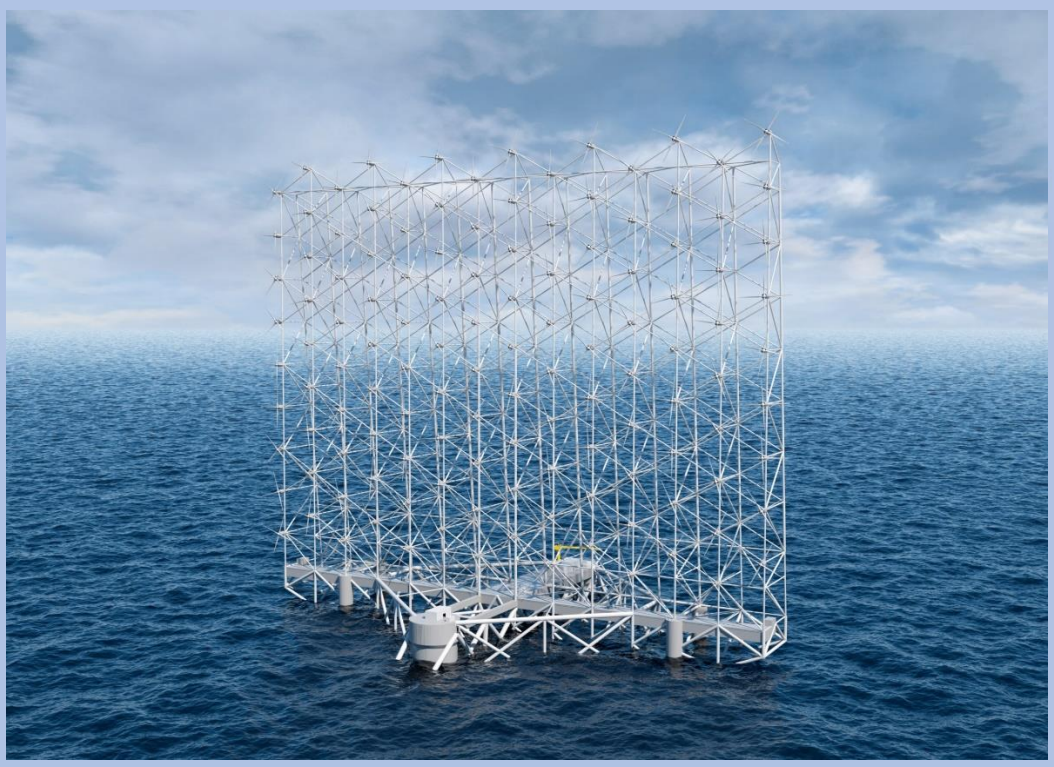
پژوهشگاه نیرو

بررسی فنی و اقتصادی توربین‌های بادی آرایه‌ای



مدیر پروژه: سید ابوالفضل موسوی

واحد مجری: طرح فناوری‌های توربین بادی

NRI-ER-987-JEVA01-2-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.276


بسم الله الرحمن الرحيم

بررسی فنی و اقتصادی توربین‌های بادی آرایه‌ای

مدیر پروژه: سید ابوالفضل موسوی ترشیزی

گروه پژوهشی پشتیبان: انرژی های تجدیدپذیر

همکاران پروژه: آیدین غزنوی اسگویی

واحد مجری: طرح فناوری‌های توربین بادی

انتشارات پژوهشگاه نیرو

آبان ۱۴۰۱

کد ثبت گزارش: NRI-ER-987-JEVA01-2-00-F

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

ایران. وزارت نیرو. پژوهشگاه نیرو. طرح مطالعات انرژی بادی

عنوان پروژه: بررسی فنی و اقتصادی توربین های بادی آرایه ای/ مدیر پروژه: موسوی ترشیزی، سید ابوالفضل.کارفرما: پژوهشگاه نیرو، ۱۴۰۱.

۵۳ ص.: مصور، نمودار، جدول

۱. غزنوی اسگویی، آیدین، همکار پروژه. ۲. موذنی، بابک، مدیر واحد مجری. ۳. گروه انرژی های تجدید پذیر. ۴. انرژی باد

انتشارات پژوهشگاه نیرو

کلیه حقوق معنوی اثر متعلق به پدیدآورندگان، کلیه حقوق مادی متعلق به پژوهشگاه نیرو و نشر مطالب در حدود متعارف، با ذکر منبع بلامانع است.

نشانی: تهران،شهرک‌غرب،انتهای‌بلوارشهیددادمان،پژوهشگاه‌نیرو، کدپستی: ۱٤٦۸٦۱۳۱۱۳

تلفن: ۹-۸۸۰۷۹٤۰۱

نمابر: ۸۸۰۷۸۲۹٦

وبگاه: *www.nri.ac.ir*

پست الکترونیک انتشارات: *publications@nri.ac.ir*

فرم تعهدنامه اصالت اثر

متعهد می‌شوم که مطالب مندرج در این گزارش حاصل کار پژوهشی اینجانب سید ابوالفضل موسوی ترشیزی، مدیر پروژه بررسی فنی و اقتصادی توربین های بادی آرایه ای و همکاران به شرح زیر است و دستاوردهای پژوهشی دیگران که در این پژوهش از آن‌ها استفاده شده است مطابق مقررات، مورد ارجاع قرار گرفته و در فهرست منابع ذکر گردیده است.

☑ گزارش حاصل انجام همه مراحل پروژه است.

❑ گزارش حاصل انجام ..... مرحله از ..... مرحله پروژه است.

همکاران :

۱. آیدین غزنوی اسگویی

۲.

۳.

۴.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

فهرست مطالب

۱ مقدمه ۱

۲ سوابق طرح ۴

۲.۱ تاریخچه توربین های دارای چند روتور ۴

۲.۲ بررسی اقتصادی ۵

۲.۳ بررسی های فنی و عملکردی ۱۴

۳ تعیین توابع قیمت اجزای توربین های آرایه ای ۲۶

۳.۱ طراحی مفهومی یک توربین آرایه ای ۲۶

۳.۱.۱ ساختار درختی ۲۸

۳.۱.۲ ساختار خرپایی ۲۸

۳.۲ تابع براورد کننده هزینه اجزا ۲۹

۳.۲.۱ پره ۲۹

۳.۲.۲ هاب ۳۱

۳.۲.۳ سیستم کنترل ۳۲

۳.۲.۴ سیستم انتقال قدرت ۳۳

۳.۲.۵ ادوات برقی ۳۳

۳.۲.۶ شاسی اصلی توربین ۳۴

۳.۲.۷ پایه توربین ۳۴

۴ بررسی و ارزیابی فنی و اقتصادی ۳۶

۴.۱ مقایسه و ارزیابی مزایای فنی توربین آرایه ای ۳۶

۴.۲ مقایسه اقتصادی توربین های آرایه ای و نوع موجود ۳۷

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

۴.۲.۱ مشخصات فیزیکی توربین بادی ۶ مگاواتی ۳۹
۴.۲.۲ براورد قیمت توربین ۶ مگاواتی آرایه ای ۴۱
۴.۳ بررسی مزایای طرح از لحاظ فناوری ۴۱
۵ مراجع ۴۳

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

فهرست شکل ها

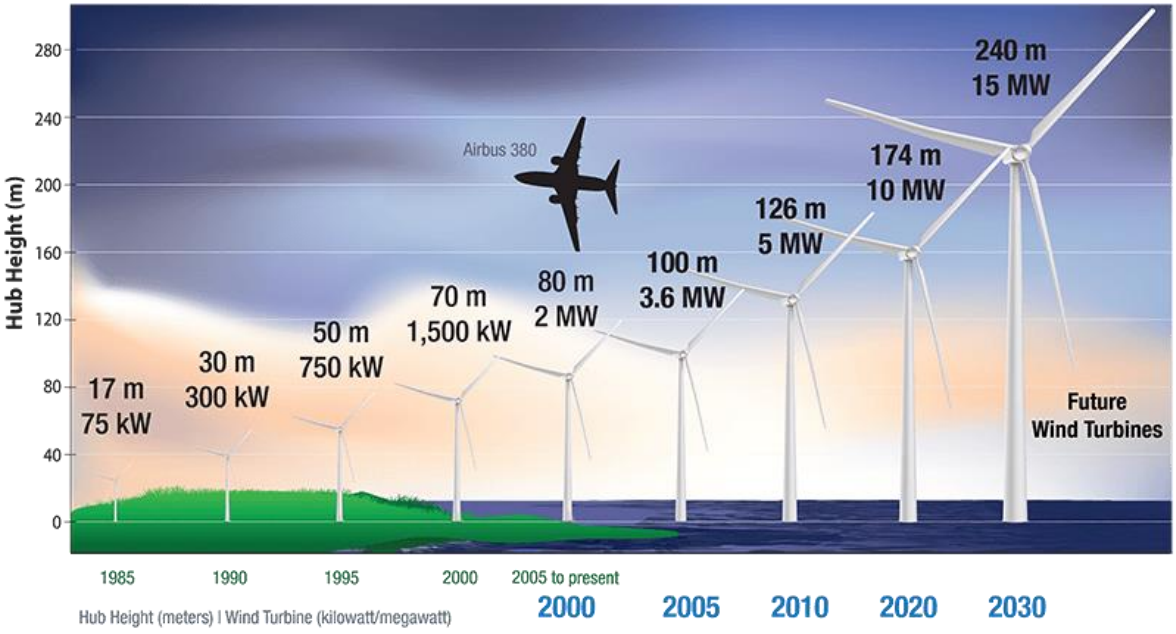
شکل ۱ رشد اندازه توربین های بادی در طی زمان [۱] ۱
شکل ۲ پنل های خورشیدی مرکب از چندین پنل کوچکتر ۲
شکل ۳ توربین های بادی آرایه ای ۳
شکل ۴ آسیاب بادی با روتور دوگانه در دانمارک [۳ و ۱۷] ۴
شکل ۵ طرح توربین دارای چند روتور در سال ۱۹۳۲ [۲] ۵
شکل ۶ انواع ساختار توربین چند روتور در مرجع ۶ ..... ۸
شکل ۷ هزینه نسبی انواع ساختار توربین نسبت به حالت تک روتور ۹
شکل ۸ سازه مورد استفاده بر توربین ۴۵ روتوری ۱۰
شکل ۹ توربین طراحی شده توسط دانشگاه Strathclyde و پروژه Innwind [۸] ۱۱
شکل ۱۰ نمودار بررسی اقتصادی انواع توربین بادی [۹] ۱۲
شکل ۱۱ نمونه از توربین آرایه ای با سازه خرپایی ۱۳
شکل ۱۲ سازه مورد استفاده در مرجع ۱۷ ..... ۱۳
شکل ۱۳ توربین های مورد استفاده در مرجع ۱۲ ..... ۱۴
شکل ۱۴ توربین چهار روتور ساخت شرکت وستاس ۱۶
شکل ۱۵ توربین های آرایه ای با سه، چهار و هفت روتور توسط لگروی[۹] ۱۷
شکل ۱۶ طراحی توربین بادی شرکت آیروتروپ [۱۵] ۱۸
شکل ۱۷ توربین بادی سه روتور لگروی [۱۸] ۱۹
شکل ۱۸توربین بادی با چهار روتور با ظرفیت ۳۰۰ کیلووات[۱۸] ۲۰
شکل ۱۹ توربین بادی با سه روتور در دهه ۱۹۸۰[۱۸] ۲۰
شکل ۲۰ توربین بادی فراساحلی windship توسط هرونموس[۱۸] ۲۱
شکل ۲۱ توربین بادی ۳۴ روتور فراساحلی در سال ۱۹۷۶ [۱۷] ۲۱
شکل ۲۲ توربین بادی کوچک دارای ۴ روتور [۱۸] ۲۲
شکل ۲۳توربین بادی محور افقی ناهمسان‌گرد [۶] ۲۳
شکل ۲۴ توربین بادی دارای روتورهای سری هم محور و هم جهت [۹] ۲۳
شکل ۲۵ توربین بادی دارای روتورهای سری هم محور و هم جهت [۲۲] ۲۴
شکل ۲۶ توربین بادی چهار روتور سلسام [۱۸] ۲۴
شکل ۲۷ سیستم میکرو توربین بادی آرایه‌ای یکپارچه در دانشگاه پلی تکنیک توکیو [۲۳] ۲۵

شکل ۲۸ رابطه بین شعاع روتور و جرم آن ۳۰
شکل ۲۹ سهم قیمتی اجزای مختلف توربین بادی محور افقی ۳۱
شکل ۳۰ ساختار و ابعاد توربین ۵ مگاوات آرایه ای در مرجع ۱۷ ..... ۳۸

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

۱ مقدمه

امروزه به دلیل اهمیت پیدا کردن بیشتر بحث گرمایش زمین و قیمت انرژی، منابع انرژی تجدیدپذیر و بهره برداری بهینه از آنها در صدر توجهات جامعه علمی قرار گرفته است. از این رو می توان شاهد افزایش سریع اندازه توربین های بادی و میزان استحصال انرژی آنها در سال های اخیر بود (شکل ۱). اما در این بین مسئله ای وجود دارد که ذهن ها را به چالش می کشد. سوال اینجاست که این افزایش اندازه توربین های بادی تا کجا خواهد بود؟ آیا ساخت توربین های بزرگتر، بهترین و به صرفه ترین راه حل است؟ این سوال وقتی پر رنگ تر می شود که نگاهی به وابستگی متغیرهای اقتصادی و عملکردی توربین به اندازه داشته باشیم.



شکل ۱ رشد اندازه توربین های بادی در طی زمان [۱]

با یک بررسی ساده می توان دریافت که میزان توان استخراج شده توسط یک توربین بادی تابع مستقیم مساحت روتور آن (توان دوم شعاع) است. در حالی که وزن این توربین (حداقل) تابع حجم آن یعنی توان سوم شعاع می باشد. با یک حساب سریع می توان دریافت که میزان مواد مصرف شده در یک توربین بادی که به نوعی نشان دهنده قیمت آن نیز می باشد با نرخ سریعتری از توان قابل استحصال در حال رشد است. همچنین ساخت توربین های خیلی بزرگ هزینه های مربوط به حمل و نصب و نگهداری آن ها را به شدت افزایش می دهد. بنابراین ممکن

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

است به جایی برسیم که افزایش اندازه توربین ها دیگر به صرفه نباشد. اینکه این آستانه کجاست الان موضوع این پروژه نیست. بلکه سوال این است، پس از رسیدن به این اتفاق چه باید کرد؟

برای رفع این چالش رویکرد جدیدی اکنون مطرح شده و در حال مطالعه است. در این طرح پیشنهاد شده است که برای رسیدن به توان دلخواه، لازم نیست توربینی با آن توان طراحی و نصب شود. بلکه می توان آن را با تعداد بیشتری توربین های بادی کوچکتر درست کرد. البته به صورت کلی این یک طرح کاملا جدید نیست بلکه نمونه آن در استخراج انرژی خورشیدی نیز استفاده شده است. به عنوان مثال، در نیروگاه های خورشیدی به جای ساخت یک پنل بسیار بزرگ که مثلا قابلیت تولید ۱ مگاوات را داشته باشد، از تعداد زیادی پنل های ۵ کیلوواتی استفاده می شود (شکل ۲).

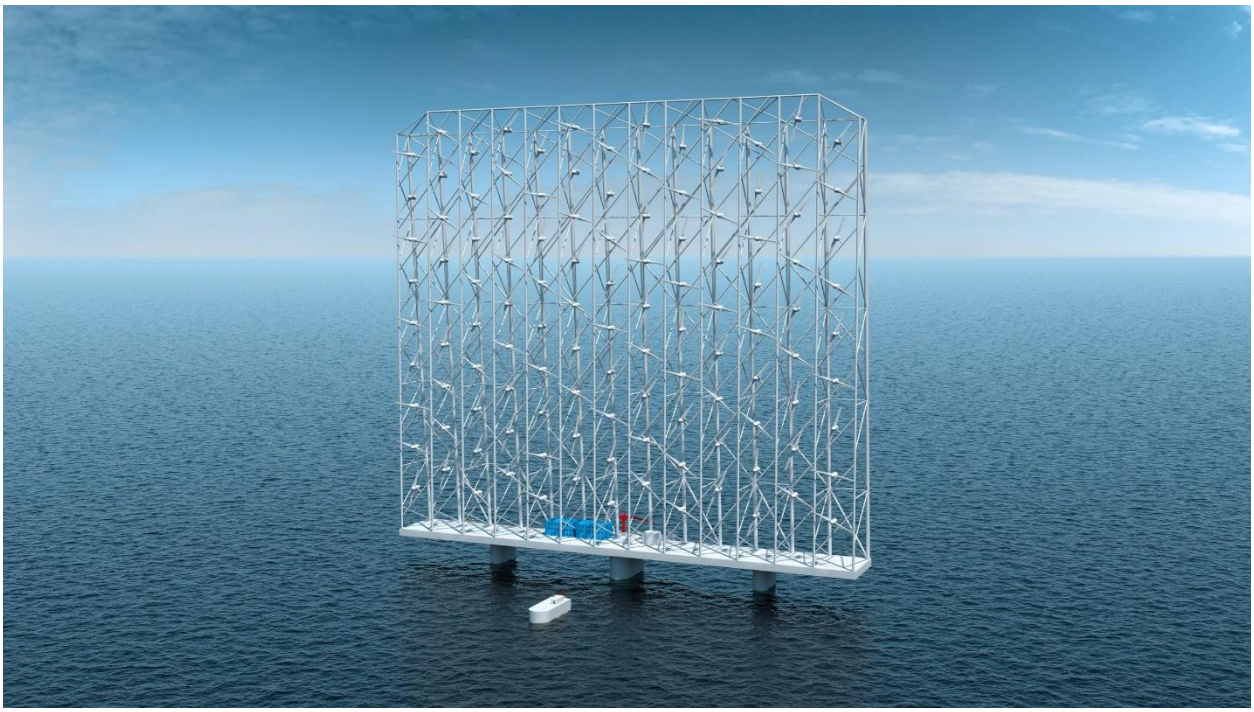


شکل ۲ پنل های خورشیدی مرکب از چندین پنل کوچکتر

در صورت به کار گیری این طرح و اثبات کارایی آن، شاهد ایجاد شکل های جدیدی از توربین های بادی (شکل ۳) خواهیم بود که قابلیت ارتقای توان و عملکرد بالاتر را خواهند داشت. مزیت دیگری که می توان برای این گونه توربین ها نام برد، رفع محدودیت های فناوری است. سازنده های توربین های بادی نیروگاهی، شرکت ها و کشورهای محدودی هستند و همه دسترسی به این سطح از فناوری را ندارند و ناچار باید خریدار این محصولات باشند. توربین های بادی مقیاس کوچکتر به علت هزینه سرمایه گذاری کمتر و نیز سطح فناوری پایین تر، تنوع و تعداد بسیار بالایی دارند که دسترسی به آنها را ساده تر می نماید. بنابراین در صورتی که تامین نیروگاه های

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

بادی با اندازه بزرگ (و رایج) به دلیل فنی یا اقتصادی (مانند تحریم ها در کشور ما) مقدور نباشد، این طرح می تواند راه جایگزین بسیار مناسبی باشد.



شکل ۳ توربین های بادی آرایه ای

این پروژه برای بررسی و امکان سنجی این فناوری تعریف شده است. برای این منظور لازم است عملکرد احتمالی این توربین ها بررسی شود. همچنین ضروری است هزینه احداث چنین توربین های برآورد شده و با توجه به هزینه واقعی سایر توربین های نیروگاهی (در ایران) مقایسه شده و ارزنده بودن آنها با توجه به شرایط هر ناحیه ارزیابی شود.

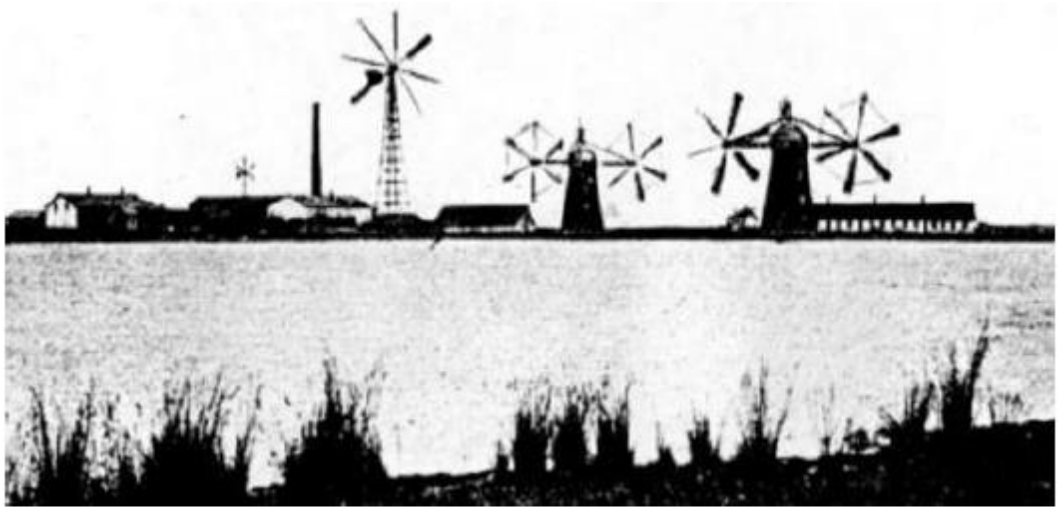
DOI: 10.30503/nripress.2020.276

۲ سوابق طرح

پیش از آغاز فرآیند بررسی عملکردی و اقتصادی می بایست تاریخچه این طرح و وضعیت کنونی آن از منظر آکادمیک و تجاری مورد نظر قرار گیرد. چنانچه تجربیات موفق یا ناموفقی وجود داشته باشد می تواند بسیار کمک کننده باشد. بررسی های انجام شده در مراجع را می توان به دو دسته فنی و اقتصادی تقسیم بندی نمود.

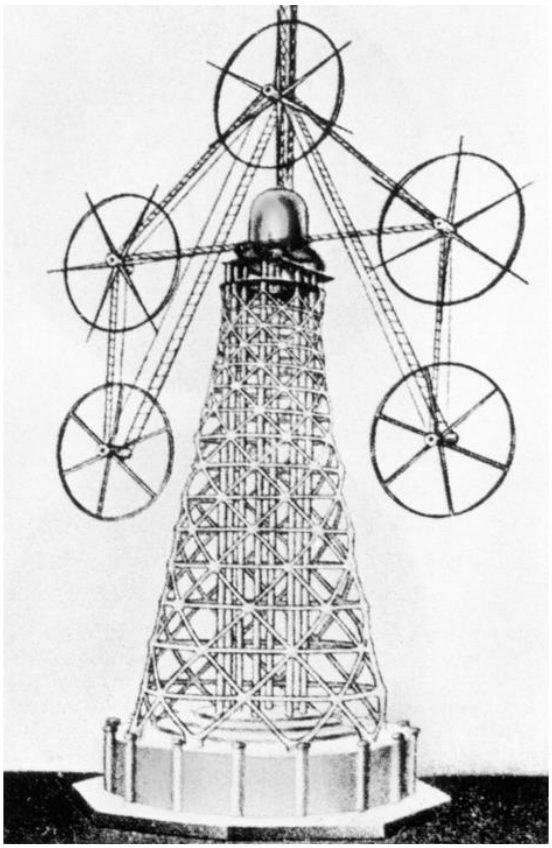
۲/۱ تاریخچه توربین های دارای چند روتور

طرح اولیه استفاده از چند روتور در یک توربین بادی و افزایش ظرفیت تولید انرژی آن، بسیار قدیمی است. اولین طرحی که در این خصوص می توان یافت، مربوط به دو آسیاب بادی است که در دانمارک در سال ۱۸۷۳ افزایش ظرفیت داده شده اند (شکل ۴). طرح بلندپروازانه دیگری نیز از مهندس آلمانی آقای هانف به جای مانده است [۲]. او در طرح خود در نظر گرفته بود که توربین دارای ۵ روتور و هر کدام به قطر ۱۶۰ متر باشد (شکل ۵). او ظرفیت این توربین را ۲۰ مگاوات در نظر گرفته بود که اکنون نیز بسیار بلند پروازی به حساب می آید. از آن زمان تا کنون، این طرح پیگیری نشده ولی اخیرا مورد توجه قرار گرفته است.



شکل ۴ آسیاب بادی با روتور دوگانه در دانمارک [۳ و ۱۷]

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۵ طرح توربین دارای چند روتور در سال ۱۹۳۲ [۲]

۲/۲ بررسی اقتصادی

جیمیسون [۴] در مقاله خود طرح توربین های آرایه ای را برای یک توربین ۲۰ مگاوات فرضی و یک توربین دارای ۴ روتور ۵ مگاواتی بررسی کرده است. در این کار با فرض ثابت نگه داشتن سرعت خطی نوک پره ها و تنش موجود روی پره‌های توربین بادی (به علت عدم تغییر در ماده و آستانه تحمل آن) به این نتیجه رسیده است که نسبت جرم یک توربین بزرگ در مقابل n دستگاه توربین کوچک (معادل همان مساحت روتور) برابر $\frac{1}{\sqrt{n}}$ است و هر چه تعداد روتورها افزایش یابد صرفه این کار از لحاظ پارامتر جرمی بیشتر است.

هزینه های دو توربین مذکور در کار ایشان مطابق جدول ۱ است. همانطور که مشاهده می شود، هزینه یک توربین که دارای ۴ روتور است، حدود ۲۰٪ از توربین معادل تک روتور کمتر می باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

جدول ۱ مقایسه هزینه یک توربین بزرگ در مقابل معادل آن از توربین های کوچک

MULTI ROTOR LIFE COST ASSESSMENT	Cost Fractions	Reference Design	Large Single Rotor	Equivalent Multi Rotor
No of rotors		1	1	45
Diameter @ 350 W/m^2		135	270	40
Power rating [MW]		5	20	20
Rotor	0.086	1542	12690	1892
Blades	0.052	920	7360	1097
Hub	0.022	398	3183	474
Pitch mechanism and bearings	0.013	224	2148	320
Drive train & nacelle	0.157	2802	18588	7544
Low speed shaft	0.007	124	995	148
Bearings	0.004	68	547	82
Gearbox	0.053	939	7509	1119
Mechanical brake, HS coupling	0.001	10	41	41
Generator	0.020	348	1393	1393
Variable speed electronics	0.020	359	1435	2871
Yaw drive and bearing	0.004	75	597	89
Main frame	0.022	398	3183	474
Electrical connections	0.012	213	853	1023
Hydraulic system	0.002	44	246	37
Nacelle cover	0.013	224	1790	267
Control & Safety System	0.002	36	47	1055
Tower	0.035	622	622	1865
TURBINE CAPITAL COST	0.281	5000	31947	12355
Foundations	0.163	2903	23225	23225
Installation	0.077	1375	11001	8801
Electrical and grid connection	0.129	2292	6417	6417
Sundry (survey, insurance etc)	0.051	917	917	917
BALANCE OF PLANT COST	0.420	7487	41560	39359
Parts	0.045	802	6416	1148
Labour	0.255	4545	9090	10908
O&M	0.300	5347	15506	12055
TOTAL (costs € 1000)	1.000	17834	89013	63770

بررسی دقیقی نیز توسط ساندو و همکارش [۵] انجام شده است. در این کار استفاده از یک توربین ۳ مگاوات با استفاده از ۳ توربین ۱ مگاوات تجاری به صورت هم صفحه مقایسه شده‌اند. در این کار فرض شده است که توربین ها هم صفحه باشند و ارتفاع کل توربین تغییر نکند. در کنار تحلیل توان و انرژی تولیدی سالانه هر دو مدل، قیمت نهایی اجرای پروژه ها نیز با توجه به داده های موجود در منابع مقایسه شده است. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که استفاده از سه توربین یک مگاواتی حدودا ۸۳.۵ درصد یک توربین ۳ مگاواتی معادل، هزینه دارد و در نتیجه نهایتا می تواند به صرفه باشد.

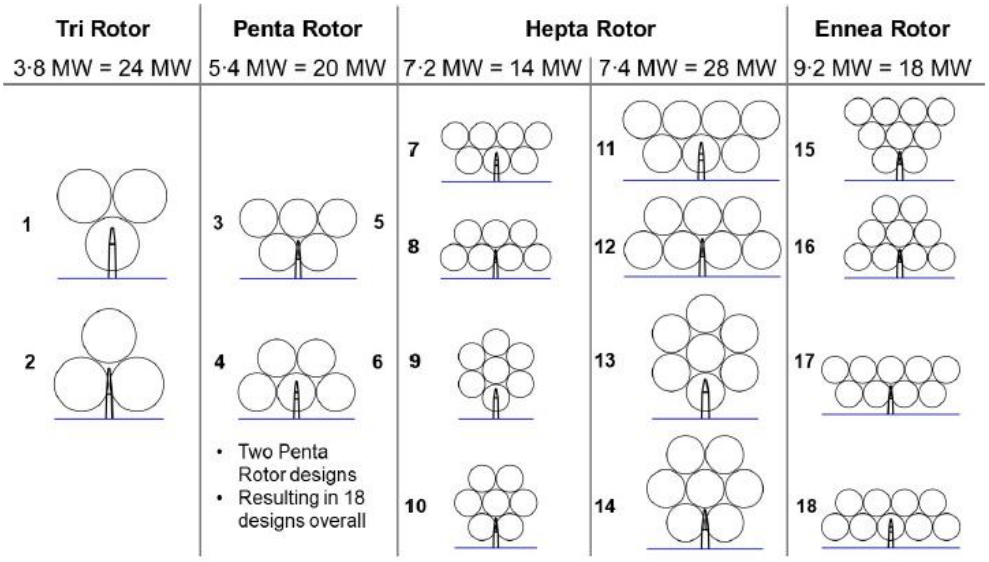
DOI: 10.30503/nripress.2020.276

جدول ۲ مقادیر استفاده شده برای هزینه توربین ها در کار ساندو

Project cost of 3000kW wind turbine = 3417843£ Cost of wind turbine = 69% of wind project cost = 2358311 £ Foundation cost =16% of total Project Cost Tower cost = 16.38 % of total Project Cost Gear box cost = 8.2624 % of total Project Cost			
Sr No	**Wind turbine component**	**Component costs (£) of Single-rotor wind turbine**	**Component costs (£) of Multi-rotors wind turbine**
1	Rotor Blades	483882	448521
2	Rotor Hub	78806	108970
3	Rotor Bearing	56113	38016
4	Pitch System	126040	122289
5	Gearbox	282395	282395
6	Tower	559842	391889
7	Foundation	546854	315726
8	Other components	224374	224374
9	Support Structure (Spars + Cables)	---------	36138
Total Cost		2358306	1968318

بکر و همکارانش [۶] ۱۸ طرح را برای توربین های دارای چند روتور مطابق شکل ۶ بررسی کرده‌اند. آنها یک توربین ۱۰ مگاواتی را مبنا قرار داده و تلاش کرده اند با بزرگنمایی یا کوچکنمایی این توربین، یک توربین چند روتوری در محدوده ۱۴ تا ۲۸ مگاواتی به دست بیاورند و برای این کار سازه خرپایی را انتخاب کرده اند. انواع ساختارهای بررسی شده در کار آنها مطابق شکل ۶ است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۶ انواع ساختار توربین چند روتور در مرجع ۶

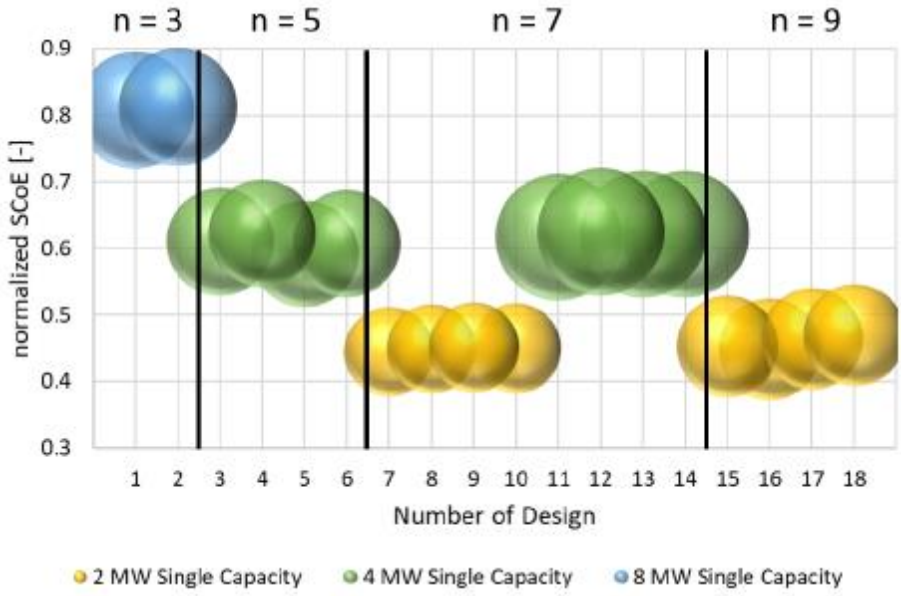
برای امکان پذیری محاسبات، لازم است از فرضیات ساده کننده استفاده شود. در این کار فرض شده است که:

جدول ۳ فرضیات برای هزینه هر قطعه و سهم آن در توربین

	Cost fraction of turbine CAPEX [%]	Cost per mass [€/kg]
Tower	21.9	2.5
Space frame	-	5
Rotor	29.7	16
Nacelle	48.4	18

برای انجام محاسبات یک کد محاسباتی نوشته شده است که می تواند قطر میله های استفاده شده در سازه خرپایی را بر حسب مواد مورد استفاده و تنها دو بارگذاری استاندارد محاسبه نماید. در نتیجه این محاسبات، نشان داده شده است که هر چه از توربین های کوچکتری استفاده شود (در اینجا ۲ مگاوات) هزینه نهایی توربین کمتر خواهد بود. در واقع طرح های ۷ تا ۱۰ و ۱۵ تا ۱۸ از نظر قیمت برتری داشته اند (شکل ۷). و این به دلیل سبک تر شدن توربین هایی است که استفاده می شوند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

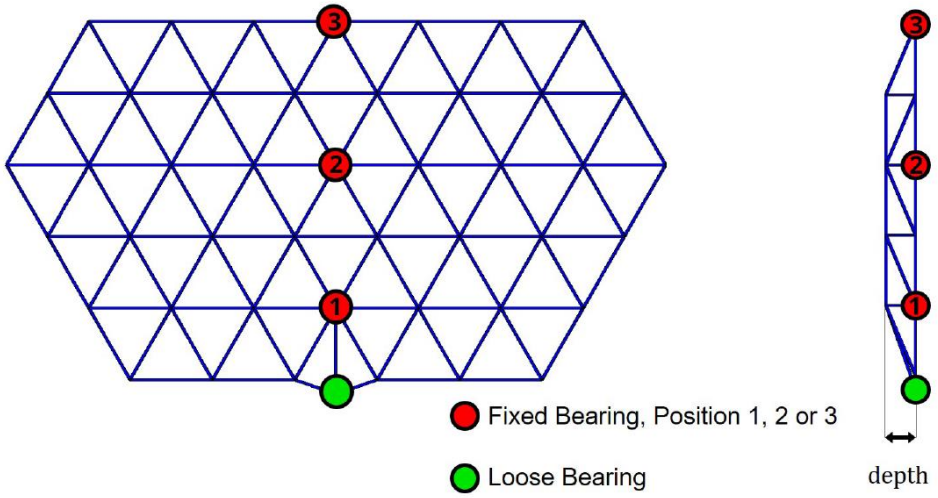


شکل ۷ هزینه نسبی انواع ساختار توربین نسبت به حالت تک روتور

همانطور که در جدول ۳ مشاهده می شود، ناسل توربین های استفاده شده دارای بیشترین سهم در هزینه نهایی و بیشترین هزینه تولید به ازای واحد جرم هستند. پس هرچه از توربین های کوچکتر استفاده شود، نهایتا به نفع خواهد بود. در ادامه آنها تلاش کرده اند یک توربین در همان محدوده توانی را با استفاده از یک سازه خرپایی (شکل ۸) و ۴۵ روتور به دست بیاورند که نتیجه مطابق جدول ۴ است.

لازم به ذکر است که در این کار فاصله توربین ها از یکدیگر ۵ درصد قطر در نظر گرفته شده است. تحقیقات دیگری نشان داده است که اگر فاصله بین روتورها ۲ درصد قطر آنها باشد، تاثیری روی یکدیگر نخواهند داشت [۷].

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۸ سازه مورد استفاده بر توربین ۴۵ روتوری

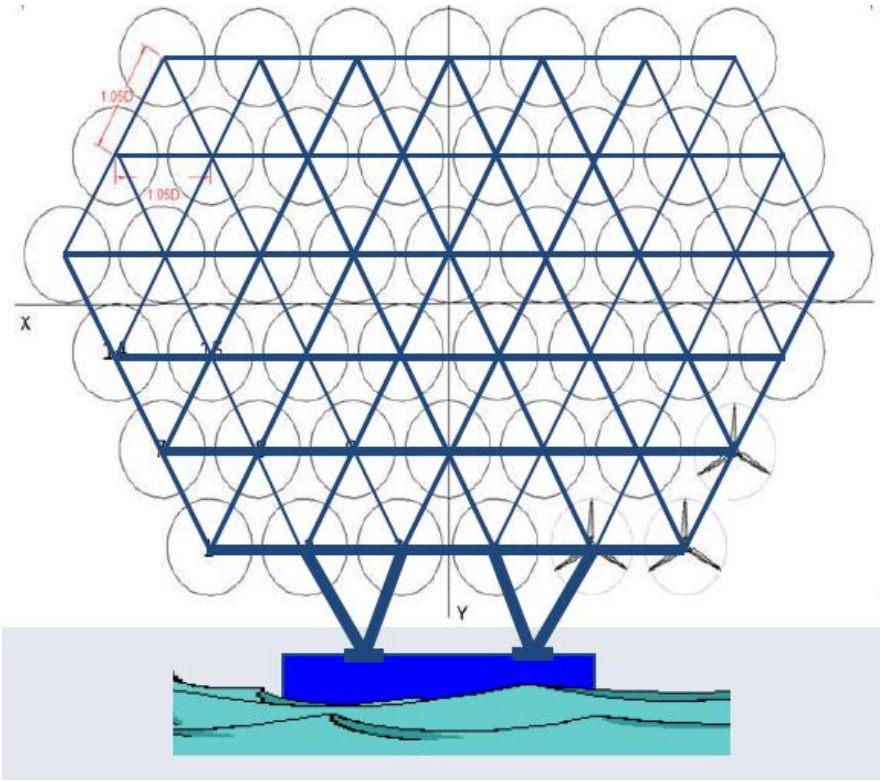
جدول ۴ نتیجه محاسبات برای توربین با ۴۵ روتور

P_{overall} [MW]	P_{rotor} [kW]	D [m]	m_{rotor} [t]	m_{nacelle} [t]	m_{RNA} [t]
14	311.1	31.5	1.27	2.45	3.71
18	400.0	35.7	1.85	3.57	5.41
20	444.4	37.6	2.16	4.18	6.34
24	533.3	41.2	2.84	5.49	8.34
28	622.2	44.5	3.58	6.92	10.50

نمونه‌ی فراساحلی توربین بادی ۲۰ مگاوات در پروژه اروپایی Innwind طراحی شده‌است که دارای ۴۵ روتور با ظرفیت ۴۴۴ کیلووات هستند و مشابه کار قبلی است. از مزایای آن کاهش جرم سیستم و توزیع بارگذاری بهتر و کاهش هزینه های سرمایه گذاری توربین است. با استفاده از مدل هزینه انرژی توسعه یافته، کاهش ۳۰ درصدی برای هزینه انرژی در طولانی مدت پیش بینی شده است. همچنین طرحی برای چیدمان ۴۵ روتور با استفاده از نرم افزار Bladed توسط دانشگاه Strathclyde[1] طراحی و پیش بینی شد(شکل ۹).[۸]

[1] University of strathclyde

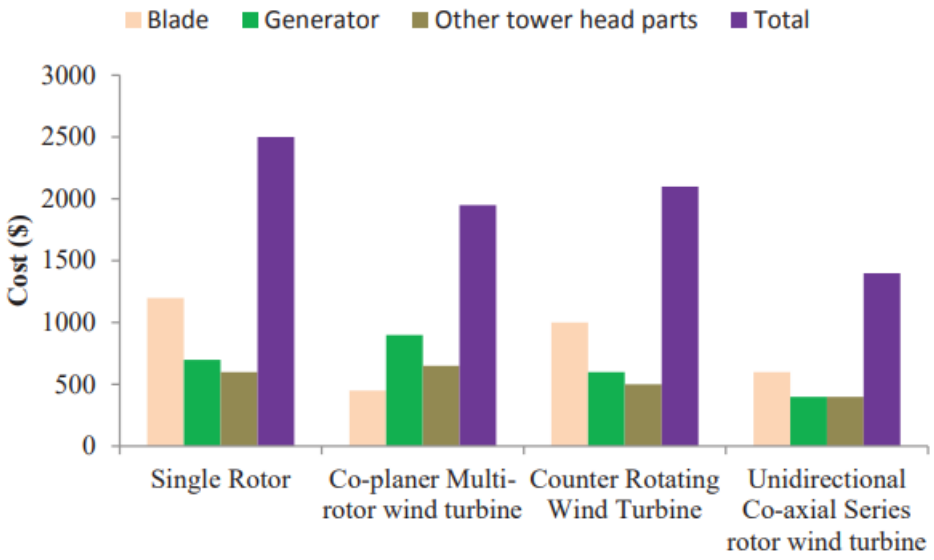
DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۹ توربین طراحی شده توسط دانشگاه Strathclyde و پروژه Innwind [۸]

جیمیسون و همکاران[۹]، روی توربینهای بادی هم محور با روتورهای سری بررسی‌هایی انجام دادند که نتایج آن از لحاظ اقتصادی به صورت (شکل ۱۰) است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



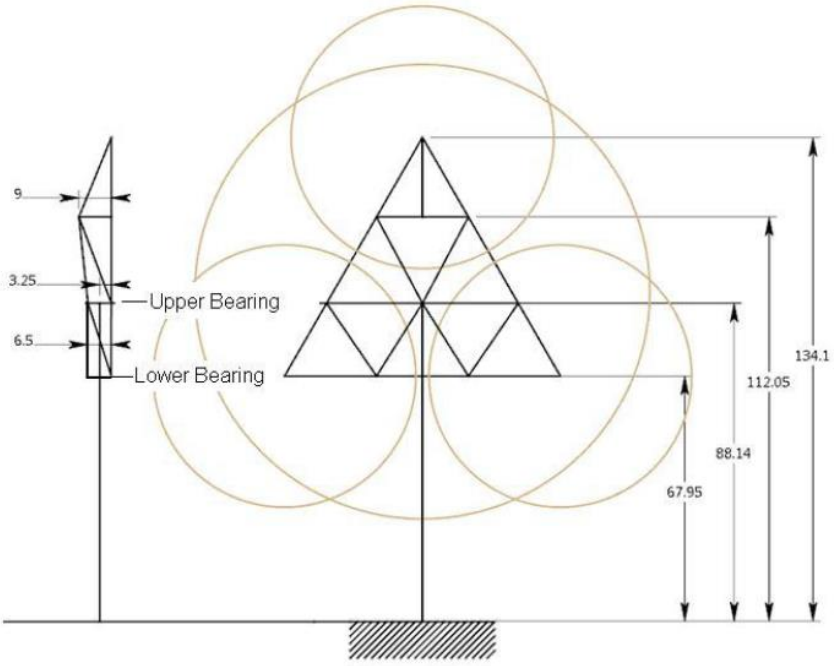
شکل ۱۰ نمودار بررسی اقتصادی انواع توربین بادی [۹]

نمونه ای از ساختار خرپایی در شکل ۱۱ نشان داده شده است. مانند آنچه توضیح داده شد، با وجود استفاده از یک سازه خرپایی برای نصب توربین های کوچکتر، یک برج فولادی برای ایجاد قابلیت تغییر جهت توربین نیز در نظر گرفته شده است. نمونه ای از این کار را ورما [۱۷] انجام داده است. در کار او تلاش شده است یک توربین ۵ مگاوات با ۳ دستگاه توربین کوچکتر ۱.۶۶ مگاواتی جایگزین شود. برای این منظور، او سازه ای مانند شکل ۱۲ را پیشنهاد داده است. برای بررسی فنی، او ناچار به انجام محاسبات دقیق سازه ای شده است و نهایتا دریافته که با استفاده از این کار و اضافه کردن سازه خرپایی، علی رغم کاهش در وزن توربین های استفاده شده، سازه بالای برج توربین ۵ درصد سنگین تر می شود. اما به دلیل استفاده از مواد ارزانتر و دارای فناوری ساده تر، می توان کاهش هزینه تا ۱۳ درصد را انتظار داشت.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۱۱ نمونه از توربین آرایه ای با سازه خرپایی



شکل ۱۲ سازه مورد استفاده در مرجع ۱۷

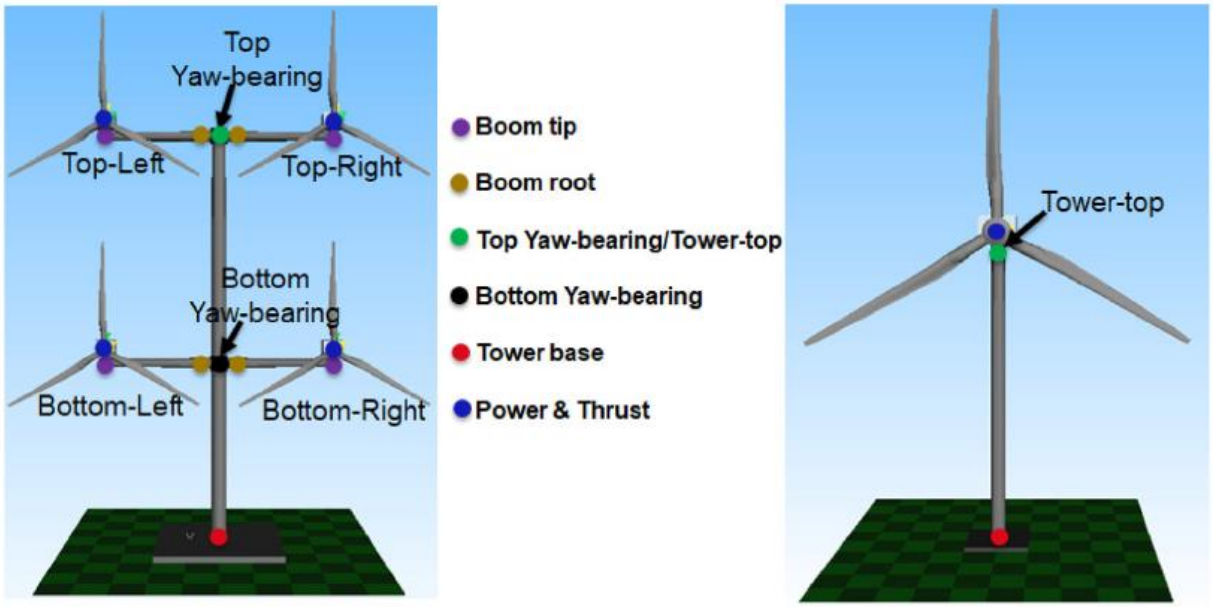
DOI: 10.30503/nripress.2020.276

۲/۳ بررسی های فنی و عملکردی

طرح توربین های بادی آرایه ای به علت شانس بقای زیاد به صورت فنی تر نیز مورد بررسی قرار گرفته تا رفتار و عملکرد آن توسط دینامیک سیالات محاسباتی نیز شبیه سازی شده و با توربین های متعارف مقایسه شود. باستانخواه و آبکار [۱۰] در مقاله خود رفتار ویک پشت توربین را مقایسه کرده اند. متغیرهایی همچون تعداد روتورها، جهت دوران و فاصله آنها بررسی شده است. نشان داده شده است که فاصله روتورها بیشترین تاثیر را روی طول ویک پشت توربین های چند روتوری دارد. کار مشابهی نیز توسط گایساس و همکارانش [۱۱] انجام شده است. آنها نیز به نتیجه رسیده‌اند که با به کارگیری چند روتور کوچکتر، در مجموع ویک پشت توربین کوتاه‌تر می شود و در نتیجه می توان استفاده بهینه تری از مساحت سایت انجام داد.

فارده و گاندی [۱۲]، رفتار آیروالاستیک چهار توربین ۱.۵ مگاواتی را با یک توربین ۶ مگاواتی مقایسه کرده‌اند. این کار با استفاده از تحلیل های یک بعدی و استفاده از نرم افزارهای تخصصی turbsim و AerodynV15 و بر اساس سه بارگذاری از استاندارد IEC61400-1 انجام شده است. آنها دستیابی به نتایج زیر را گزارش کرده‌اند:

- توربین دارای ۴ روتور به میزان ۶٪ توان بیشتری را در سرعت های باد کمتر از نامی تولید می نماید.
- در بعضی بارگذاری ها، توربین دارای ۴ روتور وضعیت سازه ای بدتری دارد ولی در بعضی شرایط دیگر نیز بارگذاری کمتری به آن اعمال می‌شود و دارای مزیت است.



شکل ۱۳ توربین های مورد استفاده در مرجع ۱۲

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

جیمیسون و همکارش [۱۳] در کار دیگری یک توربین ۲۰ مگاواتی را با ۴۵ توربین که هر کدام توان ۴۴۴ کیلووات را دارند جایگزین کرده و تلاش نموده است سازه مناسب برای این کار را تحلیل نماید (جدول ۵). در این جدول مبنای کار یک توربین ۵ مگاوات طراحی شده در NREL است که در ستون اول به آن اشاره شده و برای دستیابی به ۲۰ مگاوات، ۴ عدد از آن در نظر گرفته شده است. در ستون دوم این توربین بزرگنمایی شده و به یک دستگاه توربین ۲۰ مگاوات تبدیل شده است. ستون سوم و چهارم دو توربین ۴۵ روتوری هستند که هر کدام توربین مبنای مختلفی دارد. آنها به این نتیجه رسیده‌اند که این سازه از لحاظ وزنی تفاوت زیادی با سازه توربین ۲۰ مگاوات ندارد. همچنین دارای پیچیدگی فنی زیادی نیست به نحوی که اثرات مثبت استفاده از چند روتور را مخدوش نماید.

جدول ۵ مقایسه وزن اجزای ساختارهای مختلف توربین ۲۰ مگاوات

	5MW Reference x 4	20MW Scaled	20MW MRS Scaled	20MW UPWIND Design [1]
Tower Head Mass (t)	1392	2300	3500	880
Tower Mass (t)	2210	3500	400-600	2760
Total System Mass (t)	3602	5700	3900-4100	3640

شرکت وستاس در سال ۲۰۱۶ اقدام به ساخت و آزمون عملی یک توربین آرایه‌ای (شکل ۱۴) نمود. این توربین متشکل از ۴ توربین ۲۲۵ کیلوواتی (تعمیر شده) با قطر ۲۹ متر بود که نهایتا قادر به تولید ۹۰۰ کیلووات بوده است. این توربین به مدت ۳ سال در آلمان نصب بوده و مطالعات زیادی روی آن انجام شده است. گرچه اخبار این توربین در سایت شرکت وجود دارد ولی متاسفانه به دلایل نامعلومی صفحه اختصاصی آن از سایت حذف شده است و دلیل آن نیز از طریق مکاتبات مشخص نگردید. این توربین در دسامبر ۲۰۱۸ از کار افتاده است [۱۴].

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



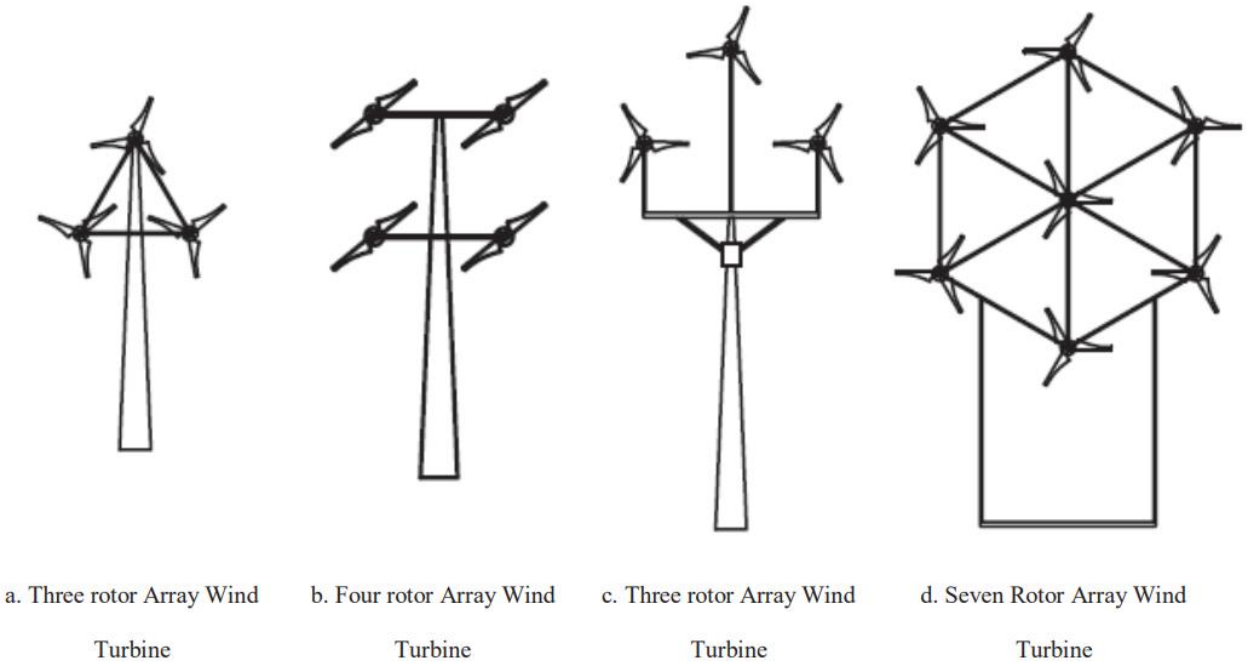
شکل ۱۴ توربین چهار روتور ساخت شرکت وستاس

لان و همکارانش [۱۴] در مقاله خود، منحنی تولید توان و ویک پشت این توربین را به صورت عددی و تجربی بررسی کرده‌اند.

بین سالهای ۱۹۸۰ تا ۱۹۹۰ شرکت توربین ساز لگروی[۲] چند توربین با ساختارهای متفاوت (از دو تا شش روتور) برای توربین های بادی آرایه ای ساخته و مورد آزمایش قرار داده است (شکل ۱۵) [۱۵]. اطلاعات دقیق تری از آن یافت نشد ولی گفته شده که این توربین ها دارای مشکل فنی نبوده‌اند بلکه مشتریان تمایل بیشتری به توربین های تک روتور داشته‌اند که این امر موجب کاهش سرمایه گذاری در این بخش شده است [۱۵].

[۲] Lagerway

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۱۵ توربین های آرایه ای با سه، چهار و هفت روتور توسط لگروی[۹]

شرکت آیروتروپ در سال ۲۰۰۸ اقدام به طراحی یک توربین بادی با ۱۶ روتور نمود و نشان داده که یک سازه خرپایی برای این منظور می تواند کارایی داشته باشد. همچنین این کار توسط شرکت بازرسی جی ال نیز مورد بررسی قرار گرفته بود [۱۵]. این توربین دارای ۱۶ روتور ۳۱۲ کیلووات است [۱۶].

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۱۶ طراحی توربین بادی شرکت آیروتروپ [۱۵]

آزمایش تونل بادی که توسط اسمالدز [۹] در سال ۱۹۸۵ انجام شده است نشان می‌دهد هنگامی که روتور ها در فاصله‌ی ۵٪ قطر باشند هیچ اثر نامطلوبی روی توان عملکردی نخواهد داشت و همچنین با استفاده از سیستم کنترل الکترونیکی می‌توان مشکل انحرافی که لگروی با آن مواجه شده بود را حل کرد.

توربین بادی با سه روتور، در شرکت هلندی توسط لگروی توسعه یافت (شکل ۱۷). در اواسط دهه ۱۹۸۰ دو شرکت Multiwind وLagerwey روی توربین های بادی دوپره با چهار روتور، هر کدام دارای ظرفیت ۷۵ کیلووات سرمایه گذاری کردند و توربین ۳۰۰ کیلووات را ساختند و پس از مشکلات اولیه ، نصب به مدت ۱۵ سال در منطقه صنعتی Maasvlakte در نزدیکی روتردام انجام شد (شکل ۱۸). در همان دهه توربین بادی با سه روتور به

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

همراه ژنراتور جداگانه نصب شد (شکل ۱۹شکل ۱۷). ویلیام هرونموس سیستم های windship را توسعه داد (شکل ۲۰). این توربین‌های فراساحلی دارای ظرفیت ۳۴۰۰ کیلووات با ۳۴ روتور بوده است (شکل ۲۱).[۱۷]

همچنین کلینگر اخیرا یک سیستم با ظرفیت ۲.۴ مگاواتی دارای چهار توربین ۶۰۰ کیلوواتی را توسعه داد. شرکت سیبا[۳] آلمان نیز سیستمی با ظرفیت ۴.۵ مگاوات تولید کرده است که شامل سه توربین با ظرفیت ۱.۵ مگاوات است.[۱۸]



شکل ۱۷ توربین بادی سه روتور لگروی [۱۸]

[۳] SeeBa

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۱۸توربین بادی با چهار روتور با ظرفیت ۳۰۰ کیلووات [۱۸]

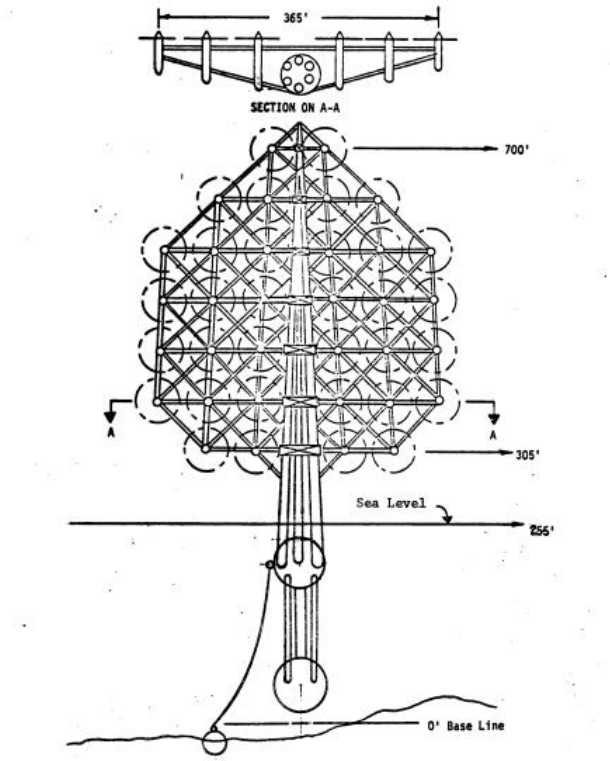


شکل ۱۹ توربین بادی با سه روتور در دهه ۱۹۸۰[۱۸]

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۲۰ توربین بادی فراساحلی windship توسط هرونموس [۱۸]



شکل ۲۱ توربین بادی ۳۴ روتور فراساحلی در سال ۱۹۷۶ [۱۷]

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۲۲ توربین بادی کوچک دارای ۴ روتور [۱۸]

جونگ و همکارانش[۱۹]، در سال ۲۰۰۴ توربین بادی محور افقی ناهمسان گرد[۴] را توسعه دادند که نسبت به توربین های بادی تک روتور، ۲۱ درصد توان بیشتری تولید می‌کرد (شکل ۲۳). همچنین کانموتو ، گالال و کاری [۲۰]، توربین های بادی سری با روتورهای دوقلو و ژنراتورهای سنکرون را توسعه دادند که نسبت به توربین های بادی تک روتور، توان بیشتری تولید می‌کردند. کاری در سال ۲۰۰۳ توربین های بادی که دارای دو ژنراتور مجزا و متصل به دو روتور هستند را توسعه داد.

[۴] Counter rotating horizontal axial wind turbine

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۲۳توربین بادی محور افقی ناهمسان‌گرد [۶]

از نظر شن و همکاران، ژنراتورهای بادی ناهمسان‌گرد مزیت افزایش توان را در مقایسه با توربین بادی تک روتور تا حداکثر ۴۳ درصد ارائه می دهند. همچنین ضریب توان (تا ۶۴ درصد) را در مقایسه با تک روتور افزایش می دهد.[۲۱]

توربین های بادی سری هم جهت هم محور نیز نوع دیگری هستند که جیمیسون و همکاران، روی آن مطالعه کردند و به صورت سیستم های تک روتور و چند روتور با سرعت نامی مشابه، دارای توان خروجی ۱ کیلووات هستند.[۹]



شکل ۲۴ توربین بادی دارای روتورهای سری هم محور و هم جهت [۹]

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۲۵ توربین بادی دارای روتورهای سری هم محور و هم جهت [۲۲]

سلسام[۵] نیز توربین بادی با روتورهای سری و هم محور، که دارای چهار روتور است را توسعه داده و به این نتیجه رسیده است که توان خروجی از این توربین در مقایسه با توربین بادی با یک روتور همان اندازه قطر، حدود دو برابر بیشتر است (شکل ۲۶) .[۱۸]



شکل ۲۶ توربین بادی چهار روتور سلسام [۱۸]

[۵] selsam

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

توسط پروژه‌ای مشترک با دانشگاه سایتما، دانشگاه پلی تکنیک توکیو و شرکت فوجیتا، طرح میکروتوربین آرایه ای ۱۲ در ۹ ، توسعه یافته است (شکل ۲۷). منظور آنها از انجام این آزمایش، استفاده از توربین های بادی آرایه ای برای کاهش سرعت باد در مناطق مورد نیاز است. بر اساس این یافته ها که با تحلیل های عددی نیز همراه بوده است، در فاصله ای به اندازه ۳ برابر ارتفاع مجموعه، سرعت باد به اندازه ۶۰ درصد کاهش می یابد. در فاصله ۷ برابر ارتفاع، این کاهش به ۲۰ درصد سرعت اولیه باد می رسد.[۲۳]



شکل ۲۷ سیستم میکرو توربین بادی آرایه‌ای یکپارچه در دانشگاه پلی تکنیک توکیو [۲۳]

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

۳ تعیین توابع قیمت اجزای توربین های آرایه ای

برای تعیین قیمت یک دستگاه می بایست ابتدا اجزای آن مشخص باشند. به عبارت دیگر باید دقیقا معلوم باشد که وسیله مورد نظر شامل چه قسمت هایی است، هر کدام قرار است چه عملکردی داشته باشند، مشخصات فنی اولیه آن شامل ابعاد و وزن آن چیست و فرایند تولید آن چگونه است. پاسخ مجموعه این پرسش ها در فرایندی به نام طراحی مفهومی داده می شود که موضوع این فصل از گزارش است. در گام بعدی جهت عمومیت بخشیدن به موضوع می بایست تعیین شود در صورتی که ابعاد وسیله مورد نظر تغییر کرد، موارد مطرح شده چگونه باید به روز رسانی شوند. این امر توسط توابع قیمتی و توابع ابعادی قابل انجام است.

۳/۱ طراحی مفهومی یک توربین آرایه ای

مطابق آنچه در فصل قبلی ذکر شد، می توان دریافت که توربین های بادی آرایه ای دارای دو ساختار اصلی هستند که بیشتر مربوط به سازه نگهدارنده آن می شود و سایر اجزا اختلافی ندارند. در تمام توربین هایی که نشان داده شد، از توربین های ۳ پره محور افقی استفاده شده است و توربین های محور عمودی رایج نیستند. توربین های به کار رفته نیز همان ساختار متعارف و ساده را دارند و قابلیت ویژه ای برای آنها در نظر گرفته نشده است. به عبارت دیگر زمانی که توربین ها کوچک باشند (در محدوده زیر ۲۰ کیلووات) سیستم کنترل آنها استال است و در صورت به کار گیری توربین های بزرگتر، کنترل آنها از طریق تغییر زاویه پره ها انجام می شود.

مورد دیگری که دارای اهمیت است، جمع آوری توان تولیدی توربین ها است. از روی طرح های ارائه شده می توان دریافت که کوپل توربین ها کاملا به صورت الکتریکی انجام شده است. به عبارت دیگر هر توربین دارای ژنراتور مختص به خود است و به صورت مستقل توان الکتریکی را تولید کرده و تحویل می دهد. در این طرح ها دیده نمی شود که روتورها به صورت مکانیکی با یکدیگر مرتبط شده باشند و نهایتا تبدیل انرژی توسط یک ژنراتور بزرگ صورت پذیرد. پس در صورتی که توربین های بادی بتوانند مستقل عمل نمایند و با در نظر گرفتن عدم یکنواختی سرعت باد در مقیاس زمانی و مکانی، می توان دریافت که توربین ها هر کدام سرعت دورانی و گشتاور تولیدی (توان) متفاوتی خواهند داشت. این به معنی تولید انرژی الکتریکی با ولتاژ و فرکانس متفاوت برای هر توربین است که اتصال مستقیم ژنراتورهای آنها و جمع آوری برق از طریق انشعاب ساده را ناممکن می نماید. راه حلی که برای این موضوع می توان در نظر گرفت، تبدیل برق تمام ژنراتورها به برق مستقیم با ولتاژ مشخص از طریق یک نیمه کانورتور و سپس جمع آوری آن است. سپس برق نهایی با یک کانورتور بزرگتر به برق متناوب با فرکانس دلخواه تبدیل شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

مورد دیگری که در این نوع توربین باید در نظر داشت، نحوه انطباق با تغییرات جهت باد است. در توربین های متعارف این کار با استفاده از یک دنبالچه (سیستم پسیو) یا یک عملگر برقی (سیستم اکتیو) صورت می گیرد. در توربین های آرایه ای نمی توان جهت توربین را برای هر توربین مستقلا (یا همزمان) تغییر داد. چنانچه صفحه اصلی روتور ثابت باشد و فقط توربین ها جهت خود را تغییر دهند، دچار سایه اندازی روی یکدیگر شده و توانشان کاهش می یابد. همچنین اثرات مخرب مکانیکی ناشی از اندرکنش جریان مغشوش توربین جلو و توربین عقب دور از ذهن نیست. چنانچه این موضوع را از منظر سطح موثر روتور نیز بررسی کنیم، خواهیم یافت که سطح تصویر شده توربین آرایه ای در راستای باد، مقدار کمتری خواهد داشت در مقایسه با وقتی که باد به صورت عمود بر صفحه توربین ارایه ای می وزد. لذا برای حل این مشکل می بایست کل توربین آرایه ای تغییر جهت داده و رو به باد شود و توربین های موجود در آن همواره باید راستای خود را نسبت به سازه ای که روی آن نصب هستند حفظ نمایند. طراحی و تعبیه سیستمی که بتواند این سازه بزرگ را دوران داده و رو به باد نماید دارای پیچیدگی های فنی زیادی است.

بر اساس آنچه گفته شد، تنها قطعه ای که در توربین های آرایه ای متفاوت است، پایه توربین است و دو ساختار برای آن معرفی شده است. در ساختار اول، سازه نگهدارنده یک دکل یا برج می باشد که نهایتا مانند درخت به شاخه هایی تقسیم شده و در هر شاخه توربینی تعبیه شده است. در ساختار دوم، سازه نگهدارنده یک صفحه بزرگ شبکه ای یا خرپایی است که توربین ها به صورت منظم و آرایه ای روی آن نصب شده اند. چنانچه این سازه در منطقه ای نصب شده باشد که تغییرات شدید در جهت وزش باد وجود ندارد، کار ساده تر شده و می توان سازه خرپایی را روی چند پایه استوار کرده و نصب نمود. در صورتی که جهت باد متغیر باشد، این سازه مستطیلی می بایست روی یک پایه نصب شود تا قابلیت تغییر جهت داشته باشد. در ادامه این دو ساختار به تفکیک بررسی شده اند. به غیر از بخش پایه نگهدارنده، سایر اجزا مانند توربین های متعارف است و می توان هزینه قسمت های مختلف را با استفاده از داده های موجود در بازار محاسبه نمود.

در فرایند طراحی مفهومی سیستم، پس از تعیین نوع ساختار کلی و نوع اجزای تشکیل دهنده، می بایست اندازه آن بر حسب عملکرد مورد انتظار از آن بیان شود. از بررسی مقالاتی که عملکرد توربین های بادی دارای چند روتور را بررسی کرده اند [۱۰ و۴ و ۱۵] می توان دریافت که عملکرد آنها تغییر محسوسی نسبت به توربین های تک روتور عادی ندارد. لذا برای طراحی اولیه آنها می توان از همان روابط موجود در روش BEM و به کار گیری ضریب توان میانگین به میزان ۰.۳۵ استفاده نمود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

۳/۱/۱ ساختار درختی

بررسی ها نشان می دهد برای توربین های با تعداد روتور کم (بین ۲ تا ۵) از ساختار درختی برای سازه استفاده شده است. اما از آنجا که هدف از به کار گیری توربین های چند روتوری، دستیابی به توان های بالا و استفاده از توربین های کوچک برای صرفه جویی در هزینه است، ساختار درختی نمی تواند به صورت کامل جوابگوی این هدف باشد. از روی بررسی تحقیقات نیز می توان دریافت که ساختار درختی به علت محدودیت مذکور کمتر مورد بررسی قرار گرفته است. لذا در این پروژه از ساختار درختی صرف نظر می شود. نمونه ای از این کار در شکل ۱۴ نشان داده شده است.

۳/۱/۲ ساختار خرپایی

همانطور که گفته شد، هدف از تعریف این پروژه بررسی توربین های آرایه ای با تعداد زیاد از توربین است. با توجه به طرح هایی که در سوابق و پیشینه موضوع به آنها اشاره شد، صرفا ساختار خرپایی برای آن پیشنهاد شده است. در این پروژه نیز، ساختار مورد استفاده همین نوع می باشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

۳/۲ تابع براورد کننده هزینه اجزا

در این گزارش، براورد هزینه قطعات مختلف توربین بادی بر اساس دو روش مختلف انجام شده است. روش اول مبتنی بر تعیین جرم هر قطعه و سپس تعیین قیمت آن بر اساس هزینه ساخت به ازای واحد جرم است. روش دوم مبتنی بر تعیین سهم هر قطعه از یک توربین بادی معیار و سپس محاسبه قیمت هر قطعه بر اساس قیمت کل توربین است. این اعداد ممکن است با واقعیت های موجود در بازار امروز اختلافاتی داشته باشد. برای همین منظور برای هر قطعه، هزینه از دو روش محاسبه شده تا مقایسه نتایج و پیدا کردن روش دقیق تر مقدور باشد.

به صورت کلی دلیل اختلاف در قیمت ها را می توان ناشی از گذر زمان و توسعه فناوری دانست. در تمام فناوری ها رایج است که با گذر زمان و پیدا شدن روش های تولید جدید، انجام بهینه سازی ها و افزایش تعداد رقبا، هزینه محصول مشخصی کاهش می یابد تا به حد ثابتی می رسد. توابع قیمتی ارائه شده در این گزارش مربوط به سال ۲۰۰۶ است که در آن زمان توربین های بادی ۵ مگاواتی، اوج فناوری محسوب می شدند. اکنون توربین های رده اول و پیشگام بازار دارای ظرفیتی در حد ۱۲ مگاوات هستند. شاهد دیگری که بر این ادعا وجود دارد، هزینه اجرای یک توربین بادی به صورت کلی است. در دهه قبل هزینه هر دستگاه توربین بادی در حد ۱۴۰۰ دلار بر کیلووات بوده است. امروزه این مبلغ به حدود ۷۰۰ تا ۸۰۰ دلار بر کیلووات رسیده است که کاهش چشم گیری را نشان می دهد. برای حصول نتایج بهتر، در این گزارش از مقدار ۱۰۰۰ دلار بر کیلووات استفاده شده است که در محدوده عددهای پایین بازار محسوب می شود (مانند توربین های چینی). امروزه سازنده های با کیفیت تر (مانند هر صنعت دیگری) نیز وجود دارند که قیمت های بالاتری در حد ۱۳۰۰ دلار بر کیلووات نیز ارائه می کنند.

۳/۲/۱ پره

بخش اصلی توربین بادی پره های آن است که وظیفه استحصال انرژی مکانیکی از جریان باد را بر عهده دارد. گرچه در انواع توربین های بادی شکل پره ها می تواند متفاوت باشد ولی اصل آن همواره وجود دارد. قیمت و مشخصات ابعادی و وزنی پره های توربین بادی بر اساس نوع آن می تواند متفاوت باشد ولی خوشبختانه در این طرح می بایست از پره های توربین بادی محور افقی استفاده شود که متعارف ترین نوع توربین است و اطلاعات بیشتری از آن در دسترس است. در مرجع [۲۴] درباره جرم و هزینه پره های توربین بادی اطلاعات زیر داده شده است.

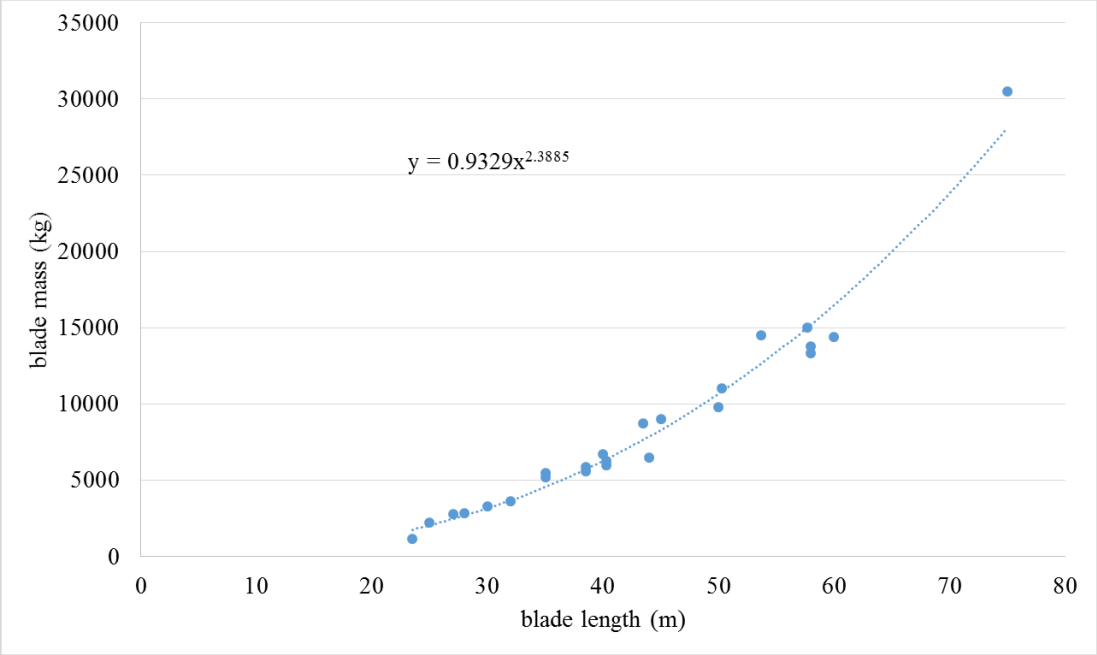
$$\text{Blade mass}=0.4948*R^{2.53} \quad (۱)$$

$$\text{Blade cost}=[(0.4019*R^{3}-21051)*BCE+2.7445*R^{2.5025}*GDPE]/(1-0.28) \quad (۲)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

در این رابطه R شعاع روتور است و سایر پارامترها ضرایبی هستند که بر اساس تکنولوژی به کار رفته برای تولید پره، می توانند مقادیر مختلفی را اتخاذ نمایند. چنانچه جرم پره یک توربین ۶۶۰ کیلووات با قطر ۴۷ متر (توربین صبا نیرو) را با این رابطه محاسبه نماییم، مقدار ۱۴۵۸ کیلوگرم حاصل می شود. این در حالی است که پره موجود ۱۱۵۰ کیلوگرم وزن دارد. در خصوص پره توربین بادی ۲ مگاوات با قطر ۸۷ متر نیز مقدار ۶۹۱۵ کیلوگرم به دست می آید در حالی که مقدار واقعی ۸۷۰۰ کیلوگرم می باشد. با توجه به اختلافات به دست آمده، نمودار شکل ۲۸ با استفاده از پایگاه داده های موجود در پژوهشگاه نیرو، ترسیم شده است. با گذر دادن تابع توانی از میان داده ها می توان دریافت که رابطه به دست آمده با مورد قبلی کمی اختلاف دارد.

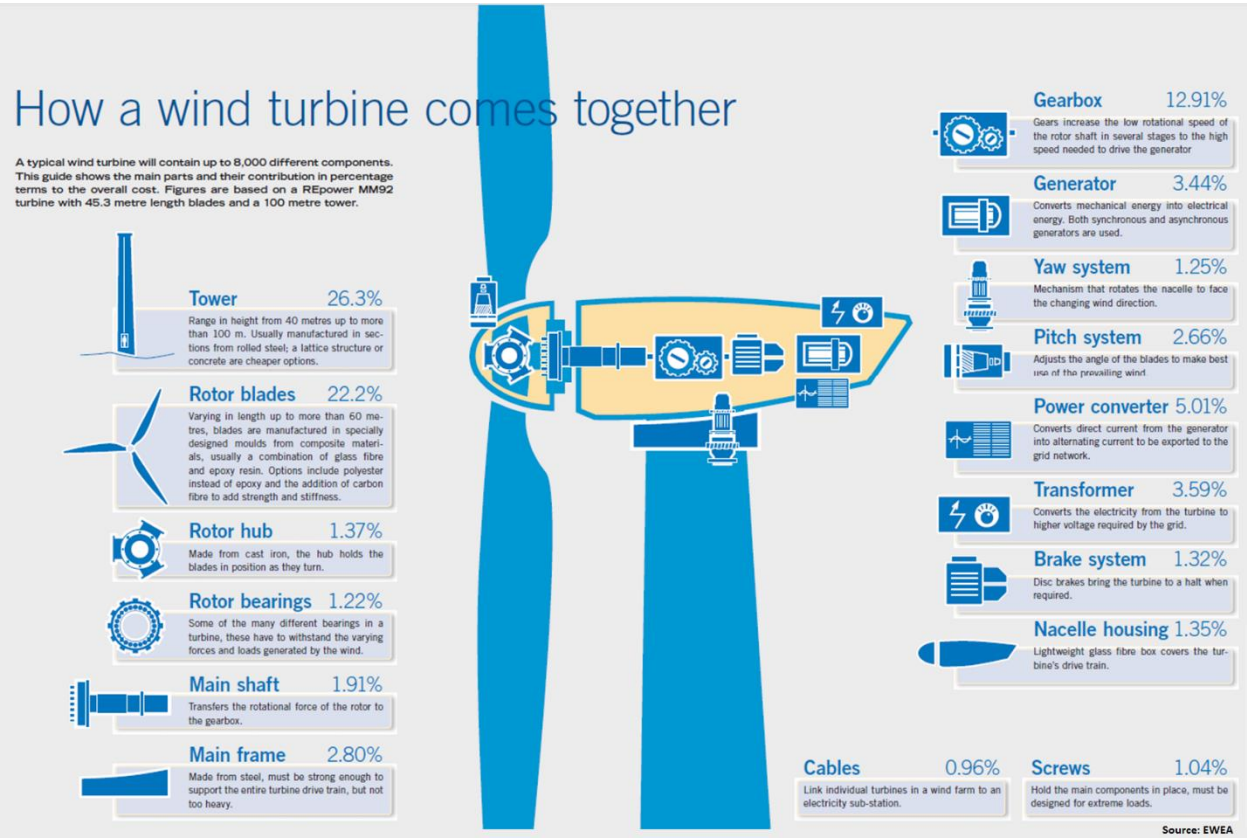
برای تخمین قیمت پره نیز می توان از داده های موجود در پژوهشگاه نیرو استفاده کرد. اطلاعات نشان می دهد هزینه ساخت و تولید قطعات کامپوزیتی حدود ۱۰ دلار بر کیلوگرم است. این مقدار در مرجع ۲۵ به میزان ۱۲ دلار است. لذا به راحتی می توان قیمت پره ها را بر حسب داده های فوق محاسبه نمود.



شکل ۲۸ رابطه بین شعاع روتور و جرم آن

درباره تخمین قیمت اجزای توربین روش دیگری نیز می توان در پیش گرفت. از روی تحقیقات مختلف سهم اجزای مختلف توربین بادی مطابق شکل ۲۹ استخراج شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276



شکل ۲۹ سهم قیمتی اجزای مختلف توربین بادی محور افقی

از آنجایی که امروزه حدود قیمت یک توربین بادی نیروگاهی حدود ۱۰۰۰ دلار بر کیلووات ظرفیت آن است [۲۶] می توان برای هر اندازه توربین بادی دلخواه، هزینه اجزای مختلف آن را استخراج کرد. بر اساس این شکل پره ها حدود ۲۲ درصد در قیمت یک توربین بادی سهم دارند. تنها نکته ای که در این بین باقی مانده است، پیدا کردن رابطه ای بین اندازه پره و ظرفیت تولید انرژی آن است. برای استخراج این رابطه می بایست به روابط تئوری بازگشت. چنانچه ضریب استخراج توان نهایی یک توربین بادی را به صورت میانگین برابر ۰.۳۵ در نظر بگیریم و توربین از کلاس ۲ استاندارد فرض شود، در این حالت رابطه زیر بر قرار خواهد بود.

$$P=1129.71\ R^2 \qquad (۳)$$

۳/۲/۲ هاب

اگر بررسی ساختار توربین به صورت ترتیبی انجام شود، قطعه بعدی که می بایست تحلیل شود هاب توربین است که پره ها به صورت مستقیم به آن متصل هستند. در مرجع ۲۴ در خصوص جرم و قیمت هاب، اطلاعات زیر ذکر شده است.

$$\text{Hub mass}=0.954*\text{blade mass}+5680.3 \quad (۴)$$

$$\text{Hub cost}=\text{hub mass}*4.25 \quad (۵)$$

در خصوص توابع بالا دو نکته را باید در نظر داشت. اول اینکه این اطلاعات مربوط به سال ۲۰۰۶ است و معمولا فناوری با گذر زمان دچار کمی کاهش هزینه می شود. مورد دوم این است که از روی ظاهر تابع می توان دریافت که این یک تابع توانی ساده نیست و دارای مقدار ثابت نیز هست. بنابراین نمی توان برای توربین های بادی کوچک از این تابع استفاده کرد. چراکه با کاهش مقدار شعاع، جرم هاب به صفر میل نمی کند. بررسی دقیق تر گزارش نشان می دهد که این تابع برای محدوده توربین های با ظرفیت ۷۵۰ کیلووات تا ۵ مگاوات می تواند معتبر باشد.

بررسی و تجربیات در پژوهشگاه نیرو نشان می دهد هزینه تولید قطعات ریخته گری به صورت تولید انبوه حدود ۱.۸ دلار بر کیلوگرم است که با رابطه ۵ اختلاف زیادی دارد. لذا با توجه به اینکه داده های عملی دارای اعتبار بیشتری هستند، عدد فوق مورد استفاده قرار می گیرد.

از روی اطلاعات شکل ۲۹ می توان دریافت که هزینه هاب حدود ۱.۳ درصد از هزینه توربین است. به عنوان مثال برای یک توربین ۱ مگاواتی با هزینه تقریبی ۱۰۰۰ هزار دلار، قیمت هاب حدود ۱۳۰۰۰ دلار می باشد. اگر این محاسبه با استفاده از روابطی که پیشتر ارائه شد انجام شود مقدار ۱۴۷۰۰ دلار حاصل می شود.

۳/۲/۳ سیستم کنترل

در اینجا منظور از سیستم کنترل مجموعه حسگرها، کنترلرها و عملگرهایی است که کارکرد صحیح توربین را تنظیم می نمایند. به عبارت دیگر سیستم کنترل شامل ادوات هواشناسی، سیستم پیچ، سیستم یا و کنترلر مرکزی خواهد بود. بر اساس داده های شکل ۲۹ این مجموعه نهایتا حدود ۱۰درصد از قیمت توربین را شامل می شود. برای یک توربین یک مگاوات حدود ۱۰۰ هزار دلار برای آن تخمین زده می شود. در مرجع ۲۴ موارد زیر ذکر شده اند.

$$\text{Yaw cost}=0.0658*D^{2.964} \quad (۶)$$

$$\text{Controller cost}=35000\ (\text{fix}) \quad (۷)$$

$$\text{Pitch system cost}=0.4788*D^{2.6578} \quad (۸)$$

با استفاده از این روابط به ترتیب مقادیر ۱۱۹۶۰ و ۳۵۰۰۰ و ۲۴۹۰۰ دلار و مجموعا ۷۲۰۰۰ دلار به دست می آید.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

۳/۲/۴ سیستم انتقال قدرت

این مجموعه شامل قطعاتی است که انرژی مکانیکی را از هاب دریافت کرده و نهایتا به ژنراتور منتقل می کنند. لذا در این مجموعه، محور اصلی توربین، محور پر سرعت، جعبه دنده (در صورت وجود)، کوپلینگ ها و ترمزها قرار می گیرند. با استفاده از داده های شکل ۲۹ این مجموعه نهایتا حدود ۱۶درصد از قیمت توربین را شامل می شود. برای یک توربین ۱ مگاواتی این هزینه حدود ۱۶۰ هزار دلار تخمین زده می شود.

در مرجع ۲۴ موارد زیر ذکر شده اند.

$$\text{Main shaft mass}=0.0142*D^{2.888} \quad (۹)$$

$$\text{Main shaft cost}= 0.1*D^{2.888} \quad (۱۰)$$

$$\text{Bearing mass}=(D*8/600-0.033)*0.0184*D^{2.5} \quad (۱۱)$$

$$\text{Bearing cost}= \text{bearing mass} * 17.6 \quad (۱۲)$$

$$\text{Gearbox mass}=70.94* \text{ high Torque}^{0.759} \quad (۱۳)$$

$$\text{Gearbox cost}= 16.45*\text{power}^{1.249} \quad (۱۴)$$

$$\text{Coupling cost}=1.99*\text{power}-0.11 \quad (۱۵)$$

با استفاده از این روابط به ترتیب مقادیر ۱۳۳۰۰، ۶۷۳۰، ۹۲۰۰۰ و ۲۰۰۰ دلار برای محور اصلی، بیرینگ ها، گیربکس و کوپلینگ ها و مجموعا ۱۱۴۰۰۰ دلار به دست می آید. لازم به ذکر است که در این روابط مقدار توان باید بر حسب کیلووات وارد شود.

۳,۲,۵ ادوات برقی

در این گزارش منظور از ادوات برقی، ژنراتور، کانورتور و ترانس است. با استفاده از داده های شکل ۲۹ این مجموعه نهایتا حدود ۱۳.۵ درصد از قیمت توربین را شامل می شود (برای توربین های دارای گیربکس). برای یک توربین ۱ مگاواتی این هزینه حدود ۱۳۵ هزار دلار تخمین زده می شود.

در مرجع ۲۴ موارد زیر ذکر شده اند.

$$\text{Generator mass}=6.47*\text{power}^{0.9223} \quad (۱۶)$$

$$\text{Generator cost}=\text{power}*65 \quad (۱۷)$$

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

از آنجا که توربین های بدون جعبه دنده و رانش مستقیم دارای طراحی متفاوتی برای ژنراتور هستند، لذا روابط جداگانه ای برای آنها وجود دارد. لازم به ذکر است در صورت استفاده از ژنراتور رانش مستقیم، هزینه جعبه دنده و محور اصلی می بایست از بخش های قبلی حذف شود.

$$\text{Generator mass}=661.25*\text{Torque}^{0.606} \quad (۱۸)$$

$$\text{Generator cost}=\text{power}*219.33 \quad (۱۹)$$

$$\text{Converter cost}=\text{power}*79 \quad (۲۰)$$

$$\text{Transformer cost coefficient}=3.49e\text{-}6*\text{power}^2-0.0221*\text{power}+109.7 \quad (۲۱)$$

با استفاده از روابط بالا هزینه ژنراتور و کانورتور و ترانس برای یک سیستم یک مگاواتی به ترتیب ۶۵۰۰۰ و ۷۹۰۰۰ و ۹۱۰۰۰ دلار می باشد.

۳/۲/۶ شاسی اصلی توربین

تمام اجزایی که پیشتر به آنها اشاره شد می بایست به یکدیگر مرتبط شده تا بتوانند عملکرد مورد انتظار را ارائه دهند. این ارتباط ساختاری از طریق شاسی اصلی توربین برقرار می شود و جانمایی تمام تجهیزات روی آن انجام شده است. این شاسی معمولا با استفاده از روش ریخته گری تولید می شود. با استفاده از داده های شکل ۲۹ این قطعه نهایتا حدود ۳ درصد از قیمت توربین را شامل می شود که برای یک توربین ۱ مگاوات حدود ۳۰۰۰۰ دلار می باشد. چنانچه بر اساس اطلاعات مرجع ۲۴ عمل نماییم، روابط زیر حاکم خواهد بود.

$$\text{Mainframe mass}=2.233*D^{1.953} \quad (۲۲)$$

$$\text{Mainframe cost}= 9.489*D^{1.953} \quad (۲۳)$$

برای توربین های بدون جعبه دنده نیز روابط زیر حاکم است.

$$\text{Mainframe mass}=1.228*D^{1.953} \quad (۲۴)$$

$$\text{Mainframe cost}=627.28*D^{0.85} \quad (۲۵)$$

در این حالت نیز برای یک توربین ۱ مگاوات می توان هزینه ۲۷۷۰۰ دلار را تخمین زد.

۳/۲/۷ پایه توربین

برای توربین های متعارف و رایج در بازار، جرم برج از رابطه زیر به دست می آید:

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

$$\text{Tower mass} = 0.3973 * \text{rotor area} * \text{height} - 1414 \quad (۲۶)$$

$$\text{Tower cost} = \text{tower mass} * 1.5 \quad (۲۷)$$

نکته که می بایست روی آن تاکید کرد، این است که برخلاف توربین های بادی تک روتور متعارف، توربین های چند روتور دارای ساختار و چیدمان واحدی نیستند. لذا در هر مورد می بایست طراحی مستقلی برای آن صورت پذیرد که در نتیجه ارائه یک رابطه و قیمت برای آن را ناممکن می سازد. همچنین نمونه عملی از آنها ساخته نشده است. در توربین های متعارف می توان با نمایش اطلاعات سازه ای قطعات مختلف توربین روی یک نمودار و گذر دادن یک منحنی، تابعی برای ارتباط بین پارامترهای مختلف هندسی و جرمی پیدا کرد. اما در توربین های دارای ساختار خرپایی چنین امکانی وجود ندارد. بنابراین رابطه ای که بیانگر ارتباط بین اندازه، وزن و قیمت پایه نگه دارنده این توربین ها باشد یافت نشد.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

۴ بررسی و ارزیابی فنی و اقتصادی

به صورت کلی ویژگی های توربین های بادی آرایه ای را می توان در دسته بندی های اصلی زیر جمع بندی نمود.

۴/۱ مقایسه و ارزیابی مزایای فنی توربین آرایه ای

با توجه به موارد مطرح شده در فصول قبلی، موارد زیر را می توان به عنوان ویژگی های فنی توربین های بادی آرایه ای عنوان نمود.

- در بسیاری از مواقع توربین های بادی نیروگاهی به دلیل مشکلات فنی مجبور به توقف و عدم تولید می شوند تا زمانی که تعمیرات و رفع عیب صورت پذیرد. این گونه، از توربین های بادی متعددی استفاده می نماید. بنابراین احتمال خرابی همزمان همه آنها بسیار کم است و عملا می توان گفت که توربین به صورت کامل از کار نمی افتد و تولید توان آن متوقف نخواهد شد. این مورد موجب افزایش ضریب ظرفیت نهایی توربین نیز می شود.
- سامانه تغییر جهت توربین در این طرح پیچیده تر از نمونه های دارای یک روتور است و حداقل نیازمند دو یاتاقان است. این در حالی است که توربین های دارای یک روتور تنها نیازمند یک یاتاقان هستند.
- انتظار می رود با استفاده از توربین های آرایه ای، تعداد بعضی اجزای توربین و در نتیجه پیچیدگی فنی مجموعه کاهش یابد. از این اجزا می توان به سیستم جهت یاب توربین، انواع سنسورها و عملگرها، ترانس ها، سیستم برقگیر و برج اشاره کرد.
- به نظر می رسد برای مکان هایی که تغییر جهت باد کم باشد، به علت ساده شدن قابل توجه سیستم، توربین های آرایه ای گزینه بسیار خوبی باشند.
- به علت وجود سازه نگهدارنده، دسترسی به توربین ها از بیرون کار ساده تری است و انجام بعضی اقدامات تعمیراتی به ویژه روی پره ها ساده تر خواهد شد.
- با توجه به امکان به کارگیری توربین ها به صورت مستقل در ساختار آرایه ای، این امکان وجود دارد که راندمان جذب انرژی با توجه به پروفیل باد، بهینه تر باشد.
- نصب توربین های آرایه ای راحت تر است.
- حمل و نقل توربین های آرایه ای راحت تر است. بنابراین نصب توربین های با توان بالاتر در مناطق دشوار، امکان پذیر و ارزان تر خواهد شد.
- دینامیک و ارتعاشات (تغییر شکل ها) توربین های آرایه ای پیچیده تر است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

- با توجه به ساده تر بودن فناوری در توربین های کوچکتر، پیش بینی می شود که هزینه تعمیر و نگهداری این توربین ها کمتر از نمونه های بزرگ مگاواتی باشد
- با توجه به نصب روتورها روی یک سازه خرپایی، دسترسی به توربین ها بسیار راحت تر است و نیازی به تجهیزات ویژه نیست. این کار نیز می تواند هزینه های تعمیر و نگهداری مجموعه را کاهش دهد.
- با استفاده از توربین های آرایه ای، تعداد بعضی اجزای توربین و در نتیجه هزینه نهایی آنها کاهش یابد. از این اجزا می توان به سیستم جهت یاب توربین، انواع سنسورها و عملگرها، ترانس ها، سیستم برقگیر و دکل اشاره کرد.

۴/۲ مقایسه اقتصادی توربین های آرایه ای و نوع موجود

همانطور که گفته شد، توربین های بادی آرایه ای بر خلاف توربین های بادی مرسوم، دارای ساختار و شکل ثابت مشخصی نیستند. در توربین های متعارف، با داشتن مقدار توان مورد نیاز و سرعت باد میانگین سایت، با استفاده از روابط تئوری می توان تنها یک نوع توربین برای آن طراحی کرد. حتی اگر اختلافی در پارامترها و سایر فرضیات مورد نیاز برای طراحی وجود داشته باشد، نهایتا منجر به تفاوت اندکی در قطر توربین می شود.

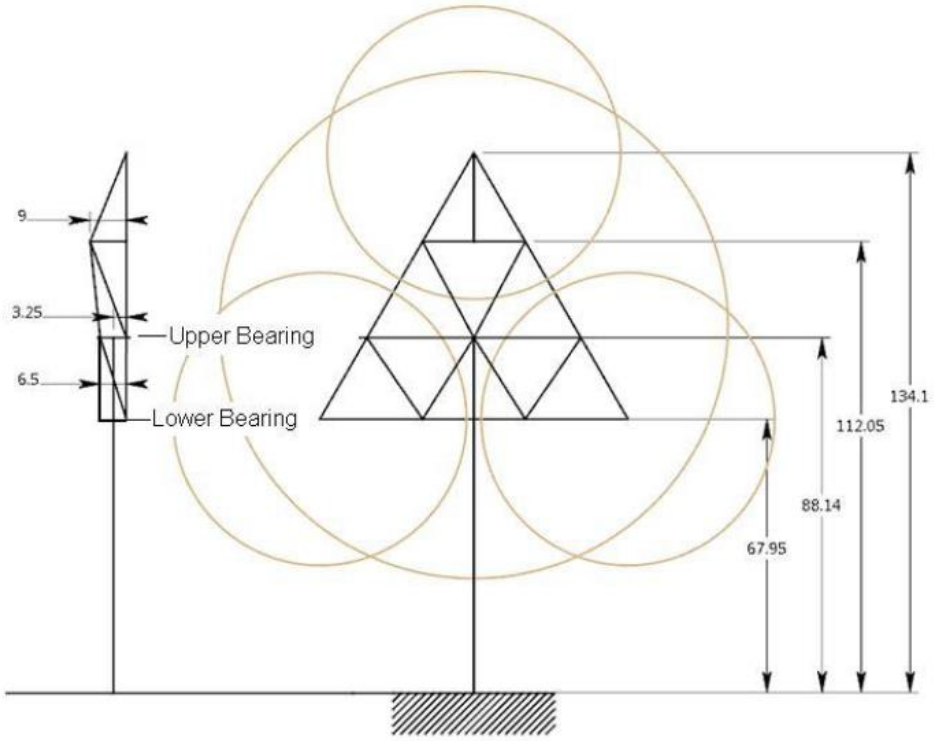
در توربین های آرایه ای، تعداد پارامترهای طراحی بسیار بیشتر است. به عنوان مثال برای دستیابی به یک توان مشخص می توان از ۲ یا چندین (در بعضی منابع تا ۴۵ توربین نیز ذکر شده است) توربین استفاده نمود. بعد از انتخاب تعداد توربین ها، چیدمان آنها نیز یک پارامتر است که در صورت بیشتر بودن تعداد توربین ها، تعداد درجات آزادی و ساختارهای ممکن به شدت افزایش می یابد. حتی با داشتن تعداد مشخصی توربین، نحوه چیدمان آنها روی سازه خرپایی به شدت روی توزیع بار آن اثر گذاشته و طراحی آن را دگرگون می کند.

پس می توان نتیجه گرفت که برای سازه نگه دارنده توربین هیچ ساختار و معیار ثابتی وجود ندارد که با آن بتوان به یک تابع جرم و هزینه دست یافت. در واقع باید برای هر حالت یک سازه جدید طراحی شده و فرایند بهینه سازی را برای سبک تر شدن، طی نماید.

اکنون برای جمع بندی پروژه و دست یابی به یک نتیجه، دو مثال در نظر گرفته شده است که مبتنی بر کار انجام شده در مرجع ۱۷ است. در این کار محقق تلاش کرده است که با استفاده از ۳ توربین بادی ۱.۶۷ مگاواتی به یک توربین ۵ مگاواتی برسد. برای این منظور یک سازه خرپایی طراحی شده و هزینه های آن استخراج شده است. با

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

توجه به پیچیدگی های تحلیل ها، تنها دو بارگذاری استاندارد IEC61400-1 مورد استفاده قرار گرفته است. سازه طراحی شده و ابعاد توربین آرایه ای در این کار مطابق شکل ۳۰ است.



شکل ۳۰ ساختار و ابعاد توربین ۵ مگاوات آرایه ای در مرجع ۱۷

توربین های مورد استفاده دارای مشخصات مطابق جدول ۶ بوده اند.

جدول ۶ مشخصات توربین های مورد استفاده در مرجع ۱۷

	Per rotor of MRWT	Single-rotor 5MW wind turbine
Rotor diameter (m)	72.75	126
Rated rotor power (MW)	1.67	5.0
Hub dia (m)	≈ 2	3
Rotor velocity, ω (rpm)	20.94	12.10
Rotor area (m^2)	4,156.77	12,468.9
Power coefficient, C_p	0.468	0.468
Thrust coefficient, C_t	0.69	0.69
Maximum Axial thrust (kN)	228.3	684.8
Rotor Torque (kNm)	714.3	3,945.9
RNA weight (kg)	74,972	357,801

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

در این مقطع تلاش می شود با استفاده از یک توربین موجود در کشور به توان های بالاتر دست یافته و هزینه ها را مقایسه نماییم. البته که نتیجه این تحلیل ها تقریبی است ولی برای رسیدن به یک نتیجه کلی و کلان، می تواند مفید باشد.

۴/۲/۱ مشخصات فیزیکی توربین بادی ۶ مگاواتی

هدف اصلی از اجرای این طرح دستیابی به توان های بالاتر توربین بادی با استفاده از نمونه های موجود در کشور است. اولین نمونه ای که می توان به عنوان توربین ساخت داخل نام برد، توربین بادی ۲ مگاوات است که در پژوهشگاه نیرو طراحی و ساخته شد. اطلاعات دقیق از این دستگاه در دسترس است. از طرفی به توربین ۱.۶۷ مگاواتی مورد استفاده در مرجع فوق نزدیک است. پس با به کار گیری ۳ مورد از این توربین می توان به توان ۶ مگاوات دست یافت (جدول ۷) که در کشور نمونه دیگری ندارد.

برای محاسبه هزینه قطعات از داده های ارائه شده در فصل قبل استفاده شده است. برای محاسبه وزن و هزینه سازه خرپایی، سازه معرفی شده در مرجع ۱۷ بزرگنمایی شده است. این کار با استفاده از قوانین بزرگنمایی صورت گرفته است و با توجه به نزدیک بودن توان توربین ۱.۶۷ مرجع و ۲ مگاوات موجود، دقت خوبی را انتظار داریم. توربین ۶ مگاواتی نیز از مقیاس کردن و انجام برخی محاسبات روی توربین ۵ مگاوات به دست آمده است.

جدول ۷ مشخصات توربین های مورد استفاده

عنوان	توربین های مورد استفاده در سامانه آرایه ای	توربین تک روتور
توان نامی (مگاوات)	۲	۶
قطر روتور (متر)	۸۷	۱۳۸
سرعت روتور (دور بر دقیقه)	۱۷	۱۱.۰۵
مساحت روتور (متر مربع)	۵۹۴۱	۱۴۹۴۹
ضریب توان (-)	۰.۴۶۸	۰.۴۶۸
ضریب رانش (-)	۰.۶۹	۰.۶۹
بیشترین نیروی رانش (کیلو نیوتن)	۲۷۳.۴	۸۲۱.۷۶
وزن مجموعه ناسل (تن)	۹۸	۴۷۰

برای محاسبه وزن سازه خرپایی به ترتیب زیر عمل شده است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

۱. با توجه به معیار فاصله بین روتورها (۵ درصد قطر)، ابعاد سازه بر اساس قطر روتور باید بزرگنمایی شود. بنابراین ارتفاع مثلث متساوی الاضلاع که شکل کلی سازه را بیان می کند از ۶۶ متر به ۷۸ متر تغییر می یابد.
۲. نیروی اعمال شده به سازه که ناشی از رانش نیروی باد است با مساحت روتور (همان نسبت توان) متناسب است. بنابراین انتظار می رود نیروها به نسبت ۲ به ۱.۶۷ بزرگنمایی شود.
۳. گشتاورهای خمشی وارد شده به سازه که حاصل ضرب نیرو در بازو است با توان سوم نسبت قطر توربین بزرگنمایی می شود.
۴. اگر فرض کنیم جنس سازه تغییر نکرده باشد، پس حداکثر تنش ایجاد شده در سازه نباید تغییر یابد. بنابراین می توان گفت:

$$\sigma = \frac{Mc}{I} = cte \qquad ۲۸$$

۵. با فرض مقطع دایره ای برای اعضای این خرپا می توان نوشت:

$$c = \frac{r}{2} \qquad ۲۹$$

$$I = \frac{\pi r^4}{4} \qquad ۳۰$$

۶. با جمع بندی روابط فوق داریم:

$$\sigma = \frac{(a_1 r^3)c}{\pi r^4 / 64} = cte \qquad ۳۱$$

چنانچه قرار باشد که تنش با افزایش شعاع تغییر نیابد، پس پارامتر c که در واقع ضریبی از قطر اعضای خرپا است نیز باید با شعاع متناسب باشد. نتیجه این محاسبات این است که سازه خرپایی از لحاظ ابعادی کاملا با نسبت قطر توربین های به کار گرفته شده بزرگنمایی می شود و حجم آن (جرم آن) تابعی از توان سوم نسبت تبدیل خواهد بود. در اینجا نسبت تبدیل (بین کار مرجع ۱۷ و پژوهش حاضر) همان نسبت اندازه توربین های به کار گرفته شده یعنی ۸۷ به ۷۲.۷۵ است.

پس اگر جرم سازه نگهدارنده در کار قبلی حدود ۱۳۵.۶ تن محاسبه شده بود، برای توربین کنونی حدود ۲۳۱.۹ تن براورد می شود.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

۴/۲/۲ براورد قیمت توربین ۶ مگاواتی آرایه ای

با استفاده از توابع قیمتی فصل قبل، جدول ۸ تهیه شده است. به این ترتیب هزینه یک توربین آرایه ای ۶ مگاواتی و یک توربین تک روتور ۶ مگاواتی قابل مقایسه است. در این جدول، هزینه ناسل و روتور توربین ۲ مگاوات از طریق کم کردن قیمت دکل توربین از قیمت کل توربین حاصل شده است. قیمت سازه نگه دارنده با احتساب هزینه ساخت ۱.۵ دلار بر کیلوگرم محاسبه شده است. قیمت دکل و سیستم یا، مربوط به توربین تک روتور ۶ مگاوات است.

جدول ۸ هزینه قطعات توربین آرایه ای

قطعه	قیمت (دلار)
ناسل + روتور (۳ دستگاه)	۳*۱۱۳۷۰۰۰
سازه نگهدارنده	۳۴۸۰۰۰
سیستم یا	۱۴۲۰۰۰
دکل اصلی	۸۰۰۰۰۰
مجموع	۴۷۰۱۰۰۰

این در حالی است که قیمت یک توربین ۶ مگاواتی با کیفیت خوب با احتساب ۸۰۰ دلار بر کیلووات، ۴ میلیون و ۸۰۰ هزار دلار به دست می آید که بیش از یک توربین آرایه ای با همان توان است. بنابراین به نظر می رسد که (حد اقل برای ساختار بررسی شده)، توربین آرایه ای می توانند به قیمت های جذاب تری برسند و این به غیر از مزایای فنی آنهاست

۴/۳ بررسی مزایای طرح از لحاظ فناوری

- توربین های بادی در ابعاد کوچکتر دارای تولید کننده های بسیار بیشتری هستند که باعث رقابتی تر شدن این بازار می شود. لذا می توان انتظار داشت که محصولات در این رده دارای قیمت نهایی کمتری باشد.
- توربین های بادی در این مقیاس دارای سابقه طولانی تری در بازار هستند. لذا فناوری ساده تری داشته و انجام عملیات تعمیر و نگهداری راحت تر و کم هزینه تر است.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

- زیرساخت و تولید کننده های توربین های بادی کوچک در کشور به تعداد زیاد وجود دارد و دستیابی به فناوری توربین های بادی چند روتور نیازمند سرمایه گذاری، انتقال فناوری و زمان کمتری است و می تواند نهایتا به صرفه باشد.
- از لحاظ قیمیت، توربین های ساخت داخل ارزانتر از نمونه های خارجی نیستند. آنچه که مزیت برای آنها محسوب می شود، هزینه های جانبی توربین مانند هزینه های انتقال پول، حمل و نقل، گمرکات و بیمه است که برای توربین های ساخت داخل مقادیر کمتری دارند.

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

۵ مراجع

[1] The Leading Edge: April 2020 Wind Energy Newsletter; NREL report; 2020
[2] E.Hau; Wind turbines; Springer; 2006
[3]J. V. Nielsen. Danmarks Vindkrafthistoriske Samling (Danish Wind Historical Collection), http://www.vindhistorie.dk/Faktablade/Faktablad 2a.pdf, 2001.
[4] P.Jamieson and M. Branney; Multi rotors: a solution to 20MW and beyond; Energy Procedia 24 (2012) 52-59
[5] N. S. Sandhu, S.Chanana; Comparative Analysis of Conventional and Multi-Rotor Wind Turbines; INTERNATIONAL JOURNAL OF CIRCUITS, SYSTEMS AND SIGNAL PROCESSING; 12 (2018) 246-255
[6] S. Störtenbecker, P. Dalhoff, M. Tamang and R. Anselm; Simplified support structure design for multi rotor wind turbine systems; wind energy science; EWEA; 2020
[7] D. Ransom, J. J. Moore, and M. Heronemus-Pate; Performance of Wind Turbines in a Closely Spaced Array; http://online.qmags.com/REWNA0510/?pg=7&mode=2, 2006.
[8] P.Jamieson and P.K.Chaviaropoulos and S.Voutsinas; Large Scale Offshore Wind Energy Systems,The Multi Rotor Solution
[9] Sandip A.kale and S.N.Sapali; A Review Of Multi-Rotor Wind Turbine Systems; Nova Science Publishers, 2019
[10] M. Bastankhah and M.Abkar; Multirotor wind turbine wakes; Phys. Fluids 31 (2019) 085106
[11] N.S. Ghaisas, A.S. Ghate, S.K. Lele; Large-eddy simulation study of multi-rotor wind turbines; Journal of Physics: Conf. Series 1037 (2018) 072021
[12] E. Ferede & F. Gandhi; Aeroelastic load analysis of a co-rotating quad-rotor wind Turbine; Wind Energy; 25 (2022) 450–467
[13] P.Jamieson and M. Branney; Structural Considerations of a 20MW Multi-Rotor Wind Energy System; J. Phys.: Conf. Ser. 555 (2014) 012013
[14] M. van der Laan, S. Andersen, N. García, N. Angelou1, G. Pirrung, S. Ott, M. Sjöholm, K. Hylling Sørensen, J. Xavier Vianna Neto, M. Kelly, T. Krogh Mikkelsen, and G. Christian Larsen; Power curve and wake analyses of the Vestas multi-rotor demonstrator; wind energy science; EAWE; 2019
[15] P. Jamieson; Innovation in Wind Turbine Design, Second Edition; Wiley; 2018
[16] P. Jamieson ; Multi Rotor Solution for Large Scale Offshore Wind Power; Supergen General Assembly ; 2016
[17] Preeti Verma; Multi Rotor Wind Turbine Design And Cost Scaling ; University of Massachusetts Amherst ; 2014
[18] Sandip.A.Kale and Shivalingappa.N.Sapali; Innovative Multi Rotor Wind Turbine Designs; Indo-Danish International Conference on WIND ENERGY : MATERIALS, ENGINEERING AND POLICIES (WEMEP 2012
[19] Jung, S. N., No, T.S., & Ryu , K. W.; Aerodynamic performance prediction of a 30 kW counter - rotating wind turbine; Renewable Energy 2005, 30 (5), 631-644.
[20] Kanemoto, T. & Galal, A. M.; Development of intelligent wind turbine generator with tandem wind rotors and double rotational armatures; *JSME International Journal*; Series B, 49; 2005

DOI: 10.30503/nripress.2020.276

[21] Shen W. Z., Zakkam V. A. K., Sørensen J. N.& Kari A.; Analysis of counter rotating wind turbines; *Journal of Physics*, 1-9; 2007
[22] https://w3.windfair.net/wind-energy/news/17183-looking-at-the-future-of-wind-the-selsam-multi-rotor-wind-turbine
[23] Hiroyuki Hirahara and Masaaki Kawahashi; Huge 3-D Lattice Structure With Small Wind Turbine for Amenity Space ; Researchgate; 2014
[24] L. Fingersh, M. Hand, and A. Laxson; Wind Turbine Design Cost and Scaling Model; Technical Report; NREL/TP-500-40566; 2006
[25] P. Bortolotti, D. Berry, R. Murray, E. Gaertner, D. Jenne, R. Damiani, G. Barter, and K. Dykes; A Detailed Wind Turbine Blade Cost Model; NREL/TP-5000-73585 June 2019
[26]Tyler Stehly and Patrick Duffy; 2020 Cost of Wind Energy Review; NREL/TP-5000-81209; 2022