نیروگاه بادی

تالیف: اکبر ادیب‌فر

انتشارات پندار پارس

سرشناسه : ادیب‌فر، اکبر، ۱۳۵۳ –
عنوان و نام پدیدآور : نیروگاه بادی/تالیف اکبر ادیب‌فر.
مشخصات نشر : تهران : پندار پارس ،۱۳۹۴.
مشخصات ظاهری : ۷۴۰ ص.: مصور
شابک : ۹۷۸-۶۰۰-۶۵۲۹-۷۲-۱
وضعیت فهرست نویسی : فیپا
موضوع : نیروگاه‌های بادی
موضوع : توربین‌های بادی
رده بندی کنگره : TK۱۳۹۴۱۵۴۱ ۹ن۴الف/
رده بندی دیویی : ۳۱۲۱۳۶/۶۲۱
شماره کتابشناسی ملی : ۴۱۰۶۴۷۸

دفتر فروش انتشارات پندار پارس

انقلاب، ابتدای کارگرجنوبی، کوی رشتچی، شماره ۱۴، واحد ۱۶

تلفن: ۶۶۵۷۲۳۳۵ – تلفکس: ۶۶۹۲۶۵۷۸ همراه: ۰۹۲۱۴۳۷۱۹۶۴

خرید آنلاین: **www.pendarepars.com** **info@pendarepars.com**

نام کتاب : نیروگاه بادی

ناشر : انتشارات پندار پارس

تالیف : اکبر ادیب‌فر

چاپ نخست : بهمن ماه ۹۴

شمارگان : ۱۰۰۰ نسخه

ویراستار : دکتر الهام شیرخدایی

لیتوگرافی، چاپ، صحافی : ترام‌سنج، فرشیوه، خیام

قیمت : ۴۹۰۰۰ تومان **شابک : ۹۷۸-۶۰۰-۶۵۲۹-۷۲-۱**

***هرگونه کپی برداری، تکثیر و چاپ کاغذی یا الکترونیکی از این کتاب بدون اجازه ناشر تخلف بوده و پیگرد قانونی دارد ***

فهرست

فصل نخست؛ بررسی مشخصه‌های انرژی باد ۵
تاریخچه انرژی بادی ۶
آسیاب‌های بادی در غرب جهان(۱۸۷۵-۱۳۰۰ بعد از میلاد مسیح) ۸
تعریف باد و معرفی انواع مرسوم آن در دنیا و منطقه ۱۲
انواع جریان‌های باد ۱۲
جریان‌های باد رایج(جهانی) ۱۳
جریان‌های باد فصلی(موسمی) ۱۸
جریان‌های باد محلی ۱۹
بادهای سیکلونیک و ضدسیکلونیک ۲۰
جریان‌های هوا و وزش بادها در ایران ۲۰
الف) متوسط سرعت باد شمال‌غربی ۲۳
ب) متوسط سرعت باد شمالی ۲۴
بادهای محلی ۲۴
نیروهای مؤثر بر جریان‌های باد ۲۸
نیروی فشاری ۲۸
نیروی کوریولیس ۲۸
نیروی لختی ۲۹
نیروی اصطکاک ۳۱
مشخصات عمومی بادها ۳۱
بررسی تغییرات زمانی ۳۲
بررسی‌های چندساله ۳۲
بررسی‌های سالانه ۳۳
بررسی‌های روزانه ۳۴
بررسی‌های مقیاس کوچک (بررسی توربولانس و تغییرات ناگهانی سرعت) ۳۵
بررسی تغییرات باد بر اساس جغرافیا و جهت وزش باد ۳۶
تغییرات باد بر اساس جغرافیا ۳۶
برآورد توان منابع باد دنیا ۴۰
معرفی اطلس باد ۴۱
اطلس باد جهانی ۴۲
اطلس باد ایران ۴۴
مشخصات لایه‌ی مرزی اتمسفر ۵۰
پارامترهای مهم در لایه‌ی مرزی اتمسفر ۵۱
تغییرات دما با ارتفاع ۵۱
پایداری اتمسفر ۵۴
فشار و چگالی اتمسفر ۵۵
توربولانس ۵۵
شدت توربولانس ۵۶
توابع احتمال سرعت باد ۵۷
جریان پایدار باد ۵۸
پروفیل لگاریتمی ۵۹
پروفیل توانی ۶۱

اثرات نوع سطح زمین بر روی سرعت باد.....۶۳
جریان بر روی زمین‌های مسطح دارای موانع.....۶۵
جریان در زمین‌های مسطح با درنظر گرفتن تغییرات زبری سطح.....۶۶
مشخصات زمین‌های ناهموار: بررسی مقیاس‌های کوچک.....۶۶
ارتفاعات.....۶۶
پستی‌ها.....۶۸
مشخصات زمین‌های ناهموار.....۶۸
اندازه‌گیری سرعت و جهت باد.....۶۹
نشانه‌های اکولوژیکی.....۶۹
بادسنج‌ها.....۷۳
دکل بادسنجی.....۷۳
انواع دکل بادسنجی.....۷۴
معرفی سنسورهای دکل باد سنجی.....۷۵
بادسنج‌های فنجانی :.....۷۶
بادسنج‌های پره‌ای.....۷۷
بادسنج‌های صفحه‌ای.....۷۸
بادسنج‌های لوله‌ای.....۷۹
بادسنج‌های سونیک.....۸۰
مشخصات سنسورهای دکل باد سنجی.....۸۲
۱- سنسور سرعت سنج:.....۸۲
۱-۱ سنسور سرعت سنج (الف) (جدول ۱-۹ و شکل ۱- ۵۴).....۸۲
۱-۲ - سنسور سرعت سنج (ب) (جدول ۱-۱۰ و شکل ۱- ۵۵).....۸۳
۱-۳- سنسور سرعت سنج (ج) (جدول ۱-۱۱ و شکل ۱- ۵۶).....۸۴
۱-۴- سنسور سرعت سنج (د) (جدول ۱-۱۲ و شکل ۱- ۵۷).....۸۴
۱-۵- سنسور سرعت سنج (ه) (جدول ۱۳ و شکل ۱- ۵۸).....۸۵
۱-۶- سنسور سرعت سنج (و) (جدول۱- ۱۴ و شکل ۱- ۵۹).....۸۶
۲- سنسور جهت.....۸۶
۲-۱- سنسور جهت (جدول۱- ۱۵و شکل ۱- ۶۲).....۸۸
۳- سنسور دما و رطوبت.....۸۹
۳-۱ سنسور دما و رطوبت (الف) (جدول۱- ۱۶و شکل ۱- ۶۳).....۸۹
۳-۲- سنسور دما و رطوبت (ب) (جدول۱- ۱۷و شکل ۱- ۶۴).....۸۹
۴- سنسورهای تشعشع سنج.....۹۰
۴-۱- تشعشع سنج (الف) (جدول۱- ۱۸و شکل ۱- ۶۵).....۹۰
۴-۲ تشعشع سنج (ب) (جدول۱- ۱۹و شکل ۱- ۶۶).....۹۱
۵- سنسور باران سنج.....۹۲
۵-۱- سنسور باران سنج(جدول۱- ۲۰و شکل ۱- ۶۷).....۹۲
۵-۲- سنسور باران سنج دارای محافظ پرندگان (جدول۱- ۲۱و شکل ۱- ۶۸).....۹۳
۶- سنسور فشار هوا ۹۴
۶-۱ سنسور فشار هوا (الف) (جدول۱- ۲۲و شکل ۱- ۶۹).....۹۴
۶-۲- سنسور سنجش فشار هوا (ب) (جدول۱- ۲۳و شکل ۱- ۷۰).....۹۵
۶-۳- سنسور سنجش فشار هوا (ج) (جدول۱- ۲۴و شکل ۱- ۷۱).....۹۶
۷- دیتا لاگر ۹۸
۷-۱- دیتا لاگر (جدول۱- ۲۵و شکل ۱- ۷۳).....۹۸
۸- مودم ۹۹

۸-۱ مودم (جدول۱- ۲۶و شکل ۱- ۷۴) ۹۹
۹- ۹-آنتن ۱۰۰
۹-۱- آنتن با پایه مغناطیسی(جدول۱- ۲۷و شکل ۱- ۷۵) ۱۰۰
۹-۲- آنتن مدل تقویت شده(جدول۱- ۲۸و شکل ۱- ۷۶) ۱۰۱
۱۰- سیستم های رادار ۱۰۲
۱۰-۱- سیستم های رادار (سودار و لیدار) (جدول۱- ۲۹و شکل ۱- ۷۷) ۱۰۲
۱۰-۲- سیستم رادار لیدار (جدول۱- ۳۰و شکل ۱- ۷۸) ۱۰۳
فصل دوم؛ آشنایی با توربین بادی ۱۰۵
تاریخچه توسعه توربین‌های بادی ۱۰۵
کاربردهای اولیه انرژی باد ۱۰۶
تولید انرژی مکانیکی از باد ۱۰۸
تولید انرژی الکتریکی از باد ۱۱۰
توربین بادی ۱۱۸
انواع توربین بادی ۱۱۸
توربین‌های نوع لیفت ۱۲۱
توربین‌های باد با اثر ماگنوس ۱۲۶
توربین‌های باد نوع گردابه‌ای ۱۲۷
طرحهای ویژه ۱۲۷
طرح INOVEX ۱۲۸
نحوه کارکرد توربین بادی ۱۳۰
مبانی تبدیل انرژی باد ۱۳۰
تئوری مقدماتی بتز ۱۳۱
مقایسه استفاده از نیروی پسا و برآ ۱۳۵
وسایل مبتنی بر نیروی پسا ۱۳۶
روتورهای استفاده کننده از نیروی برآی آیرودینامیکی ۱۳۷
مدل ریاضی محاسبه توان روتور ۱۳۹
مشخصات توان روتور ۱۴۳
کنترل توان آیرودینامیکی ۱۴۷
منحنی توان ۱۴۸
سرعت ابتدا (Vc) ۱۴۸
سرعت انتها (Vf) ۱۴۸
سرعت نامی باد (Vr) ۱۴۹
سرعت پابر جایی ۱۴۹
کنترل توان ۱۴۹
روش کنترل گام ۱۵۰
روش کنترل استال ۱۵۱
فصل سوم؛ معرفی اجزاء توربین بادی ۱۵۳
مشخصات توربین‌های بادی ۱۵۳
۱- فونداسیون ۱۵۵
فونداسیون در خشکی ۱۵۶
فونداسیون در دریا ۱۵۹
فونداسیون وزنه ای (Gravity type foundation) ۱۵۹
فونداسیون تک شمع ۱۶۰
فونداسیون سه پایه ۱۶۰

طرح پلتفرم شناور ۱۶۲
۲- برج توربین ۱۶۲
انواع برج ۱۶۷
برجهای استوانه‌ای (*Tubular tower*): ۱۷۰
برج بتونی ۱۷۳
ساخت بتون در سایت ۱۷۳
استفاده از بتون پیش ساخته ۱۷۴
مقایسه طرح‌های برج ۱۷۸
روش‌های نصب برج ۱۸۰
طرح برج لغزنده ۱۸۰
طرح بازوی متحرک و دکل ۱۸۰
طرح دکل الاکلنگی ۱۸۱
طرح برج پیش ساخته با ریل و لغزنده ۱۸۲
روتور ۱۸۳
۲- پره ۱۸۳
طراحی پره ۱۹۰
انتخاب مواد ۱۹۱
طراحی ساختار پره‌های توربین ۱۹۳
ساخت پره ۱۹۴
تکنولوژی تزریق رزین ۱۹۶
تکنولوژی پریپرگ ۱۹۷
انواع طراحی پره ۱۹۸
طرح آلومینیم پرچی ۱۹۸
طرح فولادی ۱۹۹
طرح‌های چوبی ۲۰۰
طرح‌های کامپوزیتی نوین ۲۰۱
روش‌های ساخت پره‌های کامپوزیت ۲۰۳
تکنیک لایه سازی ۲۰۳
تکنیک رشته پیچی ۲۰۶
اتصال پره توربین به هاب ۲۰۹
طرح حلقه Hütter ۲۰۹
طرح فلنج فولادی ۲۰۹
طرح پیچ صلیبی ۲۱۰
طرح فلنج و غلاف پیوندی ۲۱۱
سیستم‌های نصب شده بر روی پره‌ها ۲۱۲
ترمز آیرودینامیکی ۲۱۲
محافظت در برابر صاعقه ۲۱۳
سیستم یخ زدایی ۲۱۳
بلبرینگ‌های پره‌ها ۲۱۳
سیستم سمت دهی ۲۱۳
یاتاقان سمت دهی ۲۱۴
کار اندازها ۲۱۵
سیستم ترمز ۲۱۶
سیستم قفل ۲۱۷

مکانیزم گام ۲۱۷
یاتاقان‌های پره روتور ۲۱۷
نیروی محرکه و کار اندازها ۲۱۸
سیستم ایمنی مضاعف ۲۲۱
سیستم کنترل پیچ ۲۲۱
فعال‌ساز ۲۲۱
منبع تغذیه ۲۲۱
کنترل توان ۲۲۱
توپی روتور ۲۲۹
ساخت هاب: ۲۳۱
استفاده از ورق و جوشکاری ۲۳۱
روش آهنگری ۲۳۲
روش ریخته گری ۲۳۲
ناسل، گهواره، موتورخانه یا اطاقک توربین ۲۳۲
سیستم‌های مکانیکی و زنجیره انتقال قدرت ۲۳۷
محور اصلی توربین ۲۳۷
انواع یاتاقان برای محور اصلی ۲۳۹
طرح محور جعبه‌دنده با سه نقطه تعلیق ۲۴۰
طرح ترکیب محور با جعبه‌دنده ۲۴۰
طرح ترکیب یاتاقان‌های حامل و سازه گهواره ۲۴۱
ساپورت روتور با محور ثابت ۲۴۱
ترمز روتور ۲۴۳
نقش ترمز در مکانیزم توربین بادی ۲۴۴
محرک ترمز ۲۴۷
محل قرارگیری ترمز ۲۴۸
جعبه دنده ۲۴۹
ویژگی‌های جعبه‌دنده‌های توربین بادی ۲۵۳
سیستم انتقال قدرت چندگانه ۲۵۵
ارتباط چرخ‌دنده و ژنراتور ۲۵۶
طرح چرخ‌دنده و ژنراتور ردیفی در بالای برج ۲۵۸
امکان حذف جعبه‌دنده ۲۵۹
طرح ارتباط مستقیم روتور به ژنراتور (بدون جعبه‌دنده) ۲۶۰
ژنراتور ۲۶۳
ژنراتورهای آسنکرون (سرعت ثابت) ۲۶۴
انواع ژنراتورهای آسنکرون (توربین‌های با جعبه‌دنده) ۲۶۸
ژنراتور آسنکرون نوع A (سرعت ثابت) ۲۶۹
ژنراتور آسنکرون نوع B (با تغییرات سرعت محدود) ۲۷۰
ژنراتور آسنکرون توربین‌های نوعC ۲۷۱
ژنراتور آسنکرون توربین‌های نوع D ۲۷۴
ساختمان ژنراتورهای القایی تغذیه دوبل ۲۷۵
مدل سیستم محور DFIG ۲۷۶
کنترل ژنراتور توربین بادی DFIG ۲۷۸
کنترل مبدل سمت روتور ۲۷۸
سیستم حفاظتی DFIG ۲۸۰

انواع سیستم حفاظتی ۲۸۱
محدودیت‌های عملکرد DFIG ۲۸۲
ظرفیت مبدل روتور ۲۸۲
ظرفیت استاتور ۲۸۲
توان نامی توربین بادی ۲۸۲
ژنراتورهای سنکرون ۲۸۲
ژنراتورهای بدون جعبه‌دنده (Direct drive) ۲۸۵
انواع ژنراتور سنکرون ۲۸۷
ژنراتور سنکرون با تحریک کلاسیک(SG) ۲۸۷
ژنراتورهای سنکرون با تحریک آهنربای دائم (PMSG) ۲۸۸
ساختمان ژنراتورهای سنکرون با کانورتر ۲۸۹
مدل دینامیکی ژنراتور سنکرون ۲۹۰
استراتژی کنترل ۲۹۱
تکنولوژی آهنربای دائم ۲۹۲
پایداری آهنربای دائم ۲۹۳
دی مغناطیس شدن ۲۹۳
پایداری ساختاری ۲۹۴
مقایسه ژنراتور سنکرون و آسنکرون ۲۹۵
مزایای توربین‌های بدون جعبه‌دنده ۲۹۷
چالش‌ها و معایب توربین‌های بدون جعبه‌دنده ۲۹۷
ژنراتوراز دیدگاه سازندگان توربین‌های بادی ۲۹۸
مقایسه فنی ژنراتورهای DFIG و PMSG ۳۰۰
مقایسه اقتصادی ژنراتورها ۳۰۲
ژنراتور Direct drive: ۳۰۲
سیستم‌های الکتریکی ۳۰۹
نحوه اتصال به شبکه ۳۰۹
تلفات الکتریکی ۳۱۰
سیستم مبدل ۳۱۰
اتصال به شبکه برق محلی ۳۱۱
توان اتصال کوتاه ۳۱۱
نوسانات و پرش ولتاژ ۳۱۲
پدیده هارمونیک ۳۱۲
فرکانس ولتاژ ۳۱۲
توان راکتیو ۳۱۳
حفاظت الکتریکی ۳۱۳
پایداری شبکه ۳۱۴
نحوه اتصال به شبکه برای توربینهای بدون گیربکس ۳۱۴
سیستم‌های کنترلی ۳۱۵
کنترل کننده زاویه گام پره ۳۲۰
سیستمهای پیشرفته کنترل توربین بادی ۳۲۱
نسل جدید سیستم کنترل توربینهای بادی ۳۲۳
کنترل آیرودینامیکی ۳۲۴
کلاس توربینهای بادی ۳۲۵
استانداردها ۳۲۶

کلاس ایمنی ۳۲۶
شرایط خارجی ۳۲۶
تعیین کلاس توربین ۳۲۶
شرایط محیطی ۳۳۱
تعیین سایز و توان با توجه به سرعت متوسط سالیانه باد ۳۳۲
الگوریتم تعیین کلاس برای توربین‌های بادی ۳۳۳
روند توسعه توربین‌های بادی ۳۳۴
روند تغییر سایز توربینهای بادی ۳۳۵
عوامل محدود کننده سایز توربینهای بادی بر روی خشکی ۳۳۸
پیشرفتهای انجام شده در طراحی و تولید اجزای توربین ۳۳۸
مواد خام مورد نیاز ۳۳۹
مزیت استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته ۳۴۲
معرفی ۱۰ توربین بزرگ دنیا: ۳۴۶
۱۰- توربین 5MW، گمسا ۳۴۶
۹- توربین 5MW، M۵۰۰ آروا ۳۴۷
۸- توربین 6MW، SL۶۰۰۰ سینوول ۳۴۷
۷- توربین 6MW، Haliade آلستوم ۳۴۸
۶- توربین ۱۵۰ ۶.۰ SWT زیمنس ۳۴۸
۵- توربین 6.2MW ری پاور ۳۴۹
۴- توربین ۷ مگاواتی Sea Angel ، MHI ۳۵۰
۳- توربین ۷ مگاواتی ۱۷۱ S۷.۰، سامسونگ ۳۵۰
۲- توربین ۷/۵ مگاواتی E۱۲۶ انرکون ۳۵۱
۱- توربین ۸ مگا واتی V۱۶۴ وستاس ۳۵۲
توربین ۲/۵ مگا واتی گروه مپنا ۳۵۲
فصل چهارم؛ حمل و نصب توربین بادی ۳۵۵
حمل و نقل قطعات توربین‌های باد ۳۵۵
تعریف مسیر وانواع جاده‌ها در انتقال قطعات ۳۵۸
مطالعات مربوط به جاده‌ها برای انتقال زمینی قطعات ۳۵۹
مطالعه‌ی مسیر ۳۵۹
مطالعه‌ی جاده‌ای ۳۵۹
مناطق شهری- مراکز شهرها، جاده‌های عمومی، عملیات و سازه‌های محلی ۳۶۱
جاده‌های دسترسی به سایت ۳۶۱
ظرفیت بار ۳۶۱
عرض جاده ۳۶۱
ارتفاع مجاز ۳۶۲
شیب ۳۶۲
سیستم تخلیه‌ی آب جاده‌ای ۳۶۳
تعمیرات و نگهداری جاده‌ها ۳۶۴
شعاع‌های طولی محدب و مقعر ۳۶۵
حمل و نقل بر روی جاده به وسیله‌ی کامیون ۳۶۶
حمل و نقل با قطار ۳۶۶
حمل و نقل دریایی ۳۶۸
ضوابط کلی برای توزیع و نگهداری بارها بر روی کشتی ۳۶۸
حمل ونقل اجزاء ۳۶۹

حمل و نقل فونداسیون ۳۶۹
تجهیزات انتقال ۳۷۱
ماشین‌آلات و تجهیزات موردنیاز ۳۷۲
ماشین‌آلات مورد نیاز برای حمل ونقل ۳۷۲
حمل کننده‌ها ۳۷۲
۱- حمل‌کننده‌ی برج ۳۷۲
۲- حمل‌کننده‌ی ناسل ۳۸۱
۳- حمل‌کننده‌ی هاب و دماغه ۳۸۵
۴- حمل و نقل پره ۳۸۷
حمل پره‌های تکی ۳۸۷
حمل کننده‌ی پره ۳۹۰
نصب توربین‌های بادی ۳۹۳
فرایند نصب ۳۹۳
خاکبرداری و طراحی فونداسیون ۳۹۵
نصب برج ۳۹۹
ماشین‌آلات موردنیاز برای نصب ۳۹۹
روشهای نصب ۴۰۲
نصب در سایت ۴۰۲
نصب ناسل ۴۱۱
نصب هاب و پره‌ها ۴۱۸
مونتاژ روتور و پره‌ها ۴۲۰
استفاده از وینچ زمینی ۴۳۲
۱- تهیه چیدمان بارگذاری و نصب توربین‌ها ۴۴۰
۱-۱- فضاهای مورد نیاز برای توربین‌های مختلف ۴۴۰
فضاهای مورد نیاز برای توربین‌های GE ۴۴۴
پد جرثقیل ۴۴۴
فضای مورد نیاز برای دور زدن و پارک کردن ۴۴۸
فضای مورد نیاز برای حرکت جرثقیل ۴۴۹
فضای مورد نیاز برای مونتاژ جرثقیل ۴۵۰
جرثقیل بوم خشک (شکل ۴-۱۲۷) ۴۵۰
جرثقیل تلسکوپی بوم خشک ۴۵۰
جرثقیل چرخ‌دار بوم خشک ۴۵۱
تجهیزات جانبی وساختمان‌های موجود در یک مزرعه‌ی بادی ۴۵۳
سیستم‌های جمع‌آوری توان الکتریکی ۴۵۴
ایستگاه‌ها و اتصالات ۴۵۴
سیستم کنترلی و ارتباطی ۴۵۵
تجهیزات مربوط به راه‌اندازی و نگهداری ۴۵۵
فصل پنجم؛ تعمیر و نگهداری ۴۵۷
تعمیر و نگهداری توربین بادی ۴۵۷
نگهداری پیش‌گیرانه ۴۵۸
حفاظت در برابر خوردگی ۴۵۹
استاندارد های تعمیر و نگهداری توربین بادی ۴۵۹
استاندارد EN ISO ۱۲۹۴۴ ..... ۴۵۹
استاندارد NORSOK M- ۵۰۱ (۵. Revision ۲۰۰۴) ۴۶۰

روغن‌کاری ۴۶۱
بازرسی قطعات ۴۶۲
بازرسی سطح مایع ۴۶۲
بازرسی اتصالات ۴۶۳
تنظیم فشار ۴۶۳
بازرسی چشمی ۴۶۳
بازرسی سنسورها ۴۶۳
تعمیرات خرابی ۴۶۵
کنترل عملکرد توربین‌های بادی ۴۶۵
هزینه‌ها ۴۶۶
دستورالعمل های تعمیر و نگهداری ۴۶۷
دسترسی به توربین ۴۶۷
آدرس و شماره تلفن هر توربین ۴۶۷
تابلوهای کنترلی و کلید عملکردی توربین ۴۶۷
دکمه‌های توقف اضطراری ۴۶۸
توصیه‌های عملی حین بازرسی ۴۷۰
تاثیرات روانکار ۴۷۰
تجهیزات ولتاژ بالا ۴۷۰
توقف توربین بادی ۴۷۰
بازرسی توربین باد ۴۷۱
تجهیزات ایمنی ۴۷۲
برنامه‌ی تعمیر و نگهداری ۴۷۳
مدیریت و آموزش پروژه ۴۷۳
مانیتورینگ کارایی پروژه ۴۷۴
مانیتورینگ زیست محیطی ۴۷۴
تعمیر و نگهداری برنامه‌ای توربین بادی ۴۷۴
تعمیر و نگهداری برنامه‌ای BOP ۴۷۸
نگهداری پست برق ۴۷۸
نگهداری جاده‌ها ۴۷۹
تعمیر و نگهداری ساختمان‌ها ۴۷۹
تعمیر و نگهداری خارج از برنامه‌ای توربین بادی ۴۷۹
تعمیرات جزئی و جایگزینی قطعات ۴۸۰
تعمیرات کلی و جایگزینی قطعات ۴۸۰
جایگزینی توربین بادی ۴۸۱
لیست نفرات تعمیر و نگهداری نیروگاه بادی به ظرفیت ۱۰۰ مگاوات ۴۸۱
نمونه لیست قطعات یدکی توربین بادی (Spare parts of wind turbine) ۴۸۲
هزینه‌های مربوط به تعمیرات و نگهداری ۴۸۵
فصل ششم؛ احداث مزارع بادی ۴۸۹
امکان سنجی مزارع بادی ۴۸۹
معیارهای منتخب ارزیابی مکان احداث مزرعه‌های بادی ۴۹۰
ارزیابی زیست محیطی ۴۹۱
پتانسیل باد ۴۹۱
توپوگرافی منطقه و توربولانس ۴۹۱
زمین شناسی و زلزله خیزی منطقه ۴۹۲

شبکه حمل و نقل و مسیرهای دسترسی ۴۹۳
کاربری اراضی ۴۹۴
وسعت منطقه ۴۹۶
خطوط انتقال، پست‌ها و وضعیت اتصال به شبکه در منطقه ۴۹۶
بررسی اقتصادی ۴۹۷
برنامه زمان بندی ۴۹۷
جمع‌بندی معیارها ۴۹۸
اولویت‌بندی سایت‌های بادی جهت احداث مزرعه ۴۹۹
فرآیند تحلیل سلسله مراتبی ۵۰۱
محاسبه وزن ۵۰۲
اجرای روش AHP در اولویت بندی سایت‌های بادی جهت احداث مزرعه ۵۰۳
محاسبه وزن نسبی گزینه‌ها نسبت به معیارها ۵۰۴
محاسبه وزن نسبی گزینه‌های موجود از نظر پتانسیل باد ۵۰۴
محاسبه وزن نسبی گزینه‌های موجود از نظر شبکه حمل و نقل و مسیرهای دسترسی ۵۰۶
محاسبه وزن نسبی گزینه‌های موجود از نظر کاربری اراضی ۵۰۶
محاسبه وزن نسبی گزینه‌های موجود از نظر وسعت ۵۰۸
محاسبه وزن نسبی گزینه‌های موجود از نظر خطوط انتقال، پست‌ها و اتصال به شبکه ۵۰۸
محاسبه وزن نسبی معیارها نسبت به یکدیگر ۵۰۸
انتخاب بهترین گزینه با استفاده از نرم افزار Expert Choice ۵۰۹
مراحل برنامه ریزی و ساخت مزارع بادی ۵۱۱
تهیه نقشه قیود ۵۱۴
روش‌های تعیین مشخصات مزارع بادی ۵۱۸
تخمین توان تولید ۵۱۸
تاثیر ارتفاع هاب توربین بادی ۵۱۸
منحنی مشخصه ۵۱۹
تاثیر چگالی باد ۵۲۰
روابط تعیین توان متوسط ۵۲۰
توابع توزیع سرعت باد و تولید سالانه انرژی ۵۲۱
توزیع‌های سرعت باد به کار رفته در نرم‌افزارهای پتانسیل سنجی ۵۲۲
توزیع‌های برآیند و ترکیبی ویبول ۵۲۲
تخمین توان تولیدی در WindPro ۵۲۴
روش‌های محاسبه انرژی در WindPro ۵۲۶
طبقه‌بندی زبری در مدل اطلس ۵۲۷
مدل‌های تپه و موانع در اطلس ۵۳۲
استفاده از مدل مانع و تپه WAsP ۵۳۴
مدل‌های مزرعه بادی ۵۳۴
مدل پارک ۵۳۵
مدل پارک در WAsP ۵۳۶
محدودیت‌های مدل پارک جدایی دنباله‌ها ۵۳۷
مدل پارک بهبود یافته ۵۳۷
شدت توربولانس ناشی از جدایی‌ها ۵۳۸
روابط بهینه‌سازی میکروسایتینگ ۵۴۰
روش‌های بهینه‌سازی در نرم‌افزار WindPro ۵۴۴
راهنمایی گام به گام بهینه‌سازی ۵۴۵

روش بهینه‌سازی تصادفی (زمین‌های ناهموار و کوهستانی) ۵۴۵
روش بهینه‌سازی منظم (زمین‌های هموار یا آبی) ۵۴۶
میکروسایتینگ مزارع بادی ۵۴۷
تعداد و موقعیت توربین‌ها در سایت ۵۴۸
مساحت زمین مورد احتیاج ۵۵۱
تاثیرات مربوط به طرح‌بندی‌های متفاوت ۵۵۵
فرمول و منحنی‌های انرژی باد ۵۵۹
منحنی‌های هیستوگرام سرعت باد ۵۶۰
منحنی سرعت- تداوم ۵۶۱
منحنی قدرت- تداوم ۵۶۱
منحنی سرعت - تناوب ۵۶۲
گلباد ۵۶۳
تحلیل داده‌های بادسنجی ۵۶۳
سرعت متوسط باد ۵۶۴
توزیع سرعت باد ۵۶۵
مدل‌های آماری برای تحلیل داده‌های باد ۵۶۶
تابع توزیع ویبول ۵۶۶
ضرایب تابع ویبول ۵۷۱
روش انحراف استاندارد ۵۷۱
روش اینرسی ۵۷۲
روش احتمال بیشینه ۵۷۳
روش فاکتور شکل انرژی ۵۷۳
تابع توزیع رایلی ۵۷۴
ضریب ظرفیت ۵۷۵
محاسبه سرعت در ارتفاعات مختلف ۵۷۷
تعیین انرژی قابل استحصال از جریان باد ۵۷۷
روش توزیع ویبول ۵۷۸
توزیع رایلی ۵۸۰
تولید انرژی بیشینه و ضریب ظرفیت ۵۸۱
مدل جریان در نرم‌افزارهای معتبر پتانسیل سنجی ۵۸۷
مدل جریان در نرم‌افزار ۵۸۷
شبکه‌بندی زوم شده ۵۸۸
مدل لینکام ۵۸۸
معادلات جریان خطی شده ۵۸۹
روش حل ۵۹۱
مفاهیم توپوگرافیک در نرم‌افزارهای پتانسیل سنجی ۵۹۳
زبری سطح ۵۹۴
مدل‌سازی زبری ۵۹۴
مدل زبری آب ۵۹۶
مدل کوه شناسی جریان ۵۹۸
جریان بر روی تپه‌ها: مدل تپه ۵۹۸
سرعت افزایش یافته نسبی ۵۹۹
پروفیل سرعت افزایش یافته عمودی ۶۰۰
تاثیرات موانع ۶۰۱

مشخص کردن ناهمواری‌ها..... ۶۰۱
آماده سازی یک نقشه کوه شناسی ۶۰۲
مدل اثر پناهگاه، پناهگاه‌های پشت موانع ۶۰۲
تخلخل موانع..... ۶۰۳
اثر پناهگاه ناشی از توربین‌های بادی..... ۶۰۴
مشخص کردن موانع ۶۰۴
تلاطم (توربولانس) ۶۰۴
مدل آماری توربولانس ۶۰۵
مدل‌سازی توربولانس ۶۰۶
شرایط مرزی..... ۶۰۸
ریسک‌ها و عدم قطعیت‌های نیروگاه‌های بادی ۶۰۸
عدم قطعیت‌های موجود در محاسبه منابع باد یک ناحیه ۶۰۹
عدم قطعیت‌های موجود در اندازه‌گیری سرعت باد..... ۶۱۰
عدم قطعیت بادسنج I (عدم قطعیت کالیبراسیون)..... ۶۱۱
عدم قطعیت بادسنج II (افزایش سرعت دینامیکی)..... ۶۱۱
عدم قطعیت بادسنج III (تاثیرات سرعت عمودی) ۶۱۲
عدم قطعیت بادسنج IV (تاثیرات توربولانس عمودی)..... ۶۱۳
تاثیرات دکل بادسنجی ۶۱۴
تاثیرات بوم و پایه سنسور ۶۱۴
کاهش دقت دیتاها ۶۱۵
عدم قطعیت در اثر پیش‌بینی طولانی مدت منابع باد..... ۶۱۶
عدم قطعیت در روش MCP..... ۶۱۶
عدم قطعیت در تخمین پارامترهای ویبول..... ۶۱۷
تغییرات در متوسط گیری طولانی مدت ۶۱۷
عدم قطعیت بخاطر تغییر در منابع باد ۶۱۷
عدم قطعیت به دلیل تغییرات سرعت متوسط سالیانه ۶۱۸
عدم قطعیت حاصل از ارزیابی سایت ۶۱۸
عدم قطعیت در اثر توپوگرافی سایت..... ۶۱۹
عدم قطعیت در اثر استفاده از مدل‌های Wind Shear..... ۶۱۹
عدم قطعیت در توان تولیدی توربین باد..... ۶۲۰
عدم قطعیت حاصل از توان تولیدی و منحنی توان ۶۲۰
عدم قطعیت ناشی از انتخاب توربین بادی نمونه در مزرعه بادی ۶۲۰
عدم قطعیت منحنی توان ۶۲۱
عدم قطعیت چگالی هوا..... ۶۲۱
عدم قطعیت در انرژی تولیدی توربین‌های بادی ۶۲۲
عدم قطعیت و فاکتورهای اتلاف انرژی..... ۶۲۲
اتلافات در دسترس بودن ۶۲۲
اتلافات حاصل از جرم‌گذاری ۶۲۳
اتلافات چیدمان مزرعه بادی ۶۲۴
عدم قطعیت در مدل‌های آماری..... ۶۲۵
عدم قطعیت در مورد تاثیرات زیست محیطی توربین‌های بادی ۶۲۵
تخمین عدم قطعیت نهایی و تجمیع موارد عدم قطعیت ۶۲۶
فصل هفتم؛ معرفی مزارع بادی جهان و ایران..... ۶۲۷
معرفی مزارع بادی جهان ۶۲۷

۱- مرکز انرژی باد آلتا (Alta Wind Energy Centre (AWEC – آمریکا..... ۶۲۸
۲- مزرعه بادی Shepherds Flat – آمریکا..... ۶۲۸
۳- مزرعه بادی روسکو Roscoe – آمریکا..... ۶۲۹
۶- مزرعه بادی صف لندن London Array – انگلستان..... ۶۳۱
۷- مزرعه بادی Fantanele-Cogealac – رومانی..... ۶۳۲
۸- مزرعه بادی Fowler Ridge..... ۶۳۳
۹- مزرعه بادی آب شیرین Sweetwater امریکا..... ۶۳۴
۱۰- نیروگاه بادی Buffalo Gap..... ۶۳۴
۱۱- مزارع بادی Tehachapi..... ۶۳۸
۱۲- پروژه کلرادوی سبز..... ۶۳۹
۱۳- مزرعه بادی Jaisalmer در هند..... ۶۴۰
۱۴- مزرعه بادی Inner Mongolia Huitengliang در چین..... ۶۴۱
لیست مزارع بادی ایالات متحده..... ۶۴۲
مزارع بادی در ایران..... ۶۴۹
۱- مزرعه بادی منجیل..... ۶۴۹
۲ - نیروگاه بادی بینالود..... ۶۵۲
۳- مزرعه بادی کهک - تاکستان..... ۶۵۳
فصل هشتم؛ شرایط تحویل مزارع بادی..... ۶۵۷
آزمایش‌های مورد نیاز توربین باد..... ۶۵۷
آزمایش‌های کارخانه..... ۶۵۷
آزمایش‌های کارخانه‌ای برج..... ۶۵۸
آزمایش‌های کارخانه‌ای اجزای الکتریکی..... ۶۵۸
آزمایش‌های کارخانه‌ای ناسل..... ۶۵۸
آزمایش‌های سایت..... ۶۵۹
آزمایش‌های راه‌اندازی..... ۶۶۰
آزمایش پایانی..... ۶۶۱
آزمایش پایانی توربین‌ها..... ۶۶۱
آزمایش پایانی مزرعه باد..... ۶۶۲
آزمایش‌های عملکردی..... ۶۶۲
آزمایش در دسترس بودن..... ۶۶۳
در دسترس بودن توربین‌ها..... ۶۶۳
ضریب دسترسی مزرعه بادی..... ۶۶۴
آزمایش منحنی عملکرد..... ۶۶۴
آزمایش منحنی عملکرد توربین‌ها..... ۶۶۵
آزمایش عملکرد مزرعه بادی..... ۶۶۶
آزمایش صدا..... ۶۷۰
آزمایش سیستم الکتریکی..... ۶۷۰
آزمایش فونداسیون..... ۶۷۱
آزمایش و بازرسی تولیدکننده بتون..... ۶۷۱
عمل‌آوری بتون..... ۶۷۱
موارد فولادی..... ۶۷۱
تأیید فصل مشترک..... ۶۷۲
آزمایش های سایت..... ۶۷۲
مطالعات CPT..... ۶۷۲

قرارگیری فونداسیون ۶۷۲
آزمایش راه‌اندازی ۶۷۲
آزمایش پایانی ۶۷۲
آزمایش سیستم الکتریکی ۶۷۲
آزمایش ژنراتور (Generator) ۶۷۳
آزمایش ترانسفورماتور اصلی (Main Transformer) ۶۷۵
آزمایش‌های کارخانه‌ای ۶۷۶
آزمایش‌های معمول ۶۷۷
آزمایش‌های خاص ۶۷۸
آزمایش‌های کارکردی ۶۷۸
آزمایش‌های سایت ترانسفورماتور ۶۷۸
سیستم بازدید (monitoring) ۶۸۰
تابلوهای MV (Medium Voltage Switchgear) ۶۸۰
آزمایش‌های کارخانه‌ای ۶۸۰
آزمایش‌های Type ۶۸۱
آزمایش‌های سایت ۶۸۱
کابل‌های MV ۶۸۳
آزمایش‌های کارخانه‌ای ۶۸۳
آزمایش‌های سایت ۶۸۴
ارسال به سایت (Packing and Shipping) ۶۸۵
آزمایش‌های CT (Current Transformer) ۶۸۵
آزمایش‌های کارخانه‌ای ۶۸۵
آزمایش سایت ۶۸۶
آزمایش‌های کلیدهای قدرت ۶۸۷
آزمایش‌های سایت ۶۸۷
آزمایش‌های برقگیر ۶۸۷
آزمایش‌های معمول ۶۸۷
آزمایش‌های سایت ۶۸۸
آزمایش سیستم حفاظت و رله‌ها ۶۸۸
نصب سیستم ۶۸۸
آزمایش‌های سایت ۶۸۹
آزمایش‌های سیستم DC-UPS ۶۹۰
آزمایش‌های کارخانه‌ای ۶۹۰
آزمایش‌های سایت ۶۹۱
آزمایش‌های نهایی ۶۹۲
آزمایش سیستم اسکادا ۶۹۳
خدمات دوران تضمین و گارانتی ۶۹۳
جریمه ۶۹۴
جریمه‌های پیمانکار EPC ۶۹۴
جریمه‌های پیمانکار O&M ۶۹۴
در دسترس بودن توربین ۶۹۴
توان راکتیو ۶۹۴
اتلافات انتقال ۶۹۴

وَ مِنْ آیاتِهِ أَنْ یُرْسِلَ الرِّیاحَ مُبَشِّراتٍ وَ لِیُذیقَکُمْ مِنْ رَحْمَتِهِ وَ لِتَجْرِیَ الْفُلْکُ بِأَمْرِهِ وَ لِتَبْتَغُوا مِنْ فَضْلِهِ وَ لَعَلَّکُمْ تَشْکُرُونَ

و از آیات (عظمت) خدا این است که بادها را بعنوان بشارتگرانی می‌فرستد تا شما را از رحمتش بچشاند (و سیراب کند) و کشتی‌ها به فرمانش حرکت کنند و از فضل او بهره گیرید؛ شاید شکرگزاری کنید.

(سوره مبارکه روم آیه ۴۷)

باد از مظاهر گرمابخش خورشید می‌باشد که با تابش خود ذرات هوا را وادار به تحرک می‌نماید که انرژی باد تولید می‌شود. گرم شدن زمین و جو آن بطور نامساوی سبب تولید جریان‌های همرفت حرکت نسبی جو نسبت به زمین، تولید باد می‌گردد.

با توجه به اینکه مواد قابل احتراق فسیلی در زمین رو به کاهش است، اخیرا پیشرفت‌های زیادی در بهره برادری از انرژی باد حاصل شده است. انرژی باد اغلب در دسترس بوده و هیچ نوع آلودگی بر جای نمی‌گذارد و می‌تواند از نظر اقتصادی نیز در دراز مدت قابل مقایسه با سایر منابع انرژی باشد. در سال‌های اخیر کوشش فراوانی برای استفاده از انرژی باد بکار رفته و تولید انرژی از باد با استفاده از تکنولوژی‌های پیشرفته در ابعاد بزرگ جلوه جدیدی پیدا کرده است.

نخستین کسانی که از انرژی باد در خشکی استفاده کرده اند ایرانیان بودند که آسیاب‌های بادی را اختراع نمودند و مصریان هم اولین کشوری بودند که باد را برروی دریا با استفاده از کشتی‌های بادبانی به خدمت نسل بشر در آوردند. بعدها استفاده ار آسیاب‌های بادی با محور قائم در کشورهای آسیایی معمول شده و سپس دستگاه‌های بادی با محور قائم با میله‌های چوبی توسعه یافت.

در قرن ۱۳ این نوع توربین‌ها توسط سربازان صلیبی به اروپا برده شد و هلندی‌ها فعالیت زیادی در توسعه دستگاه‌های بادی انجام دادند، بطوری که در اواسط قرن نوزدهم در حدود ۹ هزار ماشین بادی به منظورهای گوناگون مورد استفاده قرار می‌گرفته است. در زمان انقلاب صنعتی در اروپا استقاده از ماشین‌های بادی رو به کاهش گذاشت. استفاده از انرژی باد در ایالات متحده از سال ۱۸۵۴ شروع شد. از این ماشینها بیشتر برای بالا کشیدن آب از چاه‌های آب و بعدها برای تولید الکتریسیته استفاده شد.

بزرگترین ماشین بادی در زمان جنگ جهانی دوم توسط آمریکائی‌ها ساخته شد. در شوروی سابق در سال ۱۹۳۱ ماشینی بادی با محور افقی بکار انداختند که انتظار می‌رفت ۱۰۰ کیلو وات برق به شبکه بدهد. ارتفاع برج ۲۳ متر و قطر پره‌ها ۳۰/۵ متر بود.

صنعت توربین های بادی به خصوص از زمان جنگ جهانی دوم تا کنون رشد مستمری داشته است. این رشد، چه از لحاظ ظرفیت های نیروگاهی ایجاد شده و چه از لحاظ فناوری توربین ها، امروزه این صنعت را به یکی از شاخه‌های بسیار پیشرفته فناوری تبدیل کرده است. در حال حاضر برق استخراج شده از انرژی باد با تکیه بر فناوری پیشرفته توربین های عظیم وضعیت قابل رقابتی در مقایسه با سایر منابع انرژی پیدا کرده است.

این کتاب به منظور آشنایی با قوانین انرژی باد، معرفی با اجزا توربین های بادی بزرگ و نحوه حمل، نصب و بهره برداری مزارع بادی تهیه شده است. در تهیه این کتاب منابع فنی مختلفی شامل کتاب‌ها و مدارک تحقیقاتی و فنی و تجربیات شرکت‌های داخلی و خارجی با رویکردی نتیجه گرا مورد توجه قرار گرفته است. تلاش بر این بوده تا مطالعه این متن اطلاعات پایه ای را جهت آشنایی و ارزیابی فناوری های متداول در صنعت توربین های بادی در اختیار خواننده قرار دهد.

فصل اول کتاب به دلایل ایجاد باد و قوانین حاکم بر آن اشاره دارد و میزان وزش باد در اقصاء نقاط دنیا و ایران توسط نقشه‌های اطلس باد معرفی و تجهیزات سنجش میزان انرژی باد که برروی دکل‌های بادسنجی نصب شده ارائه می‌گردد.

با عنایت به اینکه مرور تحولات گذشته در فناوری باعث شناخت بهتر فناوری های امروزی می شود، در *فصل دوم* کتاب به تاریخچه مختصر توسعه فناوری توربین‌ها و معرفی انواع توربین اختصاص

داده شده است. البته به علت اهتمام این کتاب به معرفی فناوری‌های توربین‌های چند مگاواتی و همچنین تنوع فناوری‌های مورد استفاده در توربین‌های کوچک، در ادامه این فصل به نحوه کارکرد مبانی مبدل‌های انرژی باد به انرژی مکانیکی و انرژی الکتریکی که همان توربین‌های بادی می‌باشند اشاره می‌گردد.

عمده مطالب این کتاب که شامل معرفی فناوریهای امروزی در طراحی اجزای توربین از فونداسیون و برج تا تجهیزات مستقر در ناسل و روتور می‌باشند در *فصل سوم* ارائه می‌گردند.

یکی از مباحث مورد توجه در صنعت توربین باد تکنولوژی‌های حمل و نصب توربین می‌باشد، از آنجاییکه توربین‌های کیلو واتی جای خود را به توربین‌های مگاواتی داده اند و هم اکنون توربین‌های غول پیکر تا ظرفیت ۸ مگاوات در حال تولید می‌باشند که حجم و وزن قطعات آن بسیار افزایش یافته است و جهت حمل و نصب این قطعات وسیع و وزین نیاز به تجهیزات و تکنولوژی ویژه‌ای می‌باشد، در *فصل چهارم* آنها را معرفی خواهیم کرد.

برق تولید شده از توربین‌های نصب شده در سایت به شبکه سراسری و یا به محل مصرف برق و به صورت تولید پراکنده تزریق می‌گردد که جهت اطمینان از عملکرد مطمئن و نرمال آنها نیاز به بهره برداری و تعمیرات توربین‌ها و تجهیزات جانبی می‌باشد که به اصول بهره برداری و تعمیرات دوره ای آن‌ها در *فصل پنجم* اشاره شده است.

این کتاب به دو بخش عمده تقسیم می‌گردد که بخش اول راجع به قوانین باد و توربین مستقل از محل بهره برداری می‌باشد که ۵ فصل اول کتاب را در بر می‌گیرد و فصول ششم ، هفتم، هشتم به نحوه احداث و نحوه تغییر و تحول در مزارع بادی اشاره می‌نماید.

در *فصل ششم* به محل نیروگاه بادی می‌رویم تا نحوه پتانسیل سنجی میزان انرژی مزارع بادی و تاثیرات عوامل طبیعی، غیر طبیعی و توربین‌ها بر هم مورد بررسی قرار گیرند. در این فصل روش‌های محاسبه میزان انرژی تولیدی در هر مزرعه بادی معرفی می‌گردد و جهت آشنایی بیشتر با این نوع نیروگاه‌ها مزارع بادی بزرگ دنیا و ایران در *فصل هفتم* معرفی شده است.

پس از اجرای مزرعه بادی به گام نهایی احداث آن یعنی به نحوه واگذاری آن می‌رسیم که در *فصل‌هشتم* به نحوه استاندارد واگذاری مزرعه بادی از شرکت اجرا کننده به شرکت بهره برداری و مالک نیروگاه اشاره می‌گردد.

جهت تحقیق بیشتر و بهتر در موارد فنی اشاره شده، در انتها واژه‌نامه ای تعبیه شده است که واژه‌های کلیدی به دو زبان فارسی و انگلیسی و لیست اشکال و جداول به محققین در دسترسی به اطلاعات تکمیلی یاری خواهند رساند.

امید می‌رود با ارائه مطالب فوق قدمی‌در جهت بهره برداری بیشتر از انرژی‌های تجدید پذیر بویژه انرژی باد داشته باشیم تا در آینده نزدیک ساختار انرژی کشورمان را در راستای توسعه پایدار و محیط زیست سالم بنا کرده باشیم.

اکبر ادیب‌فر– محسن افروغ

فصل نخست

بررسی مشخصه‌های انرژی باد

در سالیان اخیر، با توجه به محدود بودن منابع فسیلی، گرایش به سمت انرژی‌های تجدیدپذیر[1] به شدت افزایش یافته است. انرژی خورشیدی، باد، امواج و انرژی ژئوترمال[2] را می‌توان از جمله مهمترین انرژی‌های تجدیدپذیر معرفی کرد. از میان این دسته‌بندی، در سالیان اخیر انرژی باد با توجه به اقتصادی بودن آن بیشتر از انواع دیگر انرژی‌های تجدیدپذیر مورد توجه قرار گرفته است. بنابراین، قدم اول در شناخت این انرژی، شناسایی و بررسی منبع مولد آن یعنی باد می‌باشد. در این قسمت تلاش شده است تا مفهوم و تعریف باد، عوامل مؤثر در شکل‌گیری آن، انواع آن و وضعیت وزش باد در دنیا و در محدوده‌ی جغرافیاییِ ایران مورد بررسی و کاوش قرار بگیرد.

---

[1] *Renewable Energies*
[2] *Geothermal Energy*

تاریخچه انرژی بادی

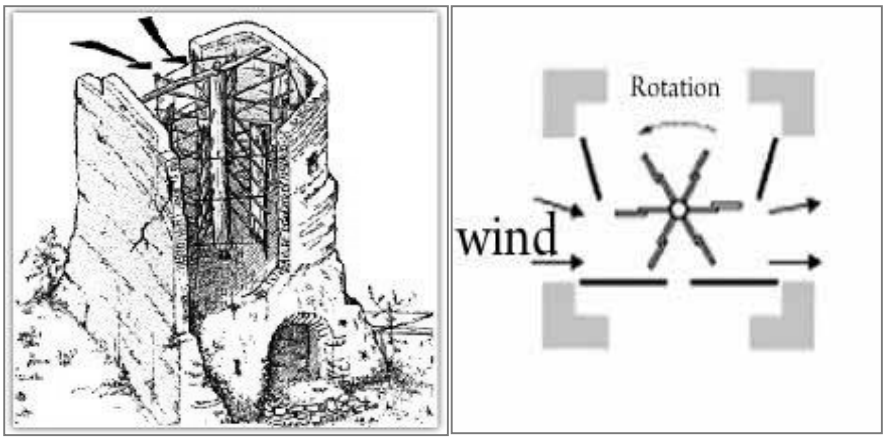
آغاز استفاده از انرژی باد (۱۰۰۰ سال قبل از میلاد مسیح تا ۱۳۰۰ سال بعد از میلاد مسیح) و تاریخچه انرژی بادی یک سیر تکاملی را به استفاده از قطعات سبک و ساده برای به حرکت درآوردن پره‌ها بوسیله نیروی درگ، به جای قطعات سنگین پیش گرفته است تا استفاده از قطعات سبک و مواد ایرودینامیکی پر بازده در دوران مدرن امروزی رواج پیدا کند. اما نباید اینگونه پنداشت که نیروی لیفت (نیرویی که باعث پرواز هواپیما می‌گردد) یک مفهوم جدید می‌باشد و برای باستانیان ناشناخته بوده است. اولین استفاده شناخته شده از انرژی باد مربوط به کاربرد در قایق‌های بادی است و این تکنولوژی نقش بسیار مهمی در توسعه آسیاب‌های بادی دارد. ملوانان باستانی نیروی لیفت را می‌شناختند و روزانه از آن استفاده می‌کردند ولو اینکه هیچ توضیحی علمی برای آن نداشتند. اولین آسیاب‌های بادی برای آسیاب کردن غلات و پمپاژ آب به کارگرفته شده بودند و قدیمی‌ترین مدل طراحی شده آن از نوع محور عمودی بوده که در طی سال‌های ۹۰۰-۵۰۰ میلادی در ایران توسعه یافته است. ظاهرا اولین استفاده از این آسیاب‌ها برای پمپاژ آب بوده است ولی نحوه دقیق کار آن معلوم نیست زیرا هیچ گونه طراحی و یا نقاشی از این آسیاب‌ها موجود نیست. نخستین مستندات مربوط به طراحی این آسیاب‌های بادی نیز مربوط به ایرانیان می‌باشد. که پره‌های آن یا اصطلاحا بادبان‌های آنها از جنس چوب و یا نی بوده که مطابق شکل ۱-۱ با تیرهای افقی به یک محور عمودی متصل می‌شدند.

شکل ۱-۱ قدیمی ترین آسیاب بادی در نشتیفان ایران معروف به آسباد

آسیاب نمودن غلات اولین استفاده مستند شده و بسیار ساده آسیاب‌های بادی می‌باشد. به طوری که سنگ آسیاب به همان محور عمودی متصل می‌شده است (شکل ۱-۲). کلیه قسمت‌های آسیاب بادی معمولاً در داخل یک ساختمان محصور می‌شده‌اند و ورودی ساختمان در جهت وزش باد فضای بازی داشته است تا باد بتواند به سمت داخل هدایت شود.

شکل ۱-۲ قدیمی ترین آسیاب بادی محور عمودی

آسیاب‌های بادی محور عمودی در چین مطابق شکل ۱-۳ هم مورد استفاده قرار می‌گرفتند و چین‌یان ادعای تخصیص این نوع آسیاب‌ها را به زادگاه خود دارند. این در حالی است که به طور دقیق می‌توان گفت اولین مستندات آنها مربوط به سال ۱۲۱۹میلادی می‌باشد که توسط یک سیاست‌مدار چینی با نام Yehlu Chhu-Tshai اختراع شده است. در این کشور هم اولین کاربردهای آسیاب بادی برای آرد نمودن غلات و پمپاژ آب بوده است.



شکل ۱-۳ آسیاب بادی محور عمودی در چین

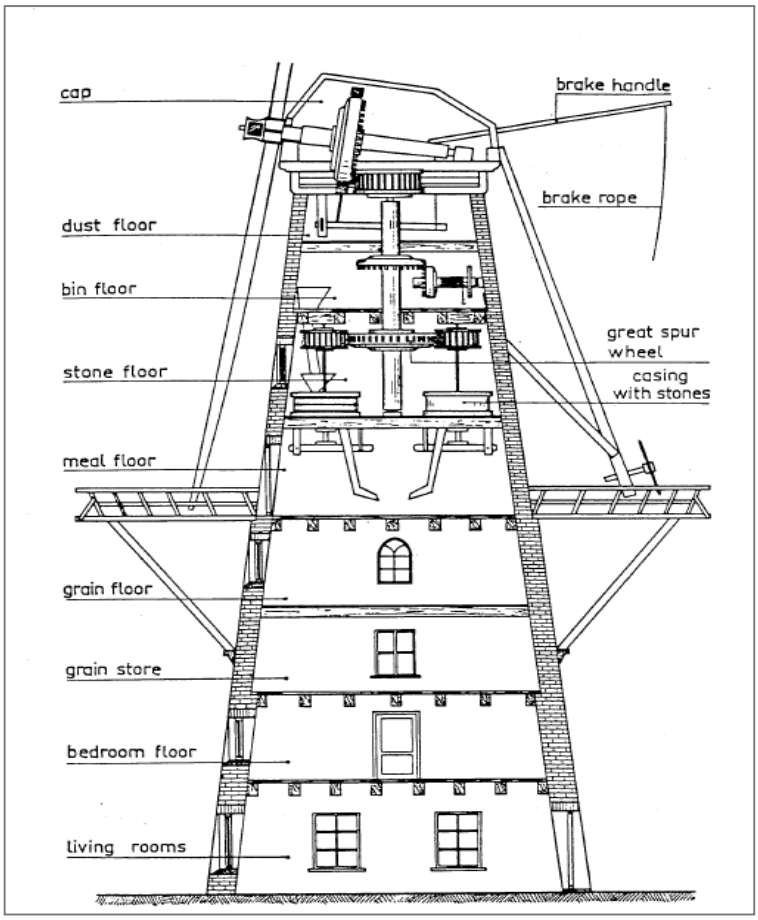
یکی از خوش منظره ترین و موفق ترین کاربردهای انرژی بادی که در حال حاضر هم موجود می‌باشد، استفاده گسترده برای پمپاژ آب در جزیره کرت می‌باشد. به معنای واقعی کلمه صدها آسیاب بادی برای پمپاژ آب برای محصولات کشاورزی و استفاده دام فعال هستند.

آسیاب‌های بادی در غرب جهان(۱۸۷۵-۱۳۰۰ بعد از میلاد مسیح)

اولین آسیاب‌های بادی در غرب اروپا از نوع محور افقی همانند شکل ۱-۴ بوده‌اند. تبدیل توربین‌های محور عمودی که توسط ایرانیان استفاده می شده به توربین‌های محور افقی به این دلیل بوده است که راندمان نیروی درگ در سیستم‌های با محور افقی بسیار بیشتر از سیستم‌های با محور عمودی است.

شکل ۱- ۴ آسیاب بادی اروپایی

برج‌های آسیاب‌های بادی در قرن ۱۳ طراحی جدیدی به خود گرفت. آسیاب‌های بادی بر بالای برج‌های بزرگ سنگی که به صورت کلاهکی دوار بوده نصب می‌شدند بادنما نیز در پشت پره‌ها نصب می‌گردید. در اوایل سال ۱۳۹۰ میلادی هلندی‌ها برج‌های جدیدی را طراحی کردند که پیش از آن در سواحل دریای مدیترانه رویت شده بودند. برجی که هلندی‌ها ساختند از چند طبقه مختلف تشکیل شده بود که شامل طبقاتی از جمله طبقه ذخیره غلات، طبقه مخصوص جداسازی کاه، طبقه سنگ آسیاب و طبقه پائین که محلی برای زندگی آسیاب‌بان بوده است. این آسیاب‌های بادی طوری طراحی شده بودند که می‌بایست به صورت دستی و با فشاردادن اهرمی که در پشت پره‌های آنها بوده به سمت باد می‌چرخیدند (شکل ۱- ۵).



شکل ۱-۵ آسیاب بادی هلندی

صدها سال مهمترین کاربرد آسیاب‌های بادی، پمپاژ آب بوده است که برای این کار از سیستم‌های کوچک با روتورهایی به طول یک تا چند متر استفاده می‌کردند. این سیستم‌ها در طول قرن ۱۹ تکمیل شدند و کار خود را با آسیاب بادی Halladay در سال ۱۸۵۴ آغاز کردند و به کار خود با طرح‌های موتور بادی و Dempster که هنوز هم مورد استفاده قرار می‌گیرند، ادامه دادند. اولین آسیاب‌ها ۴ پره چوبی داشتند که بیشتر آنها دارای اهرمی در پشت خود بودند تا پره‌ها را به سمت جهت باد بچرخانند ولی برخی از آنها برجهای‌شان را در مسیر باد برپا می‌کردند. مهمترین رویداد در آسیاب‌های بادی استفاده از پره‌های فولادی در سال ۱۸۷۰ در آمریکا بوده است (شکل ۱-۶)، چراکه پره‌های فولادی سبکتر و به شکل کارآمدتری ساخته می‌شدند. بین سال‌های ۱۸۵۰ تا ۱۹۷۰ در حدود

۶ میلیون سیستم بادی کوچک (در حدود یک اسب بخار و یا کمتر) تنها در آمریکا نصب گردید. استفاده اولیه آنها برای پمپاژ آب بمنظور تهیه آب مورد نیاز آبیاری مزارع و خانه‌ها بوده است.

شکل ۱-۶ آسیاب بادی آمریکایی با پره‌های فولادی

در اواخر قرن ۱۹ میلادی اولین آسیاب‌بادی برای تولید برق طراحی گردید. این آسیاب‌بادی در سال ۱۸۸۸ میلادی در کلیولند اوهایو توسط Charles F.Brush ساخته شد. روتورهای این آسیاب بادی به قطر ۱۷ متر بوده که یک اهرم جانبی برای چرخاندن آن به سمت باد داشته است. اولین آسیاب‌بادی گیربکسی با نسبت ۵۰:۱ بوده و ژنراتور جریان مستقیم با دور 500RPM داشته است. با وجود موفقیت نسبی این آسیاب‌بادی در مدت ۲۰ سال، محدودیت‌هایی نظیر سرعت کم و استحکام بالای روتور برای تولید برق داشت. میزان برق تولیدی این آسیاب‌بادی ۱۲ کیلوواتی با روتور ۱۷متری در مقابل توربین‌های بادی مدرن با این قطر روتور و ظرفیت ۷۰ تا ۱۰۰ کیلوواتی بسیار ناچیز می‌باشد. از این زمان بود که نام توربین‌های بادی جایگزین آسیاب‌های بادی شدند.

در سال ۱۸۹۱ میلادی فردی دانمارکی اولین سیستم بادی با پره‌های آیرودینامیکی را طراحی نمود و در بهترین برج آسیاب بادی به کار گرفت. سرعت بالاتر حرکت پره‌ها باعث تولید برق بیشتری گردید. با پایان جنگ جهانی دوم استفاده از سیستم‌های بادی ۲۵ کیلوواتی در سرتاسر دانمارک رواج پیدا کرد ولی قیمت ارزان تر سوخت‌های فسیلی در نیروگاه‌های بخاری باعث شد تا استفاده از این آسیاب‌های بادی از رونق بیفتد. اولین توربین‌های بادی کوچک برای تولید برق جریان مستقیم مورد استفاده قرار می‌گرفتند. این توربین‌ها توسط دو شرکت Parris-Dunn و Jacobs WindElectric برای استفاده در مناطق روستایی ساخته می‌شدند. کاربرد اولیه این سیستم‌ها برای روشنایی مزارع

و شارژ باتری‌ها برای استفاده در رادیو به کار می‌رفته است. در سال ۱۹۲۲ توربین‌های محور عمودی savonius توسط مهندس فنلاندی اختراع گردید. این توربین‌ها با نیروی درگ کار می‌کردند و راندمان آنها پایین بوده است. در سال ۱۹۲۷ میلادی توربین‌های محور عمودی Darrieus طراحی گردید. در این توربین‌ها از نیروی لیفت به جای درگ استفاده می‌گردید و دو یا سه پره آیرودینامیکی به محور مرکزی متصل می‌شده است. راندمان این توربین‌ها نیز پایین است چرا که نیاز به سرعت بالای باد برای شروع به چرخش دارد. توربین‌های بادی با ظرفیت بیشتر برای اولین بار در سال ۱۹۳۱ در روسیه توسعه یافتند. به طوری که توربینی ۱۰۰ کیلوواتی در سواحل دریای خزر در طول ۲ سال در حدود ۲۰۰ هزار کیلووات ساعت برق تولید نمود. پس از آن نیروگاه‌های بادی در آمریکا، دانمارک، فرانسه، آلمان و انگلستان در طول سال‌های ۱۹۳۵ تا ۱۹۷۰ با توربین‌های بادی در مقیاس بزرگ راه اندازی شدند. در سال ۱۹۳۱ توربین‌های بادی Darrieus معروف به egg beate توسط مهندسی فرانسوی اختراع گردید. بزرگترین توربین بادی به ظرفیت ۱/۲۵ مگاوات در سال ۱۹۴۱ در ورمونت نصب گردید (شکل ۱-۷).

شکل ۱-۷ توربین بادی دو پره ای

این توربین از نوع محور افقی و با ۲ پره با قطر ۱۷۵ فوت رو به باد ساخته شده بود. روتور آن از جنس فولاد ضد زنگ و به وزن ۱۶ تن بوده و سیستم کنترل آن روی ۲۸ دور در دقیقه تنظیم شده

بود. در سال ۱۹۴۵ تنها بعد از چند صد ساعت کار مداوم یکی از پره‌ها شکست و علت آن فقط به خاطر فرسودگی و خوردگی فلز آن بوده است.

اما توربین‌های مدرن امروزی بیشتر از نوع محور افقی و با سه پره می‌باشند. پره‌های این توربینها بسیار شبیه به بال هواپیما طراحی گردیده و از نیروی لیفت استفاده میکنند. میزان برق تولیدی آنها به ظرفیت توربین و محل قرار گیری آن مربوط می‌باشد. اکثر توربین‌های تجاری بین یک تا ۲/۵ مگاوات می‌باشند. با توجه به شرایط وزش باد و میزان برق مصرفی خانوارها توربین‌های یک مگاواتی برق مورد نیاز تقریبا ۵۰۰ خانه را تامین می‌کنند.

تعریف باد و معرفی انواع مرسوم آن در دنیا و منطقه

به هر گونه جریان هوایی که مابین دو منطقه صورت بگیرد در اصطلاح باد اطلاق می‌شود. در این قسمت ابتدا جریان‌های باد در حالت کلی معرفی شده و سپس به بررسی انواع بادهای مرسوم در ایران پرداخته خواهد شد.

انواع جریان‌های باد

بادها را در کل و در سطح جهان می‌توان در چهار دسته‌ی زیر طبقه‌بندی کرد:

- جریان‌های باد رایج(جهانی)[۱]
- جریان‌های باد فصلی(موسمی)[۲]
- جریان‌های باد محلی[۳]
- جریان‌های باد سایکلونیک[۴] و ضدسایکلونیک[۵]

جریان‌های باد رایج(جهانی)

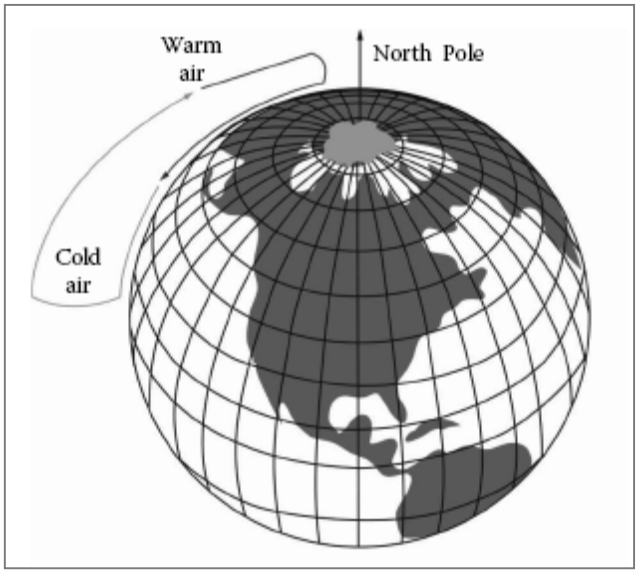
جریان‌های عمومی باد را می‌توان در حالت کلی در نتیجه‌ی تابش خورشید و انتقال انرژی توسط آن به نقاط مختلف اتمسفر و زمین دانست. خورشید و انتقال انرژی گرمایی آن به نقاط مختلف اتمسفر

---

[1] *Prevailing winds*
[2] *Seasonal winds*
[3] *Local winds*
[4] *Cyclonic winds*
[5] *Anti-cyclonic winds*

باعث گرم شدن توده‌های هوای اتمسفر می‌شود. از سویی دیگر شکل کروی زمین، گردش زمین حول خود و همچنین حول خورشید و نوسانات فصلی و منطقه‌ای تابش خورشید باعث ایجاد گرادیان‌های فشاری در نقاط مختلف زمین می‌شود که در واقع علت اساسی ایجاد جریان‌های هوا و باد می‌باشد.

اصلی‌ترین علت ایجاد گرادیان‌های فشاری در هوا و در نقاط مختلف زمین را می‌توان مربوط به ایجاد گرادیان‌های دمایی در اثر تابش و انتقال انرژی غیریکنواخت گرمایی از خورشید به زمین دانست. به عنوان مثال، مقدار انرژی گرمایی جذب شده در مناطق استوایی کره‌ی زمین بسیار بیشتر از مناطق قطبی است. این عدم یکنواختی در جذب انرژی گرمایی منجر به ایجاد توده‌های جابجایی هوا در لایه‌های زیرین اتمسفر(تروپوسفیر)[1] می‌شود. بنابـراین در یک مدل‌سازیِ اولیه و به صورت بسیار ساده می‌توان گفت جریان‌های هوا در استوا بر اثر گرم شدن بالا رفته و در مناطق قطبی پایین می‌آیند. در این مدل‌سازی فرض می‌شود که زمین ساکن است و به دور خود نمی‌چرخد. با این فرض می‌توان جریان‌های باد در کره‌ی زمین را به دو ناحیه‌ی شمالی و جنوبی تقسیم کرد. همان‌طور که در شکل ۱-۸ مشاهده می‌شود در این مدل‌سازی جریان هوا به صورت بسیار منظم از مناطق استوایی به سمت مناطق قطبی و بالعکس جریان پیدا می‌کند.



شکل ۱- ۸ نمای کلی از جریان‌های باد بر روی نیم‌کره‌ی شمالی با فرض عدم گردش زمین حول محور خود

[1] *Troposphere*

همان‌طور که ذکر شد، در این مدل‌سازی زمین به صورت ساکن فرض شده است. اما آنچه در واقعیت اتفاق می‌افتد این است که زمین با سرعت قابل توجهی حول محور خود می‌چرخد. در واقع گرمایش غیریکنواخت اتمسفر تنها عامل تأثیرگذار بر روی ایجاد بادها نمی‌باشد. چرخش زمین حول محور خود (با سرعت بیشینه‌ای معادل ۶۰۰ کیلومتر در ساعت در منطقه‌ی استوا که با حرکت به سمت قطب‌ها مقدار آن به تدریج به صفر کیلومتر در ساعت کاهش می‌یابد) از دیگر دلایل اصلی گردش لایه‌های اتمسفر، تشکیل بادها و تعیین جهت آن‌ها می‌باشد. با در نظر گرفتن چرخش زمین حول محور خود، هر نیم‌کره خود به سه ناحیه‌ی مجزای دیگر تبدیل می‌شود (شکل ۱-۹) که به ترتیب عبارتند از:

منطقه‌ی‌هادلِی[۱]

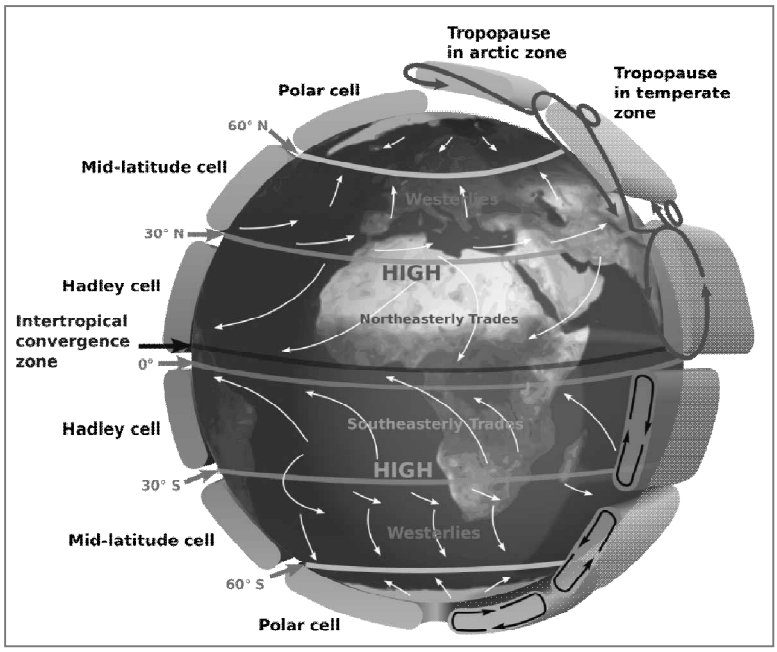
منطقه‌ی فرل[۲]

منطقه‌ی قطبی[۳]

در مدل جدید نیز، خط استوا هنوز به عنوان گرم‌ترین ناحیه‌ی زمین شناخته می‌شود. این ناحیه به عنوان منطقه‌ی همگرایی بین حاره‌ای(استوا)[۴] نیز شناخته می‌شود؛ چرا که این منطقه بادهای مناطق بالا و پایین خود را که به عنوان مناطق جنب‌حاره‌ای[۵] مشهورند به سمت خود می‌کشد. هنگامی که بادهای مناطق جنب‌حاره‌ای به استوا می‌رسند، در اثر گرم شدن و بروز پدیده‌ی جابجایی به سطوح فوقانی جو صعود می‌کنند. در این قسمت است که این توده‌ی هوا به بیشینه ارتفاع جوی خود که در حدود ۱۴ کیلومتر از سطح زمین است(منطقه‌ی فوقانیِ تروپوسفیر) رسیده و دوباره به سمت قطب‌های شمال و جنوب به راه می‌افتد.

---

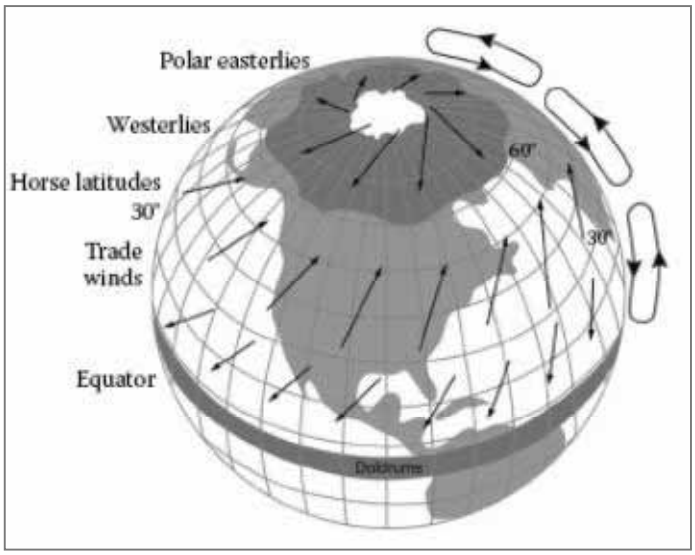
1 Hadley cell
2 Ferrel cell
3 Polar cell
4 Intertropical convergence zone(ITCZ)
5 Subtropics



شکل ۱- ۹ نمای کلی از جریان‌های باد و تقسیم‌بندی مناطق بر روی کره‌ی زمین بر حسب نوع بادها

عدم یکنواختی در انتقال انرژی گرمایی از خورشید به زمین باعث ایجاد گرادیان‌های فشاری می‌شود که باعث می‌شود هوا از مناطق پرفشار به سمت مناطق کم‌فشار به جریان درآید. گرادیان‌های فشاری ایجاد شده در راستای عمودی معمولاً به وسیله‌ی نیروهای ناشی از گرانش خنثی شده و بنابراین جریان‌های بادی عموماً در راستای افقی و بر اثر گرادیان‌های فشاری به جریان درمی‌آیند. در همین حال، نیروهایی نیز وجود دارند که به شدت تلاش می‌کنند توده‌های مختلف هوایی با فشارها و دماهای مختلف را در نقاط مختلف زمین با یکدیگر مخلوط نمایند. علاوه بر گرادیان‌های فشاری و نیروهای گرانشی، اینرسی هوا، چرخش زمین و نیروهای اصطکاکی باد با سطح زمین (که منجر به ایجاد توربولانس می‌شود) نیز بادهای اتمسفری را تحت تأثیر قرار می‌دهد. میزان اثر هر کدام از پارامترهای ذکر شده بر روی بادهای اتمسفری با توجه به مقیاس حرکت در نظر گرفته شده برای بادها متفاوت است.

نمایی کلی از حرکت بادها بر روی سطح زمین و در نیم‌کره‌ی شمالی در شکل ۱-۱۰ نمایش داده شده است. لازم به ذکر است که در این شکل الگوی ساده‌سازی شده‌ای از جریان‌های بادی می‌باشد؛ چرا که اثرات سطح زمین را بر روی جریان‌های باد مدنظر قرار داده نشده‌است.



شکل ۱- ۱۰ شمای کلی از تقسیم‌بندی نیم‌کره‌ی شمالی به قسمت‌های مختلف بر حسب بادهای وزشی در آن مناطق

با توجه به شکل ۱-۱۰ می‌توان سه نوع باد مختلف را در مقیاس جهانی از یکدیگر تمیز داد که به ترتیب با حرکت از منطقه‌ی استوایی به سمت قطب‌ها عبارتند از:

بادهای تجاری[1] : بادهای تجاری در هر دو نیم‌کره به سمت غرب و با اندکی تمایل به سمت استوا می‌وزند. این بادها تقریباً بین استوا و ۳۰ درجه‌ی شمالی و همچنین بین استوا و ۳۰ درجه‌ی جنوبی اتفاق می‌افتند. بادهای تجاری به طور بسیار منظم و ثابت بر روی اقیانوس‌ها وزیده و در زمان‌های دور کشتی‌ها از نیروی این بادها به عنوان نیروی محرکه برای حرکت استفاده می‌کرده‌اند و اصولاً وجه تسمیه‌ی آن‌ها نیز به همین خاطر است. این بادها از یک منطقه‌ی پرفشار در ۳۰ درجه‌ی شمالی و جنوبی هر نیم‌کره از منطقه‌ای موسوم به منطقه‌ی جنب‌حاره‌ای پرفشار[2]، به سمت منطقه‌ی کم‌فشار در نزدیکی استوا[3] می‌وزند. در منطقه‌ی کم‌فشار هوا بر اثر گرم شدن به سمت بالا حرکت کرده و به سمت منطقه‌ی جنب‌حاره‌ای پرفشار به جریان می‌افتد. در این منطقه این توده‌ی هوا بر اثر سرد شدن پایین می‌آید. این بادها بر اثر وجود نیروی کوریولیس[4] اندکی تغییر جهت می‌دهند؛ به این صورت که مستقیماً از سمت شمال و یا جنوب به سمت استوا نمی‌وزند. در حقیقت بر اثر وجود این نیروها، این بادها از سمت شمال‌شرق در نیم‌کره‌ی شمالی و جنوب شرقی در نیم‌کره‌ی جنوبی به

---

1 Trade winds
2 Subtropical high
3 Equatorial low
4 Coriolis force

سمت استوا در جریان هستند. باریکه‌ای آرام (بدون وزش باد) کمربندی‌های مناطق بادهای تجاری را دربرمی‌گیرد. این مناطق در نزدیکی منطقه‌ی استوایی با نام دولدرومز[1] (بین ۱۰ درجه‌ی شمالی و استوا و همچنین ۱۰ درجه‌ی جنوبی و استوا) شناخته می‌شوند که به وسیله‌ی ناخدایان و کشتی‌رانان از زمان‌های دور و به خاطر وجود هوای ساکن در این مناطق نامگذاری شده است. باریکه‌ای آرام نیز در منطقه‌ی بالای جنب‌حاره‌ای پرفشار وجود دارد که به این منطقه در اصطلاح، عرض جغرافیایی اسب[2] (۳۰ درجه‌ی شمالی و ۳۰ درجه‌ی جنوبی) گفته می‌شود؛ چرا که بر اثر عدم وجود وزش باد در این مناطق در زمان‌های دور ناخدایان مجبور بودند اسب‌های موجود در کشتی را به درون آب پرت کرده و یا به مصرف غذایی برسانند. هنگامی که بادهای تجاری از روی آب‌های گرم مناطق حاره‌ای عبور می‌کند، مقداری رطوبت هوا را با خود همراه کرده و باعث ریزش بسیار شدید نزولات جوی در مناطق کوهستانی که در مسیر مواجهه با این بادها هستند می‌شود. به عنوان مثال، مناطقی از جزیره‌ی‌هاوایی در طی سال بیش از ۱۱۸۰۰ میلی‌متر نزولات جوی دریافت می‌کند.

بادهای غربی[3]: در قسمت بالای عرض جغرافیاییِ اسب و در هر دو نیم‌کره، فشار اتمسفر کاهش پیدا کرده و مناطق کم‌فشار در عرض‌های جغرافیاییِ متوسط و بالا را سبب می‌شود. وجود این مناطق کم‌فشار و همچنین چرخش زمین به دور خود باعث ایجاد بادهایی در این منطقه می‌شوند که به سمت شرق در جریان هستند و از آن‌جا که بادها بر اساس جهت مبدأ وزش نامگذاری می‌شوند این بادها را بادهای غربی می‌نامند. بادهای غربی عموماً تحت تأثیر اغتشاش‌های حاصل از بادهای سایکلونیک و ضدسایکلونیک قرار دارند و جهت وزش باد بر اثر این اغتشاش‌های به صورت روزانه تغییر می‌کند.

بادهای شرقی قطبی[4]: مناطق قطبی و خصوصاً قطب جنوب جزء نواحی پرفشار طبقه‌بندی می‌شوند. در این مناطق بادهایی به وجود می‌آیند که از سمت شرق وزیده و بر اساس همین به نام بادهای شرقی قطبی معروفند.

همان‌طور که گفته شد توضیحات ارائه شده در این قسمت اثرات سطح زمین را در ارتباط با بادهای رایج جهانی در نظر نگرفته است. با افزایش ارتفاع در نقاط مختلف زمین سرعت بادهای غربی افزایش پیدا کرده و محدوده‌ی اثر آن‌ها از هر دو طرف به سمت استوا و قطب‌ها کشیده شده و بیشتر می‌شود. اصولاً بادهای تجاری و شرقیِ قطبی بادهای سطحی هستند و با افزایش ارتفاع جای خود را به بادهای غربی می‌دهند. شدیدترین بادهای غربی در ارتفاع ۱۰ تا ۲۰ کیلومتری از سطح

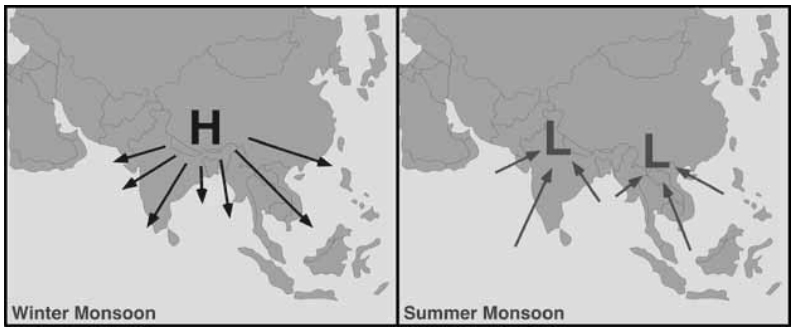
---

1 Doldrums
2 Horse latitude
3 Westerlies
4 Polar easterlies

زمین اتفاق می‌افتد. این بادها در باریکه‌ای به نام جریان جت[1] متمرکز می‌شوند که در این قسمت دارای بیشترین سرعت ممکن هستند به طوری که جریان‌های بادی معادل ۵۵۰ کیلومتر بر ساعت در این مناطق اندازه‌گیری شده است.

جریان‌های باد فصلی(موسمی)

هوای خشکی‌ها در تابستان‌ها گرم‌تر و در زمستان‌ها سردتر از اقیانوس‌های مجاور آنهاست. بنابراین، در طی فصل تابستان، قاره‌ها مراکز کم‌فشار را تشکیل داده و جریان‌های باد از سمت اقیانوس‌ها به سمت خشکی‌ها جریان پیدا می‌کند. برخلاف این رویه و در فصل زمستان، بادها از مناطق پرفشار قاره‌ها به سمت مناطق سردتر اقیانوس‌ها به جریان می‌افتند. بادهای مانسون[2] دریای چین و اقیانوس هند نمونه‌های بارزی از بادهای فصلی می‌باشند که در زیر مشخصات عمومی آن‌ها شرح داده می‌شود(شکل های ۱-۱۱ و۱- ۱۲).



شکل ۱- ۱۱ بادهای مانسون در بهار و تابستان شکل ۱- ۱۲ بادهای مانسون در پاییز و زمستان

بادهای مانسون: اصلی‌ترین نوع بادهای فصلی بادهای مانسون می‌باشند که در شبه‌جزیره‌ی هند و اقیانوس هند اتفاق می‌افتد. با شروع زمستان مناطق خشک شبه‌جزیره در قیاس با اقیانوس هند زودتر سرد می‌شوند؛ بنابراین توده‌ی هوای بالای آب‌های اقیانوس آرام بر اثر گرمای آب گرم‌تر شده و به سمت بالا حرکت می‌کنند. با جریان این هوا به سمت بالا و ایجاد مراکز کم‌فشار، جریان هوای سرد از بلندی‌های هیمالیا و شمال شبه‌جزیره‌ی هند به سمت اقیانوس هند به جریان می‌افتد. بدیهی است که در فصل تابستان و گرما، عکس این رویه اتفاق می‌افتد. بنابراین، این بادها بین ماه‌های آوریل تا اکتبر (بهار و تابستان در نیم‌کره‌ی شمالی) از سمت جنوب غربی به شمال شرقی و از اکتبر تا آوریل (پاییز و زمستان در نیم‌کره‌ی شمالی) از سمت شمال شرقی به جنوب غربی در

---

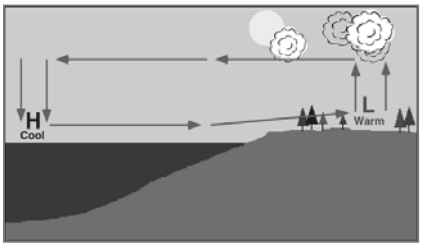
1 Jet stream
2 Monsoon winds

جریان هستند. بادهای مانسون تابستانی اغلب همراه با ریزش باران شدید در هند و مناطق شرقی هند، سبب ایجاد هوای خشک و آفتابی در فصل زمستان می‌شوند. بادهای مانسون به صورت ضعیف‌تری در دیگر نقاط زمین از جمله در استرالیا و مناطق غربی آفریقا نیز قابل مشاهده هستند.

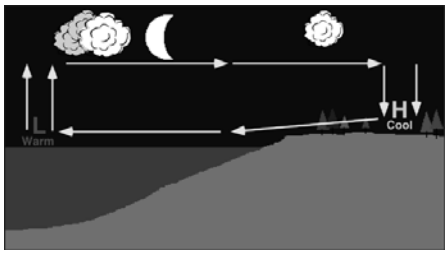
جریان‌های باد محلی

تغییرات فصلی، علاوه بر ایجاد بادهای موسمی و فصلی که در محدوده‌ی جغرافیاییِ نسبتاً گسترده‌ای اتفاق می‌افتند، تغییرات دما و فشار بر روی سطح آب و خشکی‌ها را نیز موجب می‌شوند که به واسطه‌ی همین تغییرات، بادهای محلی به وجود می‌آیند. از اصلی‌ترین بادهای محلی می‌توان بادهای خشکی- دریا و بادهای کوه- دره را نام برد که در قسمت زیر به آن‌ها پرداخته شده است.

بادهای خشکی- دریا: خشکی‌ها، مخصوصاً در فصل تابستان، در طی روز گرم‌تر از آب و در هنگام شب سردتر از آن می‌باشند. این تفاوت دما در طی روز و شب باعث بروز بادهایی می‌شوند که در روزها از سمت دریا به خشکی و به هنگام شب از سمت خشکی به دریا در جریان است. شکل‌های ۱-۱۳و ۱-۱۴ شماتیکی از وزش بادهای خشکی و دریا در طی روز و شب نمایش داده شده است.



شکل ۱- ۱۳ بادهای خشکی و دریا به هنگام روز



شکل ۱- ۱۴ بادهای خشکی و دریا به هنگام شب

بادهای کوه- دره: از نمونه‌های بارز بادهای محلی که در ارزیابی مقدار کارایی سایت‌های انرژی باد نیز از اهمیت قابل توجهی برخوردار است، می‌توان به بادهای کوه- دره اشاره کرد. این بادها در اثر تفاوت‌های دمایی توده‌های هوای مناطق کوهستانی و دره‌ها در طی شبانه‌روز جریان می‌یابد. در هنگام روز، هوای دامنه‌ی کوه‌ها در اثر گرم شدن به سمت بالا جریان یافته و جای آن را هوای خنک دربر می‌گیرد که این پروسه به صورت متناوب در طی روز تکرار می‌شود. در هنگام شب، این رویه برعکس می‌شود. شماتیکی از بادهای کوه- دره در طی روز و شب به ترتیب در شکل‌های ۱- ۱۵ و ۱- ۱۶ نمایش داده شده است.