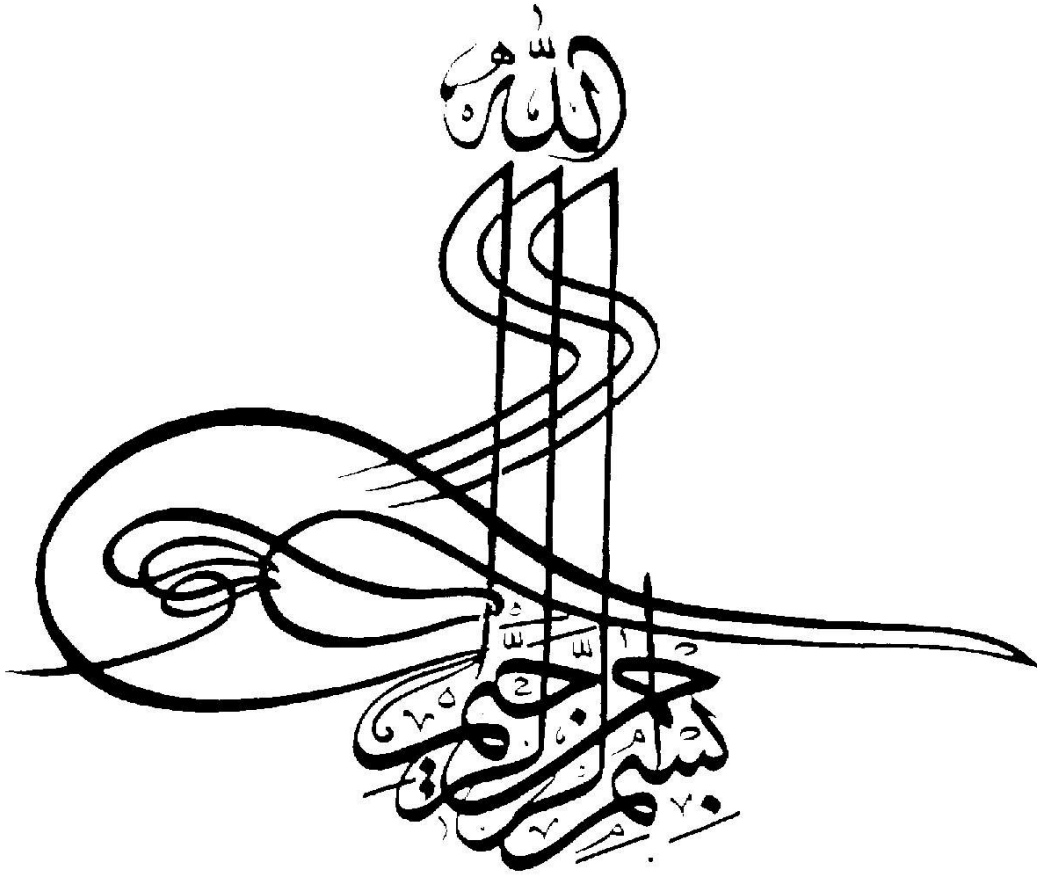
الله
بسم الله الرحمن الرحيم

پژوهشگاه مواد و انرژی

پایان‌نامه کارشناسی ارشد رشته مهندسی انرژی های نو و تجدید پذیر

موضوع

طراحی و تحلیل سازه دکل کامپوزیت توربین بادی

استادان راهنما :

دکتر سید محمود هاشمی نژاد

دکتر مجید جمیل

نگارنده:

وحید پایانی

کد شناسه پروژه:

۵۷۸۸۶۰

سال تحصیلی۱۳۹۰ -۱۳۸۹

تقدیم به

به مادرم، دریای بی کران فداکاری و عشق که وجودم برایش همه رنج بود و وجودش برایم همه مهر.

و

روح پاک پدرم که عالمانه به من آموخت تا چگونه در عرصه زندگی، ایستادگی را تجربه نمایم.

با تشکر و قدردانی فراوان از

استاد فرهیخته و فرزانه جناب آقای دکتر هاشمی نژاد

که همواره با حمایت ها و راهنمایی های سازنده خود مرا مورد لطف و کرامت خویش قرار دادند.

چکیده

همگام با روند پیشرفت در توربین‌های بادی، نیاز می‌باشد که دکل‌های نگهدارنده آنها نیز مستحکم‌تر و بهینه گردند و این خود به بزرگتر شدن قطر و ابعاد دکل می‌انجامد. به علت اندازه و وزنشان، حمل ونقل و نصب آنها به تجهیزات سنگینی نیاز دارد که ممکن است استفاده از چنین دکل‌هایی را برای مناطق دورافتاده دچار مشکل سازد. به منظور رفع این مشکل و به جهت دور نماندن از فناوری روز دنیا لازم می-باشد که پژوهش‌های ما نیز در جهت تحقیقات علمی در حال انجام در کشورهای توسعه یافته باشد لذا در این پایان نامه به طراحی و تحلیل مدل دکل کامپوزیت توربین بادی و مقایسه آن با یک دکل فولادی پیش طراحی شده توسط یک شرکت معتبر تجاری، پرداخته شده است. این پروژه در چند مرحله انجام شده است بدین ترتیب که در ابتدا برای آنکه مقایسه‌ای بین نتایج مدل المان محدود و نتایج تجربی شده باشد، یک نمونه مدل که قبلاً بر روی آن کار آزمایشگاهی شده بود، مورد تحلیل المان محدود قرار گرفت و سپس با توجه به استانداردهای موجود، مدل دکلی کامپوزیتی برای توربین بادی ۲/۴ کیلوواتی طراحی و تحلیل شد که تقریباً ۴۸٪ وزن سازه را نسبت به دکل فولادی کاهش داد.

کلید واژه: دکل توربین بادی، کامپوزیت، مدل المان محدود

فهرست مطالب

عنوان **صفحه**

فهرست جدول‌ها ..... ج
فهرست شکل‌ها ..... د
فهرست علایم و نشانه‌ها ..... و

فصل ۱- مقدمه ۱
۱-۱- هدف از این مطالعه ۱
۱-۲- تاریخچه مختصری از انرژی باد ۲
۱-۳- انواع دکل توربین بادی ۳
۱-۴- استاندارد طراحی دکل‌های توربین بادی ۶
۱-۵- رفتار یک سازه لوله‌ای شکل ۶
۱-۶- کمانش کلی و محلی پوسته استوانه‌ای شکل ۷
۱-۷- مروری بر پژوهش‌های انجام شده در گذشته ۱۰

فصل ۲- مکانیک مواد مرکب ۱۶
۲-۱- پیشگفتار ۱۶
۲-۲- دسته بندی و مشخصات مواد مرکب ۱۶
۲-۳- اجزای تشکیل دهنده مواد مرکب ۱۸
۲-۴- رفتار مکانیکی مواد مرکب ۱۹
۲-۴-۱- رفتار ماکرومکانیک تک لایه‌ها ۲۱
۲-۴-۲- ارتباط تنش- کرنش در چندلایه‌ها ۲۶

فصل ۳- تحلیل عددی ۳۲
۳-۱- پیشگفتار ۳۲
۳-۲- مدل المان محدود ۳۳
۳-۳- انتخاب المان ۳۳
۳-۴- معیار گسیختگی ۳۵
۳-۵- غیر خطی بودن هندسی ۳۶
۳-۶- تحلیل المان محدود مدل یک نمونه آزمایشگاهی ۳۸

۳-۶-۱- فاز اول مدل سازی ۳۸
۳-۶-۲- فاز دوم مدل سازی ۴۲
۳-۶-۳- فاز سوم مدل سازی ۴۴

فصل ۴- طراحی دکل‌های توربین بادی ۴۹

۴-۱- پیشگفتار ۴۹
۴-۲- طراحی سازه‌های مرکب ۴۹
۴-۳- انتخاب مواد ۵۲
۴-۴- بارگذاری طرح ۵۴
۴-۴-۱- بارهای اعمالی به دکل ۵۴
۴-۴-۲- نیروهای انتقال یافته از توربین بادی به دکل ۵۸
۴-۴-۳- ترکیبات بارها ۶۴
۴-۵- قیدهای طراحی ۶۶
۴-۶- طراحی دکل توربین بادی ۲/۴کیلوواتی ۶۹
۴-۶-۱- اطلاعات کلی ۶۹
۴-۶-۲- بارهای روی دکل توربین بادی ۷۱
۴-۶-۳- مدل المان محدود ۷۴
۴-۶-۴- نتایج المان محدود و بحث ۷۶

فصل ۵- خلاصه، نتیجه گیری و پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده ۸۶

۵-۱- خلاصه و نتیجه‌گیری ۸۶
۵-۲- پیشنهاداتی برای پژوهش‌های آینده ۸۷

ضمیمه أ -فایل ورودی انسیس برای فاز اول مدلسازی ۸۹

ضمیمه ب -فایل ورودی انسیس برای فاز دوم مدلسازی ۹۱

ضمیمه ج - فایل ورودی انسیس برای فاز سوم مدلسازی ۹۳

ضمیمه د - فایل ورودی انسیس برای مدلسازی دکل ۱۸.۳ متری فولادی توربین بادی ۹۵

ضمیمه ه - فایل ورودی انسیس برای مدلسازی دکل ۱۸.۳ متری CFRP توربین بادی ۹۷

واژه نامه انگلیسی به فارسی ۹۹

فهرست مراجع ۱۰۱

فهرست جدول‌ها

عنوان **صفحه**

جدول ۳-۱ : خواص ماده مرکب زمینه پلیمری با الیاف شیشه..... ۳۹
جدول ۳-۲ :مقایسه بین نتایج حاصله با نتایج تجربی و المان محدود مدل اولیه ۴۲
جدول ۳-۳: مقایسه بین بار نهایی گسیختگی حاصل از نتایج تجربی و مدل المان محدود ۴۷
جدول ۴-۱ : فاکتورهای انتخاب ماتریس‌ها [۵۰]..... ۵۳
جدول ۴-۲ : بار برف مبنا برای مناطق مختلف کشور[۵۵]..... ۵۵
جدول ۴-۳ : ترکیبات بارگذاری‌های مختلف [۲۱]..... ۶۴
جدول ۴-۴ : ضرایب تصحیح برای انواع بارها [۲۱] ۶۵
جدول ۴-۵ : مشخصات فنی توربین [۶۱] ۶۹
جدول ۴-۶ : خواص الاستیک و حد تسلیم سه نوع کامپوزیت CFRP، GFRP و AFRP [۴۹] ۷۱
جدول ۴-۷ : فشار باد اعمالی روی دکل ۷۲
جدول ۴-۸ : خلاصه بارهای تصحیح شده اعمال شده بر نوک دکل ۷۳
جدول ۴-۹ : خلاصه ترکیبات بارگذاری‌ها..... ۷۳
جدول ۴-۱۰ : بررسی تعداد تقویت کننده‌ها برای کامپوزیت‌های مختلف..... ۸۱
جدول ۴-۱۱ : بررسی انواع لایه چینی‌های متعامد..... ۸۲
جدول ۴-۱۲ : خلاصه‌ای از نتایج تحلیل دکل توربین بادی ۲/۴ کیلوواتی..... ۸۳

فهرست شکل‌ها

عنوان **صفحه**

شکل ۱-۱ : انواع دکل توربین‌های بادی ۵
شکل ۲-۱ : شکل‌های مختلف مواد مرکب ۱۷
شکل ۲-۲ : رفتار مکانیکی مواد مختلف ۲۰
شکل ۲-۳ : تک لایه مرکب ۲۱
شکل ۲-۴ : تنش‌های اعمالی روی یک المان حجمی ۲۲
شکل ۲-۵ : لایه تقویت شده در یک جهت ۲۴
شکل ۲-۶ : نمایش مختصات اصلی مواد و مختصات هندسی در یک استوانه ۲۵
شکل ۲-۷ : ارتباط مختصات اصلی مواد و مختصات هندسی و تعریف زاویه θ ۲۵
شکل ۲-۸ : نمایش ایجاد چند لایه‌ها ۲۶
شکل ۲-۹ : تغییر شکل هندسی صفحات چند لایه در صفحه x- y ۲۷
شکل ۲-۱۰ : تغییرات تنش و کرنش در چند لایه‌ها بر اساس تغییرات سختی ۲۹
شکل ۲-۱۱ : نیروهای صفحه‌ای روی یک چندلایه تخت ۲۹
شکل ۲-۱۲ : گشتاورهای یک چند لایه تخت ۳۰
شکل ۲-۱۳ : تعریف فاصله لایه‌ها از سطح میانی یک چندلایه (N لایه) ۳۰
شکل ۳-۱: المان پوسته‌ای shell99 [۵۳] ۳۴
شکل ۳-۲ : دستگاه مختصات المان ۳۴
شکل ۳-۳ : روند تکرار نیوتن – رافسون ۳۸
شکل ۳-۴ : مدل المان محدود نمونه فاز یک در انسیس ۳۹
شکل ۳-۵ : توزیع مقادیر عدد تخریب معیار گسیختگی سای – وو برای نمونه اول ۴۱
شکل ۳-۶: نمودار تغییر مکان نوک تیر به بار اعمالی حاصل از آزمایشات تجربی و تحلیل المان محدود [۵۴] ۴۲
شکل ۳-۷ : مدل المان محدود نمونه فاز دوم در انسیس ۴۳
شکل ۳-۸ : تغییر شکل نمونه درفاز دوم مدلسازی ۴۴
شکل ۳-۹ : نقشه شماتیک دکل کامل (فاز سوم) [۵۱] ۴۵
شکل ۳-۱۰ : مدل المان محدود نمونه فاز سوم در انسیس ۴۶
شکل ۳-۱۱ : نمودار تغییر مکان نوک مدل بر اساس تغییرات بار اعمالی[۵۱] ۴۶

شکل ۳-۱۲ : تغییر شکل نمونه در فاز سوم مدل سازی ۴۷
شکل ۳-۱۳ : توزیع عدد تخریب معیار گسیختگی سای- وو برای مدل المان محدود نمونه ۴۸
شکل ۳-۱۴ : توزیع تنش روی مدل المان محدود نمونه..... ۴۸
شکل ۴-۱ : فرآیند طراحی سازه ۵۱
شکل ۴-۲ : دستگاه مختصات نوک دکل [۱۸]..... ۵۹
شکل ۴-۴ : سختی دکل در دیاگرام رزونانسی توربین بادی با روتور سه پره ای[۵۸].....۶۸
شکل ۴-۵ : ابعاد دکل..... ۷۰
شکل ۴-۶ : سطح مقطع دکل‌ها در مقطع A-A..... ۷۰
شکل ۴-۷ : توزیع فشار باد اعمالی روی دکل..... ۷۲
شکل ۴-۸ : هندسه المان beam189 [۵۰]..... ۷۴
شکل ۴-۹ : مدل المان محدود دکل فولادی لوله‌ای شکل در انسیس ۷۵
شکل ۴-۱۰ : مدل انسیس دکل توربین بادی CFRP دارای هشت تقویت کننده.....۷۶
شکل ۴-۱۱ : نمودار جابجایی نوک دکل CFRP با چهار تقویت کننده بر حسب تغییرات زاویه الیاف ۷۷
شکل ۴-۱۲ : نمودار جابجایی نوک دکل GFRP با چهار تقویت کننده بر حسب تغییرات زاویه الیاف..... ۷۷
شکل ۴-۱۳ : نمودار جابجایی دکل با چهار تقویت کننده بر حسب تغییرات زاویه الیاف..... ۷۸
شکل ۴-۱۴ : نمودار جابجایی دکل با هشت تقویت کننده بر حسب تغییرات زاویه الیاف..... ۷۸
شکل ۴-۱۵ : نمودار تغییرات تنش در یک المان دکل CFRP با تغییرات زاویه..... ۷۹
شکل ۴-۱۶ : نمودار تغییرات تنش در یک المان دکل GFRP با تغییرات زاویه برای دکل..... ۸۰
شکل ۴-۱۷ : مدول‌های بدون بعد برای شیشه- اپوکسی [۴۷]..... ۸۰
شکل ۴-۱۸ : توزیع تنش برای دکل ۱۸/۳ متری توربین بادی..... ۸۳
شکل ۴-۱۹ : توزیع تنش در دکل CFRP ۱۸/۳ متری توربین بادی ۸۴
شکل ۴-۲۰ : مقادیر عدد تخریب بر مبنای معیار گسیختگی سای-وو در طول دکل CFRP ۸۵

فهرست علایم و نشانه‌ها

عنوان	علامت اختصاری
مؤلفه کرنش	ε_j
کرنش برشی	γ
انحناء سطح	κ
ضریب پواسون	ν
چگالی	ρ
زاویه الیاف با محور هندسی	θ
زاویه لایه در چندلایه	θ_k
مؤلفه تنش	σ_i
مؤلفه تنش برشی	τ_{ij}
عدد تخریب بر مبنای معیار سای- وو	ξ
نسبت شتاب زلزله به شتاب ثقل	A
عناصر ماتریس سختی محوری	A_{ij}
عناصر ماتریس سختی‌های خمشی– محوری	B_{ij}
ضریب بازتاب سازه	B
عناصر ماتریس سختی	C_{ij}
ضریب رانش	C_{fb}
ضریب اثر تغییر سرعت	C_e
ضریب شکل	C_q
عناصر ماتریس سختی خمشی	D_{ij}
مدول یانگ	E
فرکانس طبیعی	f_n
مدول برشی	G
ضریب اهمیت سازه	I
نیروی وارد بر چندلایه	N_i
سرعت دورانی روتور	n
گشتاور وارد بر چندلایه	M_i

بار برف مبنا	P_s
بار برف	P_r
فشار مبنای باد	q
ضریب رفتار سازه	R
عناصر ماتریس سازگاری	S_{ij}
نیروی برشی در تراز پایه	V

فصل ۱– مقدمه

۱–۱– هدف از این مطالعه

در حال حاضر اطلاعات زیادی در رابطه با انرژی تولید شده از باد وجود دارد، سازمان‌های مهمی مانند انجمن انرژی بادی اروپا[1] (EWEA) و انجمن انرژی بادی امریکا[2] (AWEA) گزارش جامعی از افزایش تولید انرژی بادی در سراسر جهان را در وب سایت‌هایشان ارائه کرده‌اند. آنها درگزارش‌های خود علاوه بر تأکید بر مزایای اقتصادی و زیست محیطی انرژی بادی، به توسعه روتورها و توربین‌های با بازدهی بالاتر اشاره کرده و بیان نموده‌اند که حدود ۲۰٪ از کل هزینه‌های توربین‌های بادی صرف ساخت دکل می‌شود [۲،۱].

حمل و نقل دکل‌های با وزن بالا به نواحی دور دست دشوار بوده و به تجهیزات سنگین جهت نصب نیاز می‌باشد. اگرچه دکل‌های توربین بادی بخش مهمی از هزینه کلی تأسیسات بادی را تشکیل می-دهد[۳]، اما تحقیقات خیلی کمی در ارتباط با بهبود طراحی یا ساخت آنها به گونه‌ای که نصبشان در مناطق دورافتاده آسان‌تر باشد انجام شده است. رایج‌ترین نوع دکل‌های توربین بادی امروزی، دکل‌های فولادی لوله‌ای شکل می‌باشند که معمولاً در قطعاتی همراه با فلانج‌هایی در انتهایشان ساخته شده و در محل سایت به یکدیگر پیچ می‌شوند. این قطعات فولادی به منظور افزایش استحکام و در عین حال صرفه جویی در مواد، حالت مخروطی شکل دارند (با حرکت به سمت پایین دکل قطر آن زیاد می شود).

بر طبق نظر انجمن سازندگان توربین بادی دانمارک[3] (DWTMA) برای هزینه تمام شده انرژی بسیار مهم است که دکل‌ها در حد امکان به صورت بهینه ساخته شوند [۳]. ابعاد و اندازه دکل به سرعت باد محل نصب و چگونگی تغییرات این سرعت با ارتفاع بستگی دارد. پارامتر محدود کننده دیگر حمل و نقل و قیدهای آن می‌باشد.

پیشرفت‌های فنآوری در ۲۵ سال اخیر باعث کاهش عمده‌ای در هزینه انرژی بادی شده است به طوریکه این هزینه از ۳۸ سنت دلار امریکا در سال ۱۹۸۲ به حدود ۴ الی ۶ سنت در سال ۲۰۰۷ رسیده است [۴]. به عقیده مارش[4] علت اصلی این کاهش چشمگیر به جهت کاربرد مواد کامپوزیت در ساخت پره‌های سبکتر روتور می‌باشد[۵]. در واقع مواد کامپوزیت به آهستگی راه خود را درجهت کاربرد بیشتر و

[1] European Wind Energy Association
[2] American Wind Energy Association
[3] Danish Wind Turbine Manufactures Association
[4] Marsh

بیشتر در مولدهای برق بادی، ناسل[1]، کابین و دکل پیدا کردند. تخمین‌های صنعتی اظهار داشته‌اند که ۸۰ هزار تن کامپوزیت سالانه تنها برای پره‌های توربین‌های بادی استفاده می‌شوند. مواد کامپوزیتی پتانسیل کاهش وزن کلی دکل‌های توربین‌های بادی را دارند لذا می توانند منجر به صرفه‌جویی زیادی در هزینه‌های نصب و حمل و نقل شوند و انرژی بادی را برای مناطق روستایی و دورافتاده که معمولاً تعداد کمی توربین مورد نیاز است به صرفه‌تر کنند. در یک گزارش تحت عنوان نیاز به دکل‌های کامپوزیتی که در سال ۲۰۰۳ منتشر شد، گزارش شده بود که هزینه دکل‌های کامپوزیت برای ۲۵ واحد مزرعه بادی ۳۸٪ کمتر از هزینه‌های دکل‌های فولادی است [۶]. علیرغم آنکه هزینه مواد کامپوزیتی بر واحد وزن بالاتر از فولاد می‌باشد اما از آنجا که وزن کل دکل کامپوزیتی کمتر از نوع مشابه فولادی است در نتیجه هزینه‌های حمل و نقل و نصب هم کاهش می‌یابد. مزیت هزینه‌ای دیگر بدین صورت است که قیمت فولاد در بازارهای جهانی در چند سال اخیر رشد بالایی داشته در حالیکه قیمت مواد کامپوزیت به طور یکنواخت و پیوسته کاهش یافته است. در نتیجه پژوهش‌ها و تحقیقات علمی جدیی در توسعه دکل‌های کامپوزیت توربین بادی هم در ایالات متحده و هم در اروپا شروع شده است[۷ و ۸].

بیش از۱۰ سال است که تحقیقات علمی در این زمینه در دانشگاه مانیتوبا[2] کانادا به منظور توسعه فناوری‌های دکل‌های کامپوزیتی زمینه پلیمری تقویت شده با الیاف (FRP[3]) مورد استفاده برای انتقال قدرت و شبکه توزیع برق [۹،۱۰،۱۱،۱۲،۱۳،۱۴] و دکل‌های توربین بادی [۱۵] در حال انجام است.

بنابراین به جهت دور نماندن از فنآوری روز دنیا لازم می باشد که در گام اول، پژوهش‌های ما نیز در جهت تحقیقات علمی در حال انجام در کشورهای توسعه یافته باشد لذا در این پایان‌نامه به طراحی و تحلیل مدل دکل کامپوزیت توربین بادی و مقایسه آن با دکل فولادی متداول پرداخته شده است. از آنجا که طراحی دکل توربین‌های بادی معمولاً بوسیله ظرفیت خمشی آنها کنترل می‌شود بنابراین ما نیز در اینجا بدان توجه زیادی نموده‌ایم.

۱-۲- تاریخچه مختصری از انرژی باد

باد نقش کهنه و مهمی را در تاریخ تمدن بشری بازی کرده است. اولین کاربردها از انرژی باد به ۵۰۰۰ سال قبل در مصر بر می‌گردد که در آنجا از قایق‌های بادبانی برای جابجایی بین سواحل استفاده می-

[1] Nacelle
[2] Manitoba
[3] Fiber reinforced polymer

کردند. اولین آسیاب بادی، ماشینی با تعدادی پره متصل شده به محوری جهت ایجاد حرکت دورانی بود که در حدود ۹۰۰ سال پس از میلاد مسیح بوسیله ایرانیان ساخته شده است. در قرن دهم بعد از میلاد مسیح آسیاب‌های بادی با سطوح بادگیری به طول ۱۶ فوت و ارتفاع ۳۰ فوت برای آرد نمودن غلات در نواحی شرقی ایران و افغانستان بکار برده می‌شد که که امروزه آثار آن در نواحی خواف و تایباد در شرق کشور به چشم می خورد [۱۶].

غربی‌ها خیلی بعدتر آسیاب بادی را کشف کردند. در مراجع نوشته شده است که ماشین‌های بادی از قرن ۱۲ در غرب برای آسیاب غلات بکار برده شده است، بعدها آسیاب‌های به صورت پمپ آب در هلند اصلاح شد. در قرن ۱۹ زمانی که اولین مهاجران به امریکا رفتند، آسیاب‌های بادی را برای پمپاژ آب ساختند و توانستند به کشاورزی و دامداری بپردازند.

در دهه ۸۰ میلادی با افزایش نگرانی‌های زیست محیطی و کاهش عرضه سوخت‌های فسیلی، آسیاب-های بادی به منظور تولید برق طراحی شدند و دیگر به نام توربین بادی خوانده شدند و برای نخستین بار تعداد زیادی از آنها در کالیفرنیا و سپس در دانمارک نصب شدند. این نقطه شروع توربین‌های بادی جدید بود، از آن روزها تا به امروز فنآوری توربین بادی پیشرفت خیلی زیادی کرده است.

توربین‌های بادی مگاواتی جدید با توان قابل استفاده بالا، می‌توانند مستقیماً با شکل‌های سنتی تولید برق رقابت کنند. توربین بادی رده مگاوات امروزی، برق لازم برای ۳۰۰ تا ۶۰۰ خانه را عرضه می‌کند و این میزان تولید توان حدوداً ۳۰۰ برابر تولید توربین‌های بادی دهه ۸۰ میلادی می‌باشد. این توربین‌های بادی همچنین جنبه‌های زیبایی‌شناسی را نیز در بردارند، توربینی شامل یک دکل مدور لوله‌ای شکل با رنگ روشن که با چشم انداز و منظره طبیعت اطراف آن همخوانی داشته و با سه پره بزرگی که به آرامی و آهستگی می‌چرخند حتی می‌تواند به زیبایی منطقه بیافزاید. [۱۷]

۱-۳- انواع دکل توربین بادی

دکل توربین بادی برای نگه داشتن ناسل و روتور استفاده می‌شود لذا سازه آن‌ها باید به اندازه کافی مستحکم بوده تا در برابر بارهای منتقل شده از توربین مقاومت لازم را داشته باشد. سه نوع ساختار دکل که بطور رایج برای نگه داشتن یک توربین بادی استفاده می‌شوند، عبارتند از:

- دکل‌های لوله‌ای شکل[1]

[1] Tubular Towers

- دکل‌های مشبک (خرپایی شکل)[1]
- دکل‌های دارای مهار[2]

دکل‌های فولادی لوله‌ای شکل که در شکل ۱-۱الف نشان داده شده‌اند، متداول‌ترین نوع دکل مورد استفاده برای توربین‌های بادی بزرگ می‌باشند. آنها معمولا از قطعات ۲۰ الی ۳۰ متری ساخته می‌شوند که با فلانج‌هایی درهر انتها در محل سایت به هم پیچ می‌شوند.

دکل‌ها شکل مخروطی دارند، به منظور افزایش استحکام با حرکت به سمت پایین دکل، قطر آنها زیاد می‌شود تا در عین حال در مواد مصرفی نیز صرفه جویی شود. آنها به علت مسائل زیباشناسی بیشتر از انواع دیگر دکل ها مورد استفاده قرار می گیرند. به علاوه در آب و هوای زیر صفر درجه، دکل‌های لوله‌ای شکل می‌توانند از کار تعمیرات و نگهداری در حین وزش باد پشتیبانی کند.

دکل‌های مشبک که در شکل ۱-۱ب نشان داده شده‌اند با استفاده از پروفیل‌های فولادی جوش شده ساخته می‌شوند. مزیت اصلی یک دکل مشبک هزینه آن است زیرا یک دکل مشبک به حدود نیمی از مواد دکل لوله‌ای شکل با همان سختی مشابه نیاز دارد. عیب عمده این نوع دکل‌ها شکل ظاهریشان است. البته انجام کارهای خدماتی روی دکل‌های مشبک در هوای سرد دشوار می‌باشد. به همین دلایل است که اغلب چنین دکل‌هایی برای توربین‌های بادی جدید بزرگ دیده نمی‌شود.

بسیاری از توربین‌های بادی کوچک با دکل‌های باریک حمایت شده توسط کابل‌های مهار ساخته می‌شوند، همانطور که در شکل ۱-۱ج دیده می‌شود، هر چند که تعداد اندکی دکل دارای مهار برای توربین‌های بادی بزرگ در دهه ۸۰ مورد استفاده قرارگرفتند. مزیت این نوع دکل‌ها وزن پایین و در نتیجه هزینه کمتر آنها است. ایراد آنها هم در سختی دسترسی به پیرامون دکل است که آنها برای نواحی نزدیک زمین‌های زراعی کمتر مناسبند. درانتها باید گفت که این نوع دکل‌ها بیشتر در معرض آسیب‌های ناشی از خرابکاری می‌باشند و این موضوع را نیز برای ایمنی کلی در مورد آن باید در نظر داشت. [۱۶]

[1] Lattice Towers
[2] Guyed Towers

الف) دکل لوله‌ای شکل ب) دکل مشبک ج) دکل دارای مهار

شکل ۱-۱ : انواع سازه‌های دکل توربین‌های بادی [۱۸]

با وجود آنکه فنآوری بالایی در طراحی و ساخت پره‌ها وارد شد، اما فنآوری برای دکل‌ها در یک وقفه مجازی مانده بود. هرچند که تعداد اندکی از پژوهشگران بر بهبود طراحی دکل‌ها متمرکز شدند. بورمن[۱] و رویتر[۲] در سال ۱۹۹۶ طرح‌های مفهومی سازه جایگزینی را که سختی دکل‌ها را افزایش می‌داد، پیشنهاد کردند. آنها روی طرح دکل جایگزینی که در آن از قطعاتی با تقویت کننده سختی[۳] استفاده شود تفکر کردند. هرچند هیچ گزارشی از عملکرد چنین دکل‌هایی منتشر نشد [۱۹]. براگهویس[۴] در سال ۲۰۰۳ یک دکل توربین بادی هیبرید جایگزین را توسعه داد. دکل هیبرید از اجزای بتونی پیش بافته به‌جای قطعات دکل فولادی مرسوم استفاده می‌کرد. تحقیقات نشان داد که طرح مفهومی هیبرید جدید می‌تواند بر محدودیت‌های حمل و نقل دکل‌ها فایق آید. هرچند که مسئله وزن و هزینه نصب هنوز حل نشده بود [۲۰].

استفاده از مواد کامپوزیتی به عنوان مصالح ساختمانی در دو دهه اخیر به علت سبکی وزن، استحکام و مقاومت بالا نسبت به وزن و مقاومت در برابر خوردگی، افزایش یافته‌اند. شرکت دکل کامپوزیتی توربین بادی[۵] در سال ۲۰۰۳ دکلی به فرم قاب سه بعدی[۶] را به صورت تجاری ارائه کرد که موجب صرفه‌جویی هزینه جاری در سه حوزه می‌شد : الف) کاهش هزینه‌های ساخت دکل ب) کاهش یا حذف استفاده از

[1] Bormann
[2] Reuter
[3] Stringer
[4] Braghuis
[5] Wind Tower Composites
[6] Space frame

جرثقیل ج) صرفه جویی اساسی در هزینه‌های حمل و نقل. علی‌رغم مزایای خوبی که این قاب دارد اما هنوز با مشکل نگهداری در آب وهوای سرد زیر صفردرجه مواجه است و به دلایل زیبایی‌شناسی خیلی معروف نشده است [۲۱]، از اینرو نیاز به توسعه یک دکل توربین بادی جایگزین مبتکرانه وجود دارد.

۱–۴–استاندارد طراحی دکل‌های توربین بادی

در ایران هیچ دستورالعمل طراحی یا استانداردی برای دکل‌های توربین بادی وجود ندارد. بنابراین از استانداردهای بین المللی و فصل اول قوانین و مقررات انرژی بادی [۲۲ و ۲۳] در این مطالعه پژوهشی استفاده شده است.

هر دو استاندارد در اصل یکی هستند. این دو استاندارد مواد، ساخت و الزامات بارگذاری روی دکل‌ها را با لحاظ نمودن شرایط اقلیمی، پوشش می‌دهند. همچنین محدودیت‌های قابلیت تعمیر برای طرح تشریح شده است. برای نمونه حالت حدی تغییر شکل بوسیله حفظ یک فاصله ایمن، فاصله میان پره روتور و دکل یا پره روتور و کابل مهار تعیین می‌شود. استانداردها به استفاده از مدل دینامیکی جهت پیش‌بینی بارهای طراحی نیازمندند. این مدل برای تعیین بارهای بیش از محدوده سرعت باد رایج، شرایط توربولانس و دیگر شرایط باد ماکزیمم را اعمال می‌نماید. همه ترکیب‌های مرتبط با شرایط بارهای خارجی باید در محاسبات داخل شود. یک مجموعه از حداقل چنین ترکیبی تحت عنوان موارد بارگذاری تعریف شده در استانداردها آورده شده است.

در پروژه حاضر، در انجام محاسبات بارگذاری از استاندارد بین المللی توربین بادی استفاده شده است. دیگر جزئیات بارگذاری‌ها در طراحی دکل توربین بادی در فصل ۴- آورده شده است.

۱–۵– رفتار یک سازه لوله‌ای شکل

سازه‌های لوله‌ای شکل که کاربرد گسترده‌ای در ساختار دکل‌ها یافته‌اند، شامل پوسته‌های استوانه‌ای یا مخروطی شکل هستند. برای تحلیل واقعی و طراحی سازه‌های لوله‌ای شکل، تئوری پوسته جدار نازک می‌تواند با محدودیت‌های معینی بکار برده شود. به همین علت است که فرمول‌ها تحت این فرض که نسبت ضخامت به شعاع (t/R) خیلی کوچک باشد بسط یافته‌اند. اگرچه در سازه‌های دکل لوله‌ای شکل نسبت t/R ممکن است بزرگ باشد و نتایج حالت تقریبی خواهند یافت. بنابراین مهم است که نسبت t/R

مشخص شود تا انحراف بدست آمده از تئوری پوسته جدار نازک عملاً مجاز باشد. به عبارت دیگر اهمیت یافتن مقدار t/R در آنست که کدام سازه لوله‌ای شکل، می‌تواند جدار نازک در نظر گرفته شود.

تروکستکی[1] در سال ۱۹۸۶در طراحی سازه‌های لوله‌ای شکل پیشنهاد کرد که پوسته جدار نازک می-تواند در حداقل مقادیر $t=0.1R$ بکار برده شود و R کمترین شعاع انحنای سطح میانی است. به علاوه اینکه برای یک طراحی تقریبی این حدود حتی تا مقدار $t=0.2R$ باید افزایش یابند.

از دیگر مواردی که در طراحی این سازه‌ها بدان توجه می‌شود مربوط به کمانش و پایداری سازه می-باشد که در بخش بعدی به آن اشاره می‌گردد.

۱-۶- کمانش کلی و محلی پوسته استوانه‌ای شکل

علاوه بر کمانش کلی[2] ممکن است کمانش به صورت یک واماندگی موضعی[3] به فرم چین خوردگی یا فرورفتگی بواسطه تنش بیش از حد یا ناپایداری جداره سازه استوانه‌ای شکل در سمت تحت فشار ایجاد شود. این قبیل کمانش محلی در هنگامی که سازه در معرض تنش‌های فشاری واقع شود، در اثر ناپایداری سازه در نقاطی از جداره سازه می‌تواند بوجود آید. به عبارت دیگر این نوع کمانش مواقعی می‌تواند رخ دهد که تنش‌های فشاری از مقدار بحرانی تجاوز نمایند. فروپاشی[4] از طرف دیگر تحت عنوان گسیختگی کلی[5] تعریف می‌شود و معمولاً به فرم تخت‌شدگی[6] سطح مقطع پوسته در یک طول قابل ملاحظه است که ناشی از اعمال فشار سطحی در پوسته می‌باشد.

مقاومت در برابر ناپایداری کلی و ناپایداری محلی هر دو تابعی از نسبت قطر به ضخامت (D/t) پوسته می‌باشند. کوچکتر بودن این نسبت به معنای مقاومت بیشتر در برابر ناپایداری در هر دو حالت است [۲۵].

در طراحی سازه استوانه‌ای شکل، پس از تعیین ضخامت جداره پوسته به جهت ارضاء الزامات تنش کششی، پایداری جداره پوسته می‌بایست برای کمانش محلی چک شود.

[1] Toritsky
[2] Overall buckling
[3] Localized failure
[4] Collapse
[5] General failure
[6] Flattering

یک پوسته استوانه‌ای شکل جدار نازک که در جهت محور طولی‌اش تحت فشار قرار می‌گیرد، ممکن است بخاطر ناپایداری کلی پوسته در اثر خمش محور، و یا ناپایداری محلی جداره پوسته که می‌تواند شامل اعوجاج عرضی هم نباشد، در نهایت گسیخته شود. کمانش کلی هنگامی اتفاق می‌افتد که مقاومت، به نسبت طول به شعاع (L/R) پوسته وابسته باشد. کمانش محلی که با نام‌هایی نظیر خمش ثانویه، چین خوردگی[1] شناخته می‌شود، در استوانه‌های جدار نازک محتمل‌تر است.

پایداری در برابر کمانش محلی بستگی به نسبت ضخامت به شعاع پوسته (t/R) دارد. چین خوردگی موضعی به تنش‌های فشاری مرکب در نقطه وابسته است. این نوع گسیختگی به علت تغییر شکل برآمدگی‌ها یا چروک‌های خاصی است که به فرم دایره‌ای یا بریده بریده می‌باشند.

در سازه لوله‌ای شکل جدار نازک اصولا دو نکته قابل ملاحظه مهم وجود دارد. اولا باید از کمانش محلی در تنش‌های زیر تنش تسلیم اجتناب کرد. ثانیاً دیگر محدودیت سخت‌گیرانه تر اینست که تمایل به کمانش محلی نباید بار کمانش کلی تمامی سازه را کاهش دهد [۲۴ و ۲۵ و ۲۶].

تنش کمانشی بحرانی محلی برای پوسته استوانه‌ای شکل تحت فشار محوری می‌تواند به صورت زیر بیان شود [۲۷] :

$$\sigma_{cr} = \frac{Et}{R\sqrt{3(1-\upsilon^2)}} = 0.605E\frac{t}{R} \qquad (۱-۱)$$

که در آن R شعاع پوسته، t ضخامت پوسته، υ ضریب پواسون (برای فولاد ۰/۳) و E مدول الاستیک ماده (برای فولاد ۲۰۰Gpa) می‌باشد.

در اغلب مراجع تنش کمانشی بحرانی پوسته استوانه‌ای تحت فشار محوری در یک ضریب C ضرب می‌شود [۲۵ و ۲۸ و ۲۹]. این ضریب C، بر مبنای داده‌های تجربی می‌باشد یا با توجه به مجانب منحنی تنش کمانشی محوری ایده‌آل به علت وجود عیوب ، می‌تواند تعیین شود. لذا مقدار C، در مراجع مختلف می‌تواند متفاوت باشد. هر چند در بیشتر مراجع ضوابطی جهت طراحی پوسته‌های استوانه‌ای در نظر گرفته شده است، اما مسئله چگونگی تفسیر تنش‌های کمانشی یا پیش‌بینی بار کمانشی می‌تواند بواسطه استفاده از تحلیل‌های المان محدود ساده‌تر شود.

[1] wrinkling