دانشکده مهندسی

گروه مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

بررسی خرابی خستگی در پره توربین بادی

مؤلف:

هادی یغمائی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

استاد راهنما:

دکتر خلیل فرهنگدوست

شهریور ۱۳۹۰

بسم الله الرحمن الرحیم

دانشکده مهندسی

گروه مکانیک

عنوان پایان‌نامه:

بررسی خرابی خستگی در پره توربین بادی

مؤلف:

هادی یغمائی

ارائه شده جهت اخذ درجه کارشناسی ارشد

در رشته مهندسی مکانیک گرایش طراحی کاربردی

استاد راهنما:

دکتر خلیل فرهنگدوست

دانشیار گروه مکانیک

شهریور ۱۳۹۰

بسمه تعالی

مشخصات رساله/پایان نامه تحصیلی دانشجویان

دانشگاه فردوسی مشهد

عنوان رساله/پایان نامه: بررسی خرابی خستگی در پره توربین بادی

نام نویسنده: هادی یغمائی

نام استاد(ان) راهنما: دکتر خلیل فرهنگدوست

نام استاد(ان) مشاور:

دانشکده : مهندسی	**گروه: مکانیک**	**رشته تحصیلی: مکانیک – طراحی کاربردی**
تاریخ تصویب:		**تاریخ دفاع: ۱۳۹۰/۷/۱۴**
مقطع تحصیلی: کارشناسی ارشد ● دکتری ○		**تعداد صفحات: ۱۲۸**

چکیده رساله/پایان نامه :

در این پایان‌نامه پدیده خستگی در نوعی پره توربین بادی محور افقی از جنس مواد مرکب مورد بررسی قرار گرفت. ابتدا مطالعات آماری داده‌های هواشناسی نیروگاه محل نصب توربین به منظور ارائه تابع توزیع احتمالی باد بر اساس توزیع ویبول انجام گردیده و کلیه شرایط کارکردی توربین و حالات بارگذاری پره تعیین گردید. مدل المان محدود پره به طور کامل و سه بعدی در **ANSYS** ایجاد شده و به منظور اطمینان از صحت جواب‌های حاصل، تعداد المان مناسب برای تحلیل با استفاده از معیار همگرایی انتخاب گردید. جهت شناسایی رفتار ماده در برابر حالات بارگذاری، تحلیل استاتیکی خطی و غیرخطی صورت گرفت. آن دسته از بارگذاری‌ها که در مقایسه با سایر بارهای وارد به پره توربین سهم عمده‌ای را به خود اختصاص نمی‌دادند به علت عدم تاثیر قابل ملاحظه در پدیده خستگی صرفنظر شدند. با توجه به توزیع جریان باد بدست آمده منطقه، ناحیه بحرانی مربوط به بازه سرعتی که احتمال وقوع آن بیشتر از سایر سرعتهای باد است، بعنوان بحرانی‌ترین محدوده از نظر پدیده خستگی انتخاب گردید. این ناحیه در محدوده تغییر شکل پره از بالواره به دایره قرار دارد. بررسی تنش‌ها در این ناحیه بیانگر حاکم بودن پدیده خستگی تک محوره می‌باشد. برای تخمین عمر خستگی پره از روش ساده‌ای مبتنی بر توصیه‌نامه **GL** استفاده شد.

با توجه به پیچیدگی مکانیزم‌های شکست خستگی در مواد مرکب نسبت به فلزات، امکان بررسی رفتار خستگی یک ترک غالب در پره و تعیین طول بحرانی ترک میسر نیست. از اینرو ضمن تحلیل استاتیکی ترک در مدل ساده شده منطقه بحرانی پره، تأثیر پارامترهای طول، زاویه و موقعیت ترک مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد ترک لبه‌ای نسبت به ترک میانی شرایط بحرانی‌تری دارد و بحرانی‌ترین حالت ترک درون لایه‌ای لبه‌ای و میانی در زاویه ۳۰ درجه است.

کلید واژه:

۱. خستگی

۲. پره توربین بادی

۳. تحلیل اجزاء محدود

۴. ترک

۵. انتگرال جی

امضای استاد راهنما:

تاریخ:

تاییدیه گروه مکانیک

پایان نامه حاضر تحت عنوان:

بررسی خرابی خستگی در پره توربین بادی

که توسط آقای **هادی یغمائی** تهیه و به هیات داوران ارائه شده، به عنوان کار پژوهشی دوره کارشناسی ارشد ناپیوسته مکانیک در گرایش طراحی کاربردی، مورد تایید شورای تحصیلات تکمیلی گروه مکانیک دانشکده مهندسی دانشگاه فردوسی مشهد می‌باشد.

تاریخ دفاع: نمره: درجه ارزشیابی:

اعضای هیات داوران:

نام و نام خانوادگی	**سمت**	**امضاء**
دکتر خلیل فرهنگدوست	استاد راهنما	
دکتر حمید اختراعی طوسی	استاد ممتحن	
دکتر سعید حدیدی مود	استاد ممتحن	

دکتر محمدحسین ابوالبشری نماینده تحصیلات تکمیلی

تاییدیه گروه مکانیک

گواهی می‌شود این پایان نامه تاکنون برای احراز یک درجه علمی ارائه نشده است و تمامی مطالب آن به جز مواردی که نام مرجع آورده شده است، نتیجه کار پژوهشی دانشجو می‌باشد.

دانشجو: هادی یغمائی امضاء تاریخ

استاد راهنما: دکتر خلیل فرهنگدوست امضاء تاریخ

تشکر و قدردانی

در ابتدا بر خود لازم می‌دانم از زحمات بی‌دریغ جناب آقای **دکتر خلیل فرهنگدوست** که از رهنمودهای بی‌شائبه ایشان در طول انجام پایان نامه بهره مند بوده ام، تشکر و قدردانی کنم. همچنین از اساتید محترم آقایان دکتر ابوالبشری، دکتر اختراعی طوسی و دکتر حدیدی مود کمال تشکر را دارم. از همکاری پرسنل محترم نیروگاه بادی بینالود کمال تشکر را داشته و سپاسگزارم. در نهایت از دوستان عزیز آقایان رهام رفیعی، سعید نوری، علی ناصریان و سعید رهنما که از راهنمایی‌های ایشان استفاده نمودم، تشکر می کنم.

این پایان نامه را به پاس زحمات فراوان و حمایت های بی دریغشان به پدر و مادر مهربان و همسر عزیزم تقدیم می کنم.

فهرست مطالب

عنوان	صفحه
فهرست مطالب	الف
فهرست جداول	د
فهرست اشکال	و
فهرست علائم	ز
فهرست اختصارت	ک
فصل اول : مقدمه	۱
۱-۱ انواع توربین‌های بادی	۵
۱-۲ اهداف پژوهش	۹
۱-۳ پدیده خستگی در پره توربین باد و نقش مواد مرکب.....	۱۰
۱-۴ نیروگاه بادی بینالود.....	۱۷
۱-۵ ساختار پایان نامه.....	۲۷
فصل دوم: پیشینه تحقیق	۳۲
۲-۱ مطالعات پیشین در زمینه خستگی توربین بادی.....	۳۴
۲-۲ مراحل کلی بررسی پدیده خستگی توربین بادی.....	۴۰
فصل سوم: مبانی نظری	۴۵
۳-۱ بررسی جریان باد.....	۴۵
۳-۱-۱ تابع توزیع احتمالی ویبول.....	۴۶
۳-۱-۲ محاسبه تابع احتمال ویبول بر اساس داده‌های آماری.....	۵۰

عنوان **صفحه**

۳-۱-۳ محاسبه مقادیر c و k با استفاده ازتابع گاما ۵۰

۳-۱-۴ محاسبه مقادیر c و k با استفاده ازتابع احتمال تجمعی ۵۱

۳-۲ مشخصه سازی مواد ۵۲

۳-۳ حالات بارگذاری ۶۴

۳-۳-۱ محاسبه نیروها ۶۹

۳-۳-۲ نیروی ناشی از وزش تند باد ۷۱

۳-۳-۳ نیروی ناشی از تغییر جهت باد ۷۲

۳-۳-۴ نیروی ژیروسکوپی ناشی از حرکت دماغه توربین ۷۲

۳-۳-۵ نیروی ژیروسکوپیک ناشی از چرخش دماغه با سرعت زاویه‌ای ثابت ۷۳

۳-۳-۶ نیروی ناشی از فعال شدن ترمز مکانیکی به هنگام توقف ۷۴

۳-۳-۷ نیروهای آیرودینامیک مقاطع مختلف پره ۷۵

۳-۴ عمر خستگی ۷۸

۳-۴-۱ مکانیزم تخریب خستگی در مواد مرکب ۸۰

۳-۴-۲ رشد ترک داخلی و مودهای تخریب خستگی ۸۱

۳-۴-۲-۱ تئوری‌های تجربی خستگی ۸۳

۳-۴-۲-۲ تئوری‌های خستگی بر اساس مکانیزم‌های تخریب ۸۴

۳-۴-۲-۳ تئوری‌های خستگی بر اساس تقلیل سفتی ۸۴

۳-۴-۲-۴ تئوری‌های خستگی بر اساس تقلیل استحکام ۸۵

۳-۴-۳ خستگی پره توربین باد ۸۷

۳-۵ تحلیل ترک در مواد مرکب ۹۳

۳-۵-۱ تعیین انتگرال J بر اساس روش اجزاء محدود ۹۶

۳-۵-۲ انواع ترک های در مواد مرکب ۹۶

فصل چهارم: تحلیل مدل اجزاء محدود ۹۹

۴-۱ مدل‌سازی ۹۹

۴-۲ تحلیل استاتیکی ۱۰۵

عنوان **صفحه**

۴-۲-۱ اعمال بار آیرودینامیک و نیروی ناشی از وزش تندباد ۱۰۷

۴-۲-۲ تحلیل حرارتی ۱۰۸

۴-۲-۳ برهم نهی تمامی نیروها ۱۱۰

۴-۲-۴ تحلیل پدیده کمانش ۱۱۱

فصل پنجم: بررسی نتایج ۱۱۳

۵-۱ نتایج تحلیل اجزاء محدود ۱۱۳

۵-۲ انتخاب بحرانی ترین منطقه برای تحلیل خستگی ۱۱۶

۵-۳ عمر خستگی پره ۱۱۸

۵-۴ بررسی رفتار ترک در منطقه بحرانی ۱۱۹

فصل ششم: نتیجه‌گیری و پیشنهادات ۱۲۲

۶-۱ نتیجه‌گیری ۱۲۲

۶-۲ پیشنهادات ۱۲۵

مراجع ۱۲۶

پیوست۱: توزیع ویبول جریان باد منطقه ۱۲۹

پیوست۲: ماکروی محاسبه انتگرال J در ANSYS ۱۳۲

پیوست۳: حالات بارگذاری پره توربین بادی براساس توصیه نامه GL ۱۳۴

فهرست اشکال

عنوان شکل **صفحه**

شکل۱-۱: نمونه آسیاب بادی محور عمودی در الف) افغانستان کنونی ب) خواف و نهبندان ۲

شکل۱-۲: پیش‌بینی سهم تولید انرژی بادی در میان انرژی‌های تجدید پذیر در سال ۲۰۱۳ ۴

شکل۱-۳: پتانسیل بالقوه تجارت توربین‌های بادی در خاورمیانه در سال ۲۰۰۹ ۴

شکل۱-۴: انواع طرح‌های مفهومی توربین بادی محور عمودی ۶

شکل۱-۵: انواع طرح‌های مفهومی توربین بادی محور افقی ۷

شکل۱-۶: اجزای توربین بادی مورد مطالعه ۸

شکل۱-۷: جایگاه مواد پیش آغشته در تولید ۱۱

شکل۱-۸: انواع مختلف الیاف پیش آغشته از دیدگاه پیکربندی الیاف ۱۲

شکل۱-۹: انواع الیاف چند جهته ۱۴

شکل۱-۱۰: مقایسه بین عمر مورد انتظار از قطعات صنایع مختلف ۱۷

شکل۱-۱۱: نیروگاه بادی بینالود ۱۸

شکل۱-۱۲: نمونه مقادیر واقعی اندازه‌گیری شده توربین بادی S47-660 ۲۱

شکل۱-۱۳: قالب مواد مرکب تولید پره ۲۳ متری توربین باد مورد مطالعه ۲۲

شکل۱-۱۴: مندرل تولید تیر اصلی و تیرهای تولید شده در کارخانه سدیدصبانیرو ۲۳

شکل۱-۱۵: مونتاژ تیر اصلی در داخل پوسته و مرحله بسته شدن قالب ۲۴

شکل۳-۱: نمونه‌ای از توزیع احتمالی رایلی ۴۷

شکل۳-۲: نمودار تابع ویبول برای مقادیر مختلف k ۴۷

شکل۳-۳: تغییرات نمودار ویبول با تغییر پارامتر c ۴۸

شکل۳-۴: جهات مختلف الیاف بر روی پارچه‌های دو و سه جهته ۵۴

شکل۳-۵: نمودار کلی حالات مختلف کاری و بیرونی توربین باد ۶۵

عنوان شکل **صفحه**

شکل۳-۶: شکل شماتیک نمودار توان ۶۶

شکل۳-۷: سیستم مختصات پره توربین محور افقی ۶۹

شکل۳-۸: سیستم مختصات توپی پره توربین محور افقی ۷۰

شکل۳-۹: برآیند سرعت باد و سرعت خطی دوران یک مقطع از پره ۷۶

شکل۳-۱۰: هندسه مقطع پره توربین محور افقی و نیروهای آیرودینامیکی وارد بر آن ۷۶

شکل۳-۱۱: مقایسه تفاوت بارگذاری در حالت دوران روتور و ثابت بودن آن ۸۷

شکل۳-۱۲: انواع چرخه های خستگی موثر بر پره توربین باد ۸۸

شکل۳-۱۳: طیف بار ساده شده جهت محاسبه عمر خستگی ۹۰

شکل۳-۱۴: نمودار S-N و دیاگرام گودمن ۹۱

شکل۳-۱۵: حجم ماده جابجا شده در اثر تغییر شکل جسم ۹۳

شکل۳-۱۶: مشخصات سیستم مختصات ۹۵

شکل۳-۱۷: محاسبه انتگرال J ۹۶

شکل۳-۱۸: شکل کلی ترک در مواد مرکب ۹۷

شکل۴-۱: نمایش مقاطع پره در سراسر طول از نمای ایزومتریک ۱۰۰

شکل۴-۲: نمایش مقاطع پره از نمای قطعه اتصال به ریشه ۱۰۰

شکل۴-۳: مدل اجزاء محدود پره ۱۰۱

شکل۴-۴: نمای نوک پره ۱۰۱

شکل۴-۵: المان Shell99 در ANSYS ۱۰۳

شکل۴-۶: خروجی های المان Shell99 ۱۰۴

شکل۴-۷: المان Solid95 در ANSYS ۱۰۴

شکل۴-۸: سیستم مختصات انتخاب شده برای مدل المان محدود پره ۱۰۵

شکل۵-۱: تغییرات انتگرال J برای ترک درون لایه ای میانی بر حسب زاویه ترک ۱۲۰

شکل۵-۲: تغییرات انتگرال J برای ترک درون لایه ای میانی بر حسب مقادیر مختلف a/b ۱۲۱

شکل۵-۳: تغییرات انتگرال J برای ترک درون لایه ای لبه ای بر حسب مقادیر مختلف a/b ۱۲۱

شکل۵-۴: تغییرات انتگرال J برای ترک درون لایه ای لبه ای بر حسب زاویه مختلف ترک ۱۲۱

فهرست جداول

عنوان جدول **صفحه**

جدول۱-۱: پتانسیل بالقوه تجارت توربین‌های بادی در خاورمیانه در سال ۲۰۰۹ ۴

جدول۱-۲: پتانسیل بالقوه تجارت توربین‌های بادی در ایران در سال‌های ۲۰۱۴- ۲۰۰۴ ۵

جدول۱-۳: تقاضای بالقوه استفاده از توربین بادی شهرهای مختلف ایران در سال۲۰۰۹ ۵

جدول۱-۴: خواص مکانیکی فلز 37 بکار رفته در قطعه اتصال ریشهST ۲۰

جدول۱-۵: اطلاعات ارقامی پره و سایر اطلاعات مورد نیاز ۲۵

جدول۱-۶: پیکربندی لایه‌چینی پره ۲۷

جدول۳-۱: خواص مکانیکی بدست آمده از آزمایش ۵۴

جدول۳-۲: خواص مکانیکی مواد مورد استفاده در پره ۶۳

جدول۳-۳: خواص استحکامی مواد مورد استفاده در پره ۶۳

جدول۴-۱: نتایج تحلیل استاتیکی با اعمال بار آیرودینامیک و تندباد در بحرانی ترین لایه ۱۰۷

جدول۴-۲: خصوصیات حرارتی الیاف تک جهته شیشه/اپوکسی ۱۰۹

جدول۴-۳: نتایج حاصل از تحلیل حرارتی گرادیان دمایی ۱۰۹

جدول۴-۴: نتایج حاصل از تحلیل حرارتی تحریک گرمایی ۱۱۰

جدول۵-۱: نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی با اعمال بار آیرودینامیک در بحرانی ترین لایه ۱۱۳

جدول۵-۲: نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی خطی و غیر خطی پره ۱۱۴

جدول ۵-۳: نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی در حالت آماده به کار در بحرانی ترین لایه ۱۱۵

جدول۵-۴ نتایج حاصل از تحلیل استاتیکی در حالت راه اندازی در بحرانی ترین لایه ۱۱۵

جدول۵-۵: تحلیل استاتیکی غیرخطی بحرانی ترین حالت تولید توان در بحرانی ترین لایه ۱۱۵

جدول۵-۶: تحلیل استاتیکی غیرخطی حالت توقف در بحرانی ترین لایه ۱۱۵

جدول۵-۷: نتایج حاصل از تحلیل کمانش پره ۱۱۶

جدول۵-۸: تغییرات انتگرال J برای ترک درون لایه‌ای میانی ۱۱۹

جدول۵-۹: تغییرات انتگرال J برای ترک میان لایه‌ای لبه ای ۱۲۰

فهرست علائم

علائم لاتین

مساحت	A
سطح جاروب شده توسط روتور	A
ضریب انبساط طولی در جهت الیاف	α_x
ضریب انباسط طولی در جهت عمود بر الیاف	α_y
ماتریس انطباق	a_{ij}
تعداد پره‌های توربین	B
گرمای ویژه	C
ضریب توان توربین	C_P
پارامتر مقیاس	c
آسیب خستگی انباشته	D
مدول الاستیک چند لایه	E_i
مدول الاستیک لایه در جهت الیاف	E_x
مدول الاستیک لایه در جهت عمود بر الیاف	E_y
فاصله مرکز جرم روتور از محور برج	e_0
نیروی پسآ	F_D
نیروی برآ	F_L
نیروهای آیرودینامیکی	F_{XB}
مدول برشی	G
ضخامت لایه	h
تابع احتمالی ویبول	h(v)
تابع احتمال تجمعی ویبول	H(v)
ممان اینرسی یک پره نسبت به محور روتور	I_B
ممان اینرسی موثر سیستم دربرگیرنده توپی پره، محور روتور، چرخدنده‌ها و ژنراتور	I_o
انتگرال جی	J
پارامتر شکلی	K
ضریب سرعت تندباد	k_b
ضریب هدایت حرارتی در جهت الیاف	K_x
ضریب هدایت حرارتی در جهت عمود بر الیاف	K_y

M_B	ممان ترمزی
M_{XN}	گشتاور وارد بر برج
m_b	جرم هر پره
N	تعداد سیکل
N_i	تعداد سیکل مجاز برای تغییرات تنش i
N_{max}	عمر خستگی
n	تعداد لایه ها یا گروه‌ها
n	بردار نرمال یکه سطح
n_i	تعداد سیکل بارگذاری برای تغییرات تنش i
p	نسبت مقدار الیاف یک لایه به کل الیاف چند لایه
P_B	فشار متوسط حالت تندباد
P_{el}	توان الکتریکی توربین
P_N	فشار متوسط جریان باد
p(v)	تابع احتمالی تجمعی
Q	ماتریس سفتی
R_d	استحکام طراحی شده
R_k	استحکام ماده
r	فاصله از مرکز روتور
r_s	فاصله مرکز جرم پره از محور دوران
S	تنش مربوط به حالت بارگذاری
S_T	مرز ماده
S_U	مرز ماده
S_{XY}	استحکام برشی
T	بارهای کششی سطحی
t_i	ضخامت کلی چندلایه
t_{ni}	ضخامت ماده n در چندلایه
u	تغییر مکان
V	حجم اصلی جسم
v	سرعت باد
v_{avg}	سرعت متوسط باد در طول روز
v_b	سرعت تند باد
v_{mean}	سرعت متوسط باد در طول سال
v_{rel}	سرعت نسبی باد

دانسیته انرژی کرنش	W
مؤلفه x دستگاه مختصات پره (راستای وزش باد)	X_B
استحکام فشاری در جهت الیاف	X_C
استحکام کششی در جهت الیاف	X_T
مؤلفه y دستگاه مختصات پره	Y_B
استحکام فشاری در جهت عمود بر الیاف	Y_C
استحکام کششی در جهت عمود بر الیاف	Y_T
مؤلفه z دستگاه مختصات پره (راستای طولی پره)	Z_B

علائم یونانی

زاویه لایه اول نسبت به دستگاه مختصات	α
ضریب پواسون اصلی چندلایه ± 45	α
زاویه حمله باد	α
زاویه لایه دوم نسبت به دستگاه مختصات	β
ضریب پواسون اصلی چندلایه 0/90	β
محیط سطح	Γ
تابع گاما	$\Gamma(x)$
ضریب اطمینان طراحی استاتیکی	γ_{ma}
ضریب اطمینان طراحی خستگی	γ_{mb}
سطح ماده برداشته شده برای ایجاد یک فضای خالی	ΔA
مرز تازه تشکیل یافته بدون کشش	ΔS
کاهش انرژی پتانسیل	ΔU_P
حجم ماده جابجا شده	ΔV
تغییرات تنش	$\Delta\sigma$
تانسور تنش	ε_{ij}
ضریب پواسون فرعی چندلایه 0/90/-45	ξ
راندمان کلی ژنراتور و گیربکس	η
زاویه محورهای اصلی مواد با دستگاه مرجع	θ_1
زاویه ترک با دستگاه مختصات مرجع	θ_2
زاویه پیچش مقطع	θ_T
زاویه گام مقطع	θ_P
زاویه گام نوک پره	$\theta_{P,0}$
ضریب پواسون	μ

جرم در واحد طول	$\mu(r)$
ضریب پواسون	ν
معرف چگالی هوا	ρ
تانسور کرنش	σ_{ij}
استحکام چندلایه	σ_S
استحکام چندلایه i ام	$\sigma_{allowable_i}$
استحکام لایه یا گروهی از لایه‌ها	$\sigma_{allowable_n}$
تنش متوسط ناشی از نیروهای آیرودینامیکی	$\bar{\sigma}$
انحراف معیار	σ^2
زاویه نسبی باد و صفحه دوران روتور	φ
ضریب پواسون فرعی چندلایه 45±/0	φ
سرعت زاویه‌ای حرکت دماغه	Ω
شتاب زاویه‌ای حرکت دماغه	$\dot{\Omega}$
سرعت زاویه‌ای دوران روتور	ω
شتاب زاویه‌ای روتور	$\dot{\omega}$

فهرست اختصارات

SUNA	سازمان انرژی‌های نو ایران	سانا
Biax	Biaxial	دو جهته
CFRP	Carbon Fibre Reinforced Plastics	پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف کربن
COD	Crack Opening Displacement	بازشدگی ترک
CTOD	Crack Tip Opening Displacement	بازشدگی نوک ترک
DOE	U.S. Department Of Energy	وزارت انرژی ایالات متحده
FACT	FAtigue of Composites for wind Turbines database	داده‌های خستگی موادمرکب برای توربین‌های بادی
GFRP	Glass Fiber Reinforced Plastics	پلاستیک‌های تقویت شده با الیاف شیشه
GL	Germanischer Lloyd SE	سازمان GL
HAWT	Horizontal Axis Wind Turbine	توربین بادی محور افقی
IEC	International Electrotechnical Commission	کمیته بین المللی الکترونیک
MSU	Michigan State University	دانشگاه ایالتی میشیگان
PMI	PolyMetacrylImide	پلی متیل آکریل آمید
PVC	PolyVinyl Chloride	پلی وینیل کلراید
Triax	Triaxial	سه جهته
UD	Uni-directional	تک جهته
VAWT	Vertical Axis Wind Turbines	توربین بادی محور عمودی
WISPER	Wind turbine reference Spectra	طیف‌های مرجع توربین بادی

فصل اول

مقدمه و مفاهیم اولیه

استفاده از انرژی باد تکنولوژی جدیدی نیست بلکه تکنولوژی نوینی از کاربرد بسیار کهن نیروی باد است. در دوره‌های متعدد تاریخی، باد منبع عمده انرژی جهت حمل و نقل (کشتی‌های بادبانی)، آسیاب کردن و پمپاژ آب بوده است. آسیاب‌های بادی نخستین نسل ماشین‌های بادی بوده‌اند که حداقل از ۳۰۰۰ سال پیش مورد استفاده بشر قرار گرفته‌اند[۱]. درباره خاستگاه تاریخی آسیاب‌های بادی اظهارات متناقضی وجود دارد، قدیمی‌ترین اطلاعات معتبر در مورد وجود آسیاب‌های بادی متعلق به سال ۶۴۴ پس از میلاد مسیح در ایران و منطقه سیستان می‌باشد[۲]. نمونه‌های بسیار قدیمی از این نوع آسیاب‌های بادی در ایران و افغانستان به جای مانده‌اند (شکل۱-۱).

انرژی خورشیدی منشأ بسیاری از منابع انرژی مورد استفاده بشر است که این منابع به دو دسته کلی تقسیم می‌شوند:

- منابع محدود شامل نفت، گاز طبیعی، زغال سنگ و سوخت‌های فسیلی
- منابع تجدید پذیر انرژی شامل تابش، باد، آب، زیست توده[۱]، انرژی حرارتی و امواج اقیانوس[۳]

[۱] Biomass

الف

ب

شکل ۱-۱: نمونه آسیاب بادی محور عمودی در الف) افغانستان کنونی[۲] ب) خواف و نهبندان[۷]

آب و باد مهم‌ترین منابع انرژی مورد استفاده بشر پیش از اختراع ماشین بخار بوده‌اند. وجود منابع گسترده انرژی‌های فسیلی موجب گردید استفاده از نیروی باد جهت تولید انرژی برای سالیان متمادی به لحاظ اقتصادی ناکارآمد و غیر قابل قبول لحاظ شود. در نتیجه تحقیقات لاکور[۱] دانمارکی[۱] نخستین بار در سال ۱۸۸۸ چارلز اف. براش[۲] در ایالت اوهایو آمریکا موفق به تولید برق از آسیاب بادی شد که در شرایط مناسب وزش باد ۱۲kW برق تولید می‌کرد[۲]. بحران انرژی در سال ۱۹۷۳ و افزایش ناگهانی قیمت نفت موجب توجه دولت‌ها به توسعه پژوهش در زمینه استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر گردید.

---

[۱] LaCour

[۲] Charles F. Brush

منابع محدود سوخت‌های فسیلی و مشکلات آلودگی ناشی از مصرف آنها موجب رویکرد دوباره بشر به استفاده از انرژی‌های تجدید پذیر شده است.

انرژی بادی یک تجارت جهانی با سرعت رشد و توسعه زیاد است[۴]. خصوصیات منحصر به فردی از قبیل عدم آلودگی هوا و مشکلات زیست‌محیطی، قابلیت نصب و راه‌اندازی سریع، هزینه تعمیرات و نگهداری کم و استفاده از انرژی طبیعی باد، منجر به توسعه نیروگاه‌های بادی در دنیا شده است. توسعه توربین‌های بادی مدرن امروزی در دنیا قدمتی ۲۵ ساله دارد و تلاش برای به حداقل رساندن هزینه برق تولیدی به منظور رقابت با سایر نمونه‌های رایج و متدوال بیانگر صنعتی است که هنوز مراحل توسعه را طی می‌نماید. نیروگاه‌های بادی با شاخص‌های اقتصادی موجه، کمترین میزان تولید آلودگی را داشته و از اینرو از جمله با اهمیت‌ترین انواع نیروگاه‌های مبتنی بر انرژی‌های تجدیدپذیر محسوب می‌شوند. آمارها نشان می‌دهد که نیروگاه‌های بادی به دلیل راندمان بالا، توان بالای تولید برق، سهولت نصب و قیمت مناسب توربین‌های بادی، سریع‌ترین رشد را در میان سایر منابع تجدیدپذیر داشته و انرژی باد بهترین بازار جهانی را نسبت به سایر منابع تجدیدپذیر در اختیار خواهد داشت. براساس یک بررسی بعمل آمده ایران به لحاظ پتانسیل‌های بالقوه، چهارمین مشتری بازار تجارت جهانی توربین‌های بادی در سال ۲۰۰۹ در آسیا بوده است[۵]. در پایان سال ۲۰۰۹ میلادی ظرفیت توربین‌های بادی نصب شده در سرتاسر جهان به ۱۵۹,۲۱۳MW رسید که قاره آسیا بیشترین سهم در تأسیسات جدید را داشته و پس از آن آمریکای شمالی و اروپا قرار گرفته‌اند. آمریکا، چین و آلمان بیشترین ظرفیت تولید انرژی از باد را در سال ۲۰۰۹ داشته و ایران با ظرفیت تولید ۸۲MW در جایگاه ۳۸ دنیا قرار گرفته است. ظرفیت توربین‌های نصب شده در این سال نسبت به سال گذشته ۳۱.۷٪ افزایش داشته که بیشترین نرخ رشد از سال ۲۰۰۱ بوده است[۶]. براساس پیش‌بینی‌ها در سال ۲۰۱۳ تولید انرژی توسط منابع تجدیدپذیر انرژی به ۶.۲۵٪ خواهد رسید که ۵۲٪ آن سهم انرژی باد خواهد بود[۷].