سقف مصنوعی عمل می‌کند.




شکل ۱-۲- عامل بوجود آمدن باد