ماهر
MAHER

آشنایی با
نیروگاه بادی

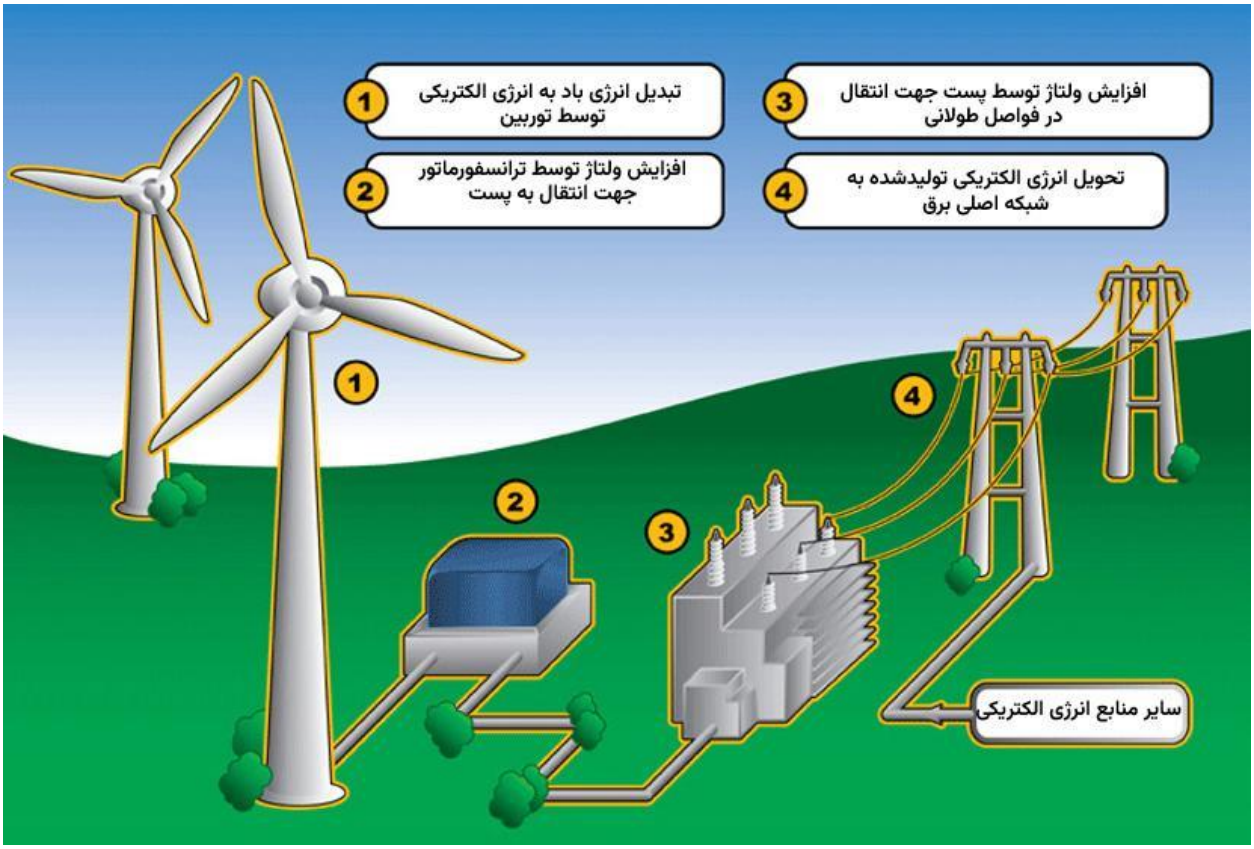
آشنایی با نیروگاه بادی و انواع آن

با گسترش روز افزون صنعت و جوامع بشری نیاز به انرژی الکتریکی بیش از پیش احساس می‌شود. در این بین از یک سو کاهش سوخت‌های فسیلی و لزوم تامین انرژی الکتریکی پایدار، و از سوی دیگر محدودیت‌های زیست محیطی ناشی از تغییرات شرایط جوی محققان و کارشناسان را بر آن داشته است که به شکل ویژه‌ای به تولید انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر روی بیاورند. بدون شک یکی از منابع انرژی‌های نو که به صورت گسترده‌ای توجه دانشمندان را به خود جلب کرده است، انرژی باد و استخراج الکتریسته از آن است. این امر موجب شکل‌گیری نسل جدیدی از واحدی‌های تولید انرژی الکتریکی به نام نیروگاه‌های بادی یا مزارع بادی شده است که در این مقاله به آنها پرداخته می‌شود.

آشنای با نیروگاه‌های بادی

نیروگاههای بادی (Wind Farms or Wind Parks or Wind Power Plants) که از آنها به عنوان مزارع بادی هم یاد می‌شود با داشتن مجموعه‌ای از توربین‌های بادی در یک مکان، برق تولید می‌کنند. محل قرارگیری نیروگاه بادی تحت تاثیر عواملی مانند شرایط باد، زمین اطراف، دسترسی به خطوط انتقال نیرو و سایر ملاحظات مکانی است. در یک نیروگاه بادی که در مقیاس بهره‌برداری قرار دارد، هر توربین بادی الکتریسیته تولید می‌کند که به یک پست برق می‌رود و سپس به شبکه سراسری منتقل می‌شود. به طور کلی، برای استخراج انرژی الکتریکی یک واحد بادی متشکل از چهار جز اصلی به شکل زیر است که در ادامه به بررسی، تجزیه و تحلیل هر بخش پرداخته می‌شود.

- مجموعه توربین‌های بادی
- ترانسفورماتورهای افزاینده
- پست افزاینده
- خطوط انتقال نیرو



شکل ۱ - نمای کلی از یک مزرعه بادی

مجموعه توربین‌های بادی

شاید یکی از مهمترین بخش‌های هر نیروگاه بادی، توربین‌های باشند که بواسطه آنها انرژی باد به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. لذا آشنایی با توربین‌های بادی و رفتار باد، اولین گام در درک عمیق‌تر و بهتر عملکرد واحدهای بادی است که در این بخش به آنها اشاره می‌شود.

انواع توربین‌های بادی

به طور کلی دو نوع اصلی توربین بادی وجود دارد:

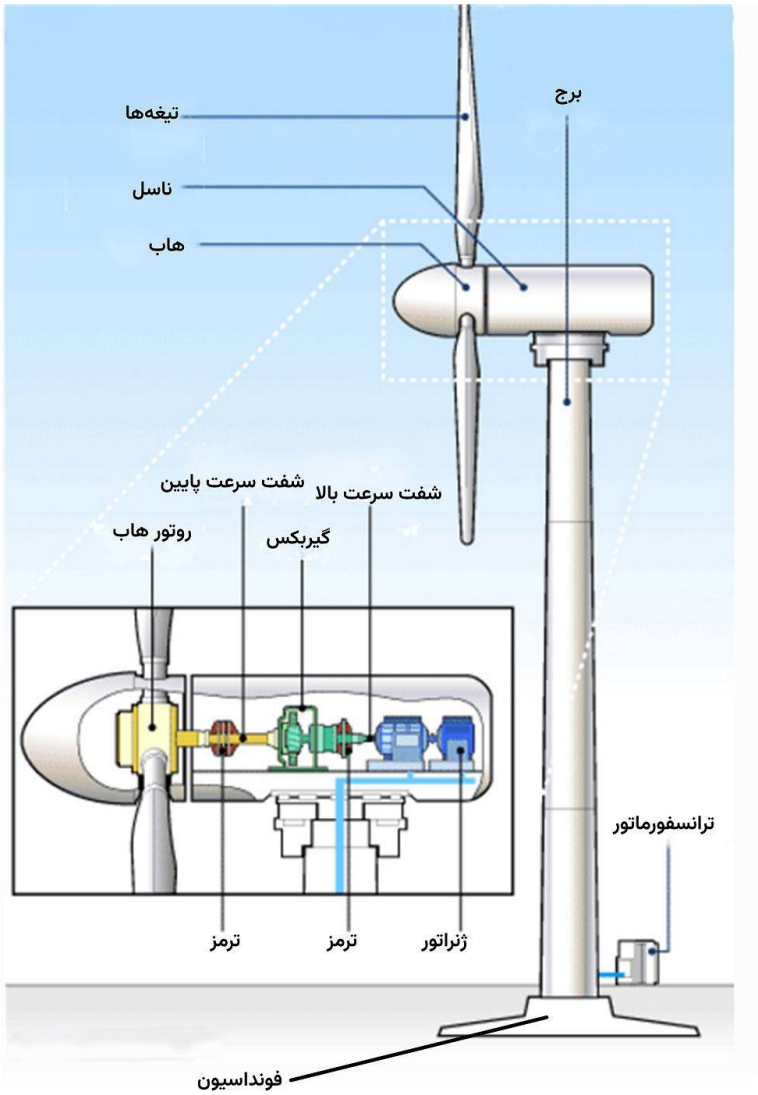
- توربین بادی با محور افقی: توربین‌های بادی با محور افقی رایج‌ترین و کارآمدترین نوع توربین‌های بادی هستند. آنها به طور معمول از سه تیغه ساخته می‌شوند. اجزای اصلی (مانند ژنراتور) در بالای توربین قرار دارند.
- توربین بادی با محور عمودی: توربین‌های بادی با محور عمودی همانطور که از نام آن‌ها پیداست، دارای شفت روتور عمودی هستند و ظاهر آن‌ها با توربین‌های بادی با محور افقی بسیار متفاوت

است. توربین‌های بادی با محور عمودی همه‌جانبه هستند، و بنابراین برای مواجهه با باد نیازی به تنظیم ندارند که این نکته می‌تواند در مکان‌هایی با جهت باد بسیار متغیر، مفید باشد. با این حال، استفاده از این نوع توربین بسیار محدود است زیرا از نظر مقاومت هوا کارایی کمتری دارند. در این نوع توربین‌ها، اجزای اصلی در پایه قرار دارند.

شکل ۲ - ظاهر توربین بادی با محور افقی (سمت راست) و توربین بادی با محور عمودی (سمت چپ)

ساختمان توربین‌های بادی

یک توربین بادی مجزا و اجزای آن در شکل زیر نشان داده شده است:



شکل ۳ - ساختمان یک توربین بادی

باید توجه داشت که شکل بالا یک توربین بادی با محور افقی را نشان می‌دهد. هر یک از اجزای اصلی یک توربین بادی با محور افقی در زیر به اختصار توضیح داده شده است.

- تیغه‌ها: تیغه‌های روتور از فایبرگلاس ساخته شده‌اند و یک توربین بادی معمولی دارای سه تیغه است. یک تیغه توربین بادی معمولاً بیش از ۱۷۰ فوت طول دارد. عملکرد تیغه‌ها شبیه به ایرفویل است زیرا باد در سراسر تیغه‌های روتور جریان می‌یابد، فشار هوا در یک طرف تیغه کاهش پیدا می‌کند و اختلاف فشار هوا در سراسر تیغه باعث افزایش و کشش می‌شود. نیروی بالابر بیشتر از نیروی کشش است که، در نهایت، تیغه را به حرکت در می‌آورد.
- ناسل: ناسل بخشی از یک توربین بادی است که بر روی برج قرار می‌گیرد و، اجزای الکتریکی و مکانیکی توربین را در خود جای می‌دهد. همانطور که در شکل بالا نشان داده شده است، در داخل

ناسل، ترمزها، شفت‌های سرعت پایین و سرعت بالا، گیربکس و ژنراتور قرار دارند. تجهیزات توزیع برق، سیستم انحراف (که در بعضی از توربین‌ها به کار می‌رود) و کنترلر در این شکل نشان داده نشده‌اند. به علاوه، بادگیر و بادسنج هم به ناسل متصل شده‌اند. وظیفه بادگیر این است که با اندازه‌گیری جهت باد و برقراری ارتباط با سایر قسمت‌های توربین، بر اساس جهت باد توربین را تنظیم کند. بادسنج سرعت باد را اندازه‌گیری می‌کند و داده ها را به کنترل کننده انتقال می‌دهد.

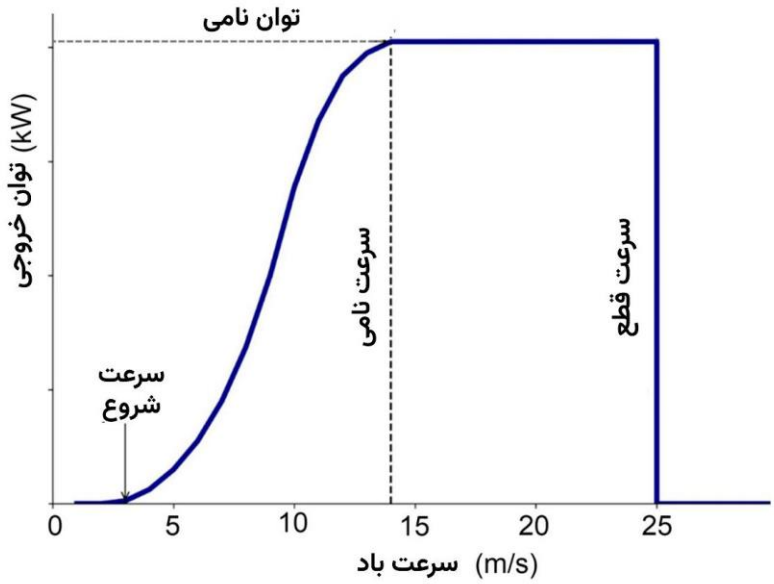
- روتور هاب: روتور هاب یا توپی روتور در واقع رابط مکانیکی بین تیغه‌های روتور و یاتاقان محور اصلی است.
- برج: برج تکیه‌گاه ناسل را فراهم و سازه را از طریق فونداسیون به زمین متصل می‌کند. برج معمولاً از فولاد لوله‌ای ساخته شده است و، از طریق آن می‌توان به ناسل و همچنین کابل‌های الکتریکی بین ناسل و ترانسفورماتور دسترسی یافت.
- ترانسفورماتور: ترانسفورماتور که در پایه برج (یا درون برج) قرار می‌گیرد، انرژی الکتریکی تولید شده توسط مجموعه توربین - ژنراتور را که در ولتاژ پایین قرار دارد به برق با ولتاژ بالاتر برای انتقال تبدیل می‌کند.
- فونداسیون: فونداسیون یک جزء کلیدی برای توربین‌های بادی به شمار می‌آید و ساختاری بتنی است که برج را به زمین متصل می‌کند. اندازه فونداسیون بر اساس ابعاد و وزن تمامی اجزای توربین بادی و همچنین نیروهای فشاری و بالابرنده ناشی از باد و چرخش تیغه‌های روتور تعیین می‌شود. بسته به اندازه توربین و یا شرایط ژئوتکنیکی، فونداسیون ممکن است شامل شمع‌ها یا پایه‌های حفاری شده باشد.

با مطالعه مقاله زیر می‌توان با منابع انرژی تجدیدپذیر آشنا شد.

۶ منبع انرژی تجدیدپذیر در توسعه پایدار برق صنعتی

معرفی منحنی توان توربین بادی

منحنی توان توربین بادی نموداری است که برای نشان دادن میزان توانی که یک توربین بادی می‌تواند در سرعت‌های باد مختلف تولید کند استفاده می‌شود. این نمودار ابزار مهمی برای ارزیابی عملکرد و مناسب بودن توربین‌های بادی به شمار می‌رود. در این منحنی، محور افقی نشان دهنده سرعت باد و محور عمودی نشان دهنده توان خروجی است. با درک منحنی توان یک توربین بادی، می‌توان منابع بادی را بهتر ارزیابی و میزان توان تولیدی را پیش بینی کرد، بنابراین تصمیمات آگاهانه‌تری گرفت.



شکل ۴ - منحنی توان یک توربین بادی

منحنی‌های توان توربین بادی معمولاً دارای ویژگی‌های کلیدی زیر هستند:

سرعت شروع (**Cut – in speed)**: سرعت بادی که در آن توربین بادی شروع به تولید برق می‌کند.

سرعت نامی (**Rated speed)**: سرعت بادی که در آن توربین بادی قادر به تولید توان نامی خود است.

سرعت قطع (**Cut – out speed)**: سرعت بادی که در آن توربین بادی به دلیل ملاحظات ایمنی تولید برق را متوقف می‌کند.

توان نامی (**Rated Power)**: حداکثر توانی که توربین بادی می‌تواند تولید کند.

به کمک معادله زیر می‌توان منحنی توان توربین بادی را به صورت تقریبی محاسبه کرد.

$$P_{WT}(v) = \begin{cases} 0 & v \le v_{cut-in} \\ \left(\frac{v - v_{cut-in}}{v_{rated} - v_{cut-in}}\right).P_{rated} & v_{cut-in} \le v \le v_{rated} \\ P_{rated} & v_{rated} \le v \le v_{cut-out} \\ 0 & v \ge v_{cut-out} \end{cases}$$

که در آن

P_{WT}	توان خروجی توربین
v	سرعت باد
v_{cut-in}	سرعت شروع
$v_{cut-out}$	سرعت قطع
v_{rated}	سرعت نامی
P_{rated}	توان نامی توربین

منحنی‌های توان توربین بادی کاربردهای گسترده‌ای در زمینه انرژی باد دارند که برخی از آنها عبارتند از:

- انتخاب سایت مناسب برای مزرعه بادی: همانطور که قبلا ذکر شد، منحنی توان می‌تواند به توسعه‌دهندگان مزرعه‌های بادی کمک کند تا بهترین سایت برای مزرعه بادی را انتخاب کنند.
- انتخاب توربین بادی: مهندسان می‌توانند توربین‌های بادی با منحنی‌های توان مناسب را با توجه به شرایط سرعت باد در سایت مزرعه بادی برای بهبود راندمان تولید برق انتخاب کنند.
- ارزیابی پروژه برق بادی: سرمایه‌گذاران می‌توانند از منحنی توان برای پیش بینی تولید برق سالانه پروژه برق بادی استفاده کنند و سپس از مزایای اقتصادی پروژه ارزیابی به عمل آورند.
- بهره‌برداری و مدیریت مزرعه بادی: اپراتورهای مزرعه بادی می‌توانند از منحنی توان برای نظارت بر عملکرد توربین بادی و، یافتن و حل به موقع مشکلات استفاده کنند.

ترانسفورماتورهای افزاینده

یک نیروگاه بادی از ترانسفورماتورهای افزایش دهنده برای افزایش ولتاژ (در نتیجه کاهش جریان مورد نیاز) استفاده می‌کند، که این امر باعث کاهش تلفات الکتریکی به هنگام انتقال مقادیر زیاد جریان در فواصل طولانی با خطوط انتقال می‌شود. به طور معمول، در نیروگاه‌های بادی به ازای هر تعداد توربین بادی یک ترانسفورماتور افزاینده مربوطه قرار می‌گیرد که در نهایت همگی آنها به یک پست کلی افزاینده متصل می‌شوند.

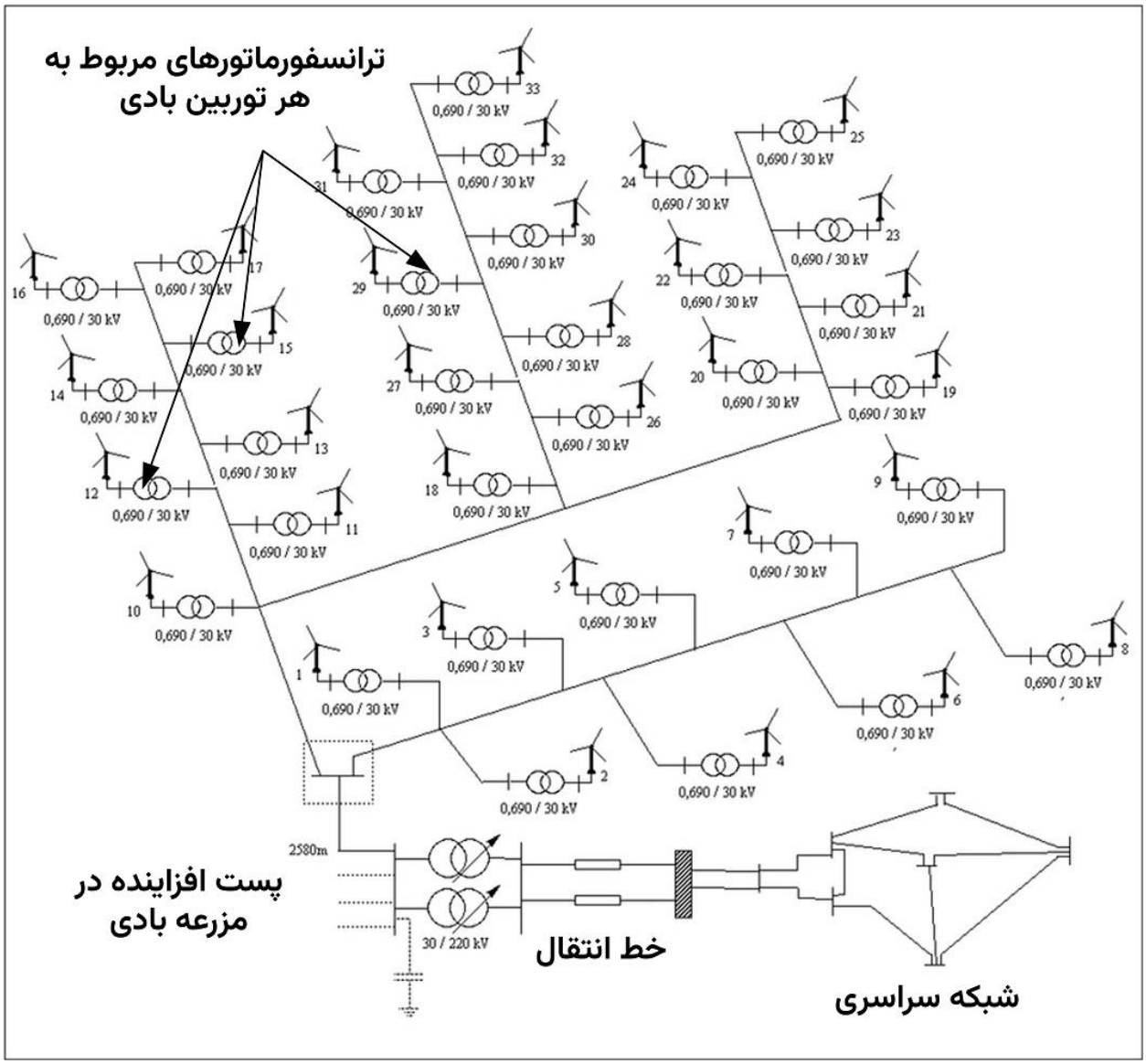
پست افزاینده

پس از افزایش ولتاژ در مرحله اول که توسط هریک از ترانسفورماتورهای مجزا مربوط به هر کدام از توربین‌های بادی انجام می‌پذیرد، به منظور انتقال توان الکتریکی تولید شده توسط مزرعه بادی به شبکه

برق سراسری، نیاز است تا یک مرحله دیگر افزایش ولتاژ صورت گیرد. که این کار به کمک پست افزاینده موجود در مزرعه بادی محقق می‌شود.

خطوط انتقال نیرو

با توجه به فاصله مزارع بادی از خطوط اصلی انتقال نیرو، می‌بایست که از خطوط انتقال مناسب برای انتقال انرژی الکتریکی تولید شده به شبکه سراسری استفاده کرد. لازم به ذکر است که طراحی خطوط انتقال پایدار و کارآمد برای انتقال توان الکتریکی تولید شده توسط مزارع بادی با حداقل تلفات از اهمیت ویژه‌ای برخوردار است.



شکل ۵ - دیاگرام تک‌خطی اتصال یک مزرعه بادی به شبکه قدرت

انواع نیروگاه‌های بادی

به طور کلی سه نوع مزرعه بادی وجود دارد که دارای ویژگی‌هایی به شکل زیر هستند:

- مزارع بادی واقع در خشکی (**Onshore wind farms**): این نوع مزارع بادی در حال حاضر رایج‌ترین هستند. آنها در خشکی بیش از ۳ کیلومتر از ساحل واقع شده‌اند و از جریان‌های هوای زمینی تغذیه می‌کنند. یکی از مزیتی‌های مهم این نوع از مزارع بادی آسان بودن بهره‌برداری و راه‌اندازی آنها است.

شکل ۶ - نمایی از یک مزارع بادی واقع در خشکی

- مزارع بادی نزدیک ساحل(**Nearshore wind farms**): این نوع از مزارع بادی هم در خشکی قرار دارند، اما در فاصله‌ای کمتر از ۳ کیلومتر از ساحل احداث می‌شوند. مزیت انتخاب این مکان این است که مزرعه بادی مورد نظر می‌تواند هم از بادهای زمینی و هم از بادهای دریایی برای تولید انرژی الکتریکی استفاده کند.

شکل ۷ - نمایی از یک مزارع بادی نزدیک ساحل

- مزارع بادی فراساحلی(**Offshore wind farms**): این نوع از مزارع بادی در دریای آزاد و چندین مایلی از ساحل ساخته می‌شوند. از جمله مزایای اصلی آنها در مقایسه با مزارع بادی زمینی این است که نیروی باد بیشتر بوده، و در ارتفاع پایین‌تر و منظم‌تر از روی زمین می‌وزد.

شکل ۸ - نمایی از یک مزارع بادی فراساحلی

نحوه تصمیم‌گیری برای نصب نیروگاه بادی

مزارع بادی معمولاً در مناطقی نصب می‌شوند که بتوان بادهای زمینی یا دریایی (به لطف ویژگی‌های بادی منطقه و مناسب بودن سایت) را بدون تداخل با محیط زیست یا آسیب رساندن به زیستگاه طبیعی گونه‌ها مهار کرد. به همین دلیل، هنگام انتخاب محل مناسب برای ساخت آن‌ها باید موارد زیر را در نظر گرفت:

- تاثیر احتمالی بر محیط زیست
- شدت و فراوانی باد
- زمین و دسترسی به منطقه
- امکان سنجی قانونی و سرزمینی

مزایا و معایب نیروگاه‌های بادی

نیروگاه‌های بادی، یک منبع انرژی تجدیدپذیر و پایدار هستند که از انرژی باد برای تولید برق استفاده می‌کنند. این نیروگاه‌ها دارای مزایایی به شرح زیر هستند:

- مزارع بادی از یک منبع نامحدود و رایگان انرژی تجدیدپذیر بهره می‌برند که همیشه در دسترس خواهد بود. همچنین، نیروگاه‌های بادی گازهای گلخانه‌ای یا سایر آلاینده‌ها را آزاد نمی‌سازند، که در نتیجه به تولید انرژی پاک کمک می‌کنند.
- نیروگاه‌های بادی می‌توانند هزینه‌های تولید انرژی را پس از نصب و راه‌اندازی به میزان قابل توجهی کاهش دهند. علاوه بر این، با توجه به اینکه سازگارتر هستند و می‌توانند در مکان‌های دورافتاده یا فراساحلی نصب شوند، قابلیت اطمینان و امنیت انرژی بیشتری را ارائه می‌دهند.
- مزارع بادی با کاهش میزان گازهای گلخانه‌ای و سایر آلاینده‌های منتشر شده در اتمسفر، مزایای زیست‌محیطی فراوانی به همراه دارند که در نهایت کیفیت هوا را در جوامع مجاور بهبود می‌بخشد.

با این وجود، مزارع بادی دارای برخی نقاط ضعف به صورت زیر هستند:

- عدم قطعیت انرژی باد: اثربخشی یک توربین بادی در تولید برق به آب و هوا بستگی دارد. بنابراین، پیش‌بینی دقیق میزان الکتریسیته تولیدی یک توربین بادی در طول زمان می‌تواند دشوار باشد. اگر سرعت باد در هر روز معین خیلی کم باشد، روتور توربین نمی‌چرخد. این بدان معناست که انرژی باد همیشه برای ارسال در زمان اوج تقاضا برای برق در دسترس نیست. برای استفاده انحصاری از انرژی باد، توربین‌های بادی باید با نوعی فناوری ذخیره انرژی همراه شوند.
- ایجاد آلودگی صوتی و بصری: یکی از بزرگترین معایب انرژی باد، آلودگی صوتی و بصری آن است. توربین‌های بادی به دلیل عملکرد مکانیکی و گرداب بادی که هنگام چرخش پره‌ها ایجاد می‌شود، هنگام کار می‌توانند نویز داشته باشند. علاوه بر این، از آنجایی که توربین‌های بادی باید به اندازه کافی بالا ساخته شوند تا مقدار خوبی باد را جذب نمایند، توربین‌ها اغلب می‌توانند مناظر دیدنی مانند رشته کوه‌ها، دریاچه‌ها، اقیانوس‌ها و غیره را مختل کنند.
- اثرات منفی توربین‌های بادی بر محیط اطراف: تیغه‌های یک توربین بادی بسیار بزرگ هستند و با سرعت بالایی می‌چرخند. متاسفانه، چرخش این تیغه‌ها می تواند به پرندگان و خفاش‌ها، آسیب رسانده و آنها را بکشد. ساخت مزارع بادی همچنین می‌تواند زیستگاه‌های طبیعی گونه‌های محلی را مختل کند. با این حال، مشکلات ذکر شده تا حدودی با پیشرفت‌های تکنولوژی و مکان‌یابی مناسب نیروگاه‌های بادی قابل حل است.

- دور بودن نیروگاه‌های بادی از مراکز مصرف: انرژی الکتریکی تولید شده توسط مزارع بادی، نیاز به انتقال در فواصل طولانی دارد. در بسیاری از موارد، توربین‌ها و مکان‌های تولید ممکن است کاملاً دور از مراکز جمعیتی قرار داشته باشند که در آن به برق نیاز است. بنابراین، خطوط انتقال یک زیرساخت اضافی است که باید برای موفقیت این شکل از تولید انرژی ساخته شود.

جمع‌بندی

با توجه به گسترش روزافزون صنعت و نیاز به تامین انرژی الکتریکی از منابع تجدیدپذیر، نیروگاههای بادی به شکل ویژه مورد توجه سیاست‌گذاران و مدیران بخش انرژی قرار گرفته‌اند. در این مقاله، به بررسی ساختمان و اجزای اصلی تشکیل‌دهنده یک نیروگاه بادی پرداخته شد. همچنین با معرفی انواع نیروگاه‌های بادی متداول، به مزایا و معایب کلی واحدهای بادی اشاره شد. در نهایت، می‌توان نتیجه گرفت که نیروگاه‌های بادی در آینده‌ای نه چندان دور به عنوان یکی از مهمترین منابع تولید انرژی الکتریکی توسعه خواهند یافت.

سوالات متداول

۱ - یک نیروگاه بادی از چه اجزایی ساخته می‌شود؟

به طور کلی، برای استخراج انرژی الکتریکی یک واحد بادی متشکل از چهار جز اصلی به شکل زیر است:

مجموعه توربین‌های بادی، ترانسفورماتورهای افزاینده، پست افزاینده، خطوط انتقال نیرو.

۲ - انواع توربین‌های بادی کدامند؟

به طور کلی دو نوع اصلی توربین بادی وجود دارد:

توربین بادی با محور افقی، توربین بادی با محور عمودی

۳ - معایب نیروگاه‌های بادی چیست؟

عدم قطعیت انرژی باد، ایجاد آلودگی صوتی و بصری، اثرات منفی توربین‌های بادی بر محیط اطراف، دور بودن نیروگاه‌های بادی از مراکز مصرف.

مراجع

https://www.repsol.com/en/energy-and-the-future/future-of-the-world/wind-farms/index.cshtml

https://www.long-intl.com/blog/wind-turbine-basics/

https://www.enelgreenpower.com/learning-hub/renewable-energies/wind-energy/wind-turbine

https://www.energy.gov/eere/wind/how-wind-turbine-works-text-version

https://www.solarreviews.com/blog/wind-energy-pros-and-cons#:~:text=Some%20of%20the%20main%20disadvantages,locations%20suitable%20for%20wind%20turbines.

https://www.energysage.com/about-clean-energy/wind/pros-cons-wind-energy/