

بهینه سازی نیروگاه های فرا ساحلی: مقایسه بررسی چیدمان های منظم و نامنظم توربین های بادی

مرتضی محرمخانی^۱

آزاده نکویی اصفهانی^{۲*}

azadehnekoieesfahani@gmail.com

مهدی بنی هاشمی^۳

تاریخ پذیرش: ۱۴۰۴/۰۱/۲۳

تاریخ دریافت: ۱۴۰۳/۰۷/۲۵

چکیده

زمینه و هدف چیدمان توربین های بادی در مزارع، به صورت منظم یا نامنظم، تأثیر قابل توجهی بر بازدهی کلی سیستم دارد. علی رغم اهمیت این موضوع، تفاوت های عملکردی بین این دو نوع چیدمان تاکنون به طور کامل شناخته نشده است. برای اتخاذ تصمیمات آگاهانه در طراحی مزارع بادی جدید، ضروری است که مزایا و معایب هر یک از این دو نوع چیدمان به دقت بررسی و مقایسه شوند. از جمله مهم ترین شاخص های عملکردی یک مزرعه بادی می توان به طرح های بهینه شده و الگوریتم های طراحی مورد استفاده اشاره کرد که نقش تعیین کننده ای در چیدمان نهایی توربین ها ایفا می کنند.

روش بررسی: تأثیر چیدمان منظم و نامنظم مزرعه بادی بر شاخص های عملکرد انتخابی از طریق یک مطالعه موردی مقایسه ای انجام شده. عملکرد هر دو طرح مزرعه بادی منظم و نامنظم بر اساس سه گروه شاخص های عملکرد که شامل توان تولید شده، خستگی برج ناشی از گردابه، سیستم کابل کشی بین آرایه ای ارزیابی گردید.

یافته ها: عملکرد مزرعه بادی منظم و نامنظم بر اساس شاخص عملکرد توان تولید شده، خستگی برج ناشی از اثر گردابه و سیستم کابل کشی به ترتیب به صورت زیر می باشد:

- در مزرعه بادی نامنظم تولید انرژی سالانه بالاتر و پایداری بیشتری نسبت به جهت باد دارا می باشد. این ویژگی می تواند به طور غیرمستقیم منجر به کاهش هزینه عدم تعادل در بازار برق شود. پایداری بیشتری نسبت به جهت باد به این معنی است که توان خروجی نسبت به نوسانات جهت باد حساسیت کمتری دارد.
- حداکثر آشفستگی موثر در مدل فرانس در مزارع بادی نامنظم ۲۳٫۸٪ بیشتر از مزارع بادی منظم است؛ استفاده از حداقل فاصله بین توربین ها برای بهبود اثر منفی بر آشفستگی موثر می تواند منجر به کاهش ۲۰ درصدی هزینه ها شود. برای بهبود عملکرد در طرح های مزرعه بادی آینده، اجرای الگوهای توربین بادی نامنظم توصیه می شود. و همچنین حداقل فاصله بین توربین ها با توجه به سطوح آشفستگی اضافه شده اثر گردابه در نظر گرفته می شود.
- بهینه سازی کابل های بین آرایه ای می تواند هزینه کابل ها در مزارع بادی منظم را تا ۱٫۱۵٪ نسبت به مزارع بادی نامنظم افزایش دهد.

بحث و نتیجه گیری: در استفاده از الگوریتم های بهینه سازی الگوهای نامنظم توربین بادی ذاتی می باشد. سه شاخص عملکرد انتخاب شده تا الگوهای منظم و نامنظم با یکدیگر مقایسه شوند. تعیین شاخص های عملکرد ذکر شده، مستقل از سایت و فنی هستند که توسط یک تحلیل تصمیم گیری چند معیاره شناسایی می شود.

واژه های کلیدی: نیروگاه های فرا ساحلی، اثر گردابه، بهینه سازی نیروگاه های بادی.

^۱ گروه عمران و محیط زیست، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

^۲ گروه عمران و محیط زیست، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران * (مسئول مکاتبات)

^۳ گروه عمران و محیط زیست، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

Optimization of offshore wind farms: A comparison between regular and irregular wind turbine layouts

Morteza Mohramkhani¹

Azadeh Nekoei Esfahani^{2*}

azadehnekoeiesfahani@gmail.com

Mehdi Bani Hashemi³

Accepted Date: April 12, 2025

Date Received: October 16, 2024

Abstract

Background and Objectives: The arrangement of wind turbines in wind farms, either in regular or irregular patterns, significantly impacts the overall system efficiency. Despite the importance of this issue, the performance differences between these two layout types have not been fully understood. To make informed decisions in designing new wind farms, it is crucial to carefully examine and compare the advantages and disadvantages of each layout type. Among the most important performance indicators of a wind farm are the optimized designs and design algorithms used, which play a decisive role in the final turbine layout.

Material and Methodology: The impact of regular and irregular wind farm layouts on selected performance indicators was investigated through a comparative case study. The performance of both regular and irregular wind farm designs was evaluated based on three groups of performance indicators: power generation, tower fatigue due to wake effects, and inter-array cabling systems.

Findings: The performance of regular and irregular wind farms based on power generation, tower fatigue due to wake effects, and cabling systems was as follows:

- Annual energy production in irregular wind farms is higher and more stable with respect to wind direction. This feature can indirectly lead to a reduction in imbalance costs in the electricity market. Greater stability relative to wind direction means that power output is less sensitive to fluctuations in wind direction.
- The maximum effective turbulence in the Frandsen model is 23.8% higher in irregular wind farms compared to regular ones. Using the minimum distance between turbines to mitigate the negative impact on effective turbulence can lead to a 20% reduction in costs. To improve performance in future wind farm designs, the implementation of irregular wind turbine patterns is recommended. Additionally, the minimum distance between turbines should be considered in relation to the added turbulence levels of the wake effect.
- Optimizing inter-array cables can increase cabling costs in regular wind farms by up to 1.15% compared to irregular wind farms.

Discussion and Conclusion: The inherent nature of wind turbines leads to irregular patterns when optimization algorithms are applied. Three performance indices were selected to compare regular and irregular patterns. The determination of these performance indices is site-independent and technical, identified through a multi-criteria decision analysis.

Keywords: Offshore wind farms, wake effect, wind farm optimization.

¹ Department of Civil Engineering and Environment, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

² Department of Civil Engineering and Environment, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran
**(Corresponding Author)*

³ Department of Civil Engineering and Environment, CT.C., Islamic Azad University, Tehran, Iran

مقدمه

با افزایش تقاضا در حوزه انرژی و کمبود منابع سوخت های فسیلی و همچنین توجه دولت ها به محیط زیست، توجه و سرمایه گذاری در بخش انرژی های تجدید پذیر افزایش یافته که بخش زیادی از افزایش تولید برق از طریق نیروگاه های بادی می باشد. توربین های بادی انرژی جنبشی باد را به نیروی الکتریکی تبدیل می کند (۱). مزارع بادی، مجموعه ای از توربین های بادی هستند که در یک منطقه مشخص برای تولید انرژی برق مستقر می شوند. با توجه به محدودیت های فضا در مناطق ساحلی و افزایش تقاضا برای انرژی پاک، توجه پژوهشگران و سرمایه گذاران به سمت توسعه مزارع بادی فراساحلی معطوف شده است. یکی از مزایای اصلی مزارع بادی فراساحلی، برخورداری بودن از پتانسیل باد قوی تر و پایداری نسبت به مناطق ساحلی است. این امر به دلیل عدم وجود موانع طبیعی و مصنوعی در دریا و همچنین سرعت باد بالاتر، منجر به افزایش بازدهی تولید برق می شود. علاوه بر این، مزارع بادی فراساحلی از نظر زیست محیطی مزایای قابل توجهی دارند. نصب این توربین ها در دریا، کمترین تأثیر را بر روی اکوسیستم های زمینی داشته و از نظر بصری نیز کمتر مورد انتقاد قرار می گیرد. با این حال، توسعه مزارع بادی فراساحلی با چالش هایی نیز همراه است. هزینه های ساخت و نصب توربین ها در دریا به دلیل نیاز به زیرساخت های خاص و شرایط آب و هوایی دشوار، نسبت به مزارع بادی ساحلی بیشتر است. همچنین، انتقال برق تولید شده از توربین ها به شبکه سراسری مستلزم سرمایه گذاری قابل توجهی در ساخت کابل های زیر دریایی و ایستگاه های تبدیل برق است (۳). در ارزیابی جامع منابع انرژی تجدیدپذیر، انرژی باد به واسطه مزایایی همچون کاهش آلودگی هوا، ارتقای امنیت انرژی و کاهش اثرات مخرب انتشار گازهای گلخانه ای بر تغییرات اقلیمی، به عنوان گزینه ای برتر مطرح می شود. [۲] یکی از شاخص های کلیدی در طراحی و ارزیابی مزارع بادی، میزان تولید انرژی سالانه است که به طور معمول در تمامی الگوریتم های بهینه سازی این سیستم ها لحاظ می شود. پیشتر، اهمیت این شاخص در مزارع بادی فراساحلی به طور ویژه مورد تأکید قرار گرفته است. مکانیزم تبدیل انرژی جنبشی باد به انرژی الکتریکی در توربین های بادی، منجر به کاهش سرعت و انرژی جریان باد در نواحی پایین دست می شود. این پدیده موسوم به اثر گردابه، به طور متوسط می تواند ۱۰ تا ۲۰ درصد از توان تولیدی کل مزرعه را کاهش دهد. لذا، بهینه سازی آرایش و طراحی مزارع بادی با هدف افزایش تولید انرژی سالانه، از اهمیت ویژه ای برخوردار است (۴). با توجه به مطالعات انجام شده هزینه ها در مزرعه بادی به ترکیب مزارع

بادی حساس است و معمولاً به عنوان معیار در مدل های بهینه سازی مزارع بادی دریایی استفاده می شود (۵). شکل و ابعاد پدیده بیداری در مزارع بادی تحت تأثیر متغیرهای متعددی از جمله سرعت باد، قطر روتور، زاویه حمله پره ها، پایداری جوی و فاصله بین توربین ها قرار دارد. شناخت دقیق مکانیزم های حاکم بر بیداری و توسعه مدل های پیش بینی دقیق، گامی اساسی در جهت افزایش بهره وری انرژی مزارع بادی و کاهش هزینه های تولید برق محسوب می شود. با بهره گیری از روش های تجربی و شبیه سازی های عددی پیشرفته، می توان به درک عمیق تری از این پدیده پیچیده دست یافت و راهکارهای بهینه سازی عملکرد مزارع بادی را ارائه نمود.

اهمیت بهینه سازی مزارع بادی

تفاوت عملکرد بین مزارع بادی منظم و نامنظم تا حد زیادی ناشناخته است. برای تصمیم گیری آگاهانه در مورد قرار دادن توربین در یک مزرعه بادی جدید، باید مزایا و معایب انتخاب چیدمان مزرعه بادی منظم یا نامنظم شناسایی شود. به منظور تأثیر پذیری شاخص های عملکردی بر مزارع بادی ۳ جنبه مورد بررسی قرار می گیرد:

۱. شاخص های عملکردی در مزارع بادی (تولید انرژی سالیانه، ارزش برق، نصب و راه اندازی، تعمیر و نگهداری و ...)

۲. تأثیر طرح های بهینه سازی مزرعه بادی بر شاخص های عملکرد.

۳. ذاتی بودن بی نظمی در الگوریتم های بهینه سازی و در نتیجه بعید بودن یک الگوی منظم با استفاده

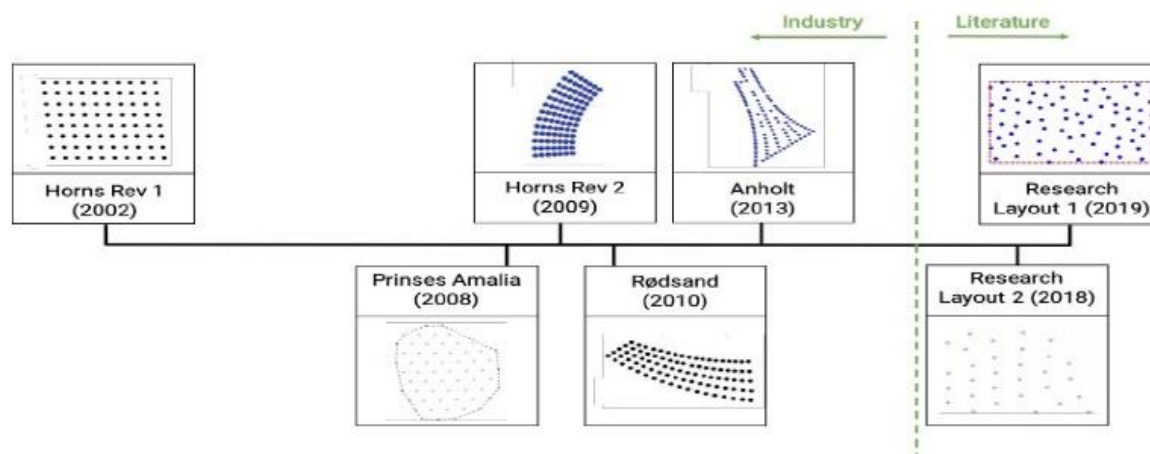
از بهینه سازی ازدحام ذرات یا الگوریتم ژنتیک
 با بررسی طرح های مزارع بادی مختلفی که در صنعت عملیاتی هستند، طیفی از الگوها را می توان مورد بررسی قرار داد. الگوها را می توان بر اساس منظم بودن آن ها تشخیص داد. الگوهای منظم به این صورت تعریف می شوند که «در یک الگوی ثابت یا معین، به ویژه با فضای یکسانی بین نمونه های منفرد، مرتب شده یا تشکیل شده اند» (۶). نمونه ای از یک الگوی کاملاً منظم می تواند مربعی با فاصله برابر بین توربین ها باشد (سمت چپ ترین مزرعه بادی در شکل ۱). الگوهای نامنظم به این صورت تعریف می شوند که از نظر شکل یا آرایش یکنواخت یا متعادل نیستند (۷). شکل ۱ طیفی از الگوهای مزارع بادی از سال ۲۰۰۲ تا سال ۲۰۱۹ را نشان می دهد؛ که در سمت چپ خط چین سبز، طرح بندی مزرعه بادی منظم عملیاتی در

به هم می‌باشد که اجتناب ناپذیر است. به عنوان مثال، بیمه هم در تولید و خرید و هم در نصب و راه اندازی گنجانده شده است. در این مورد، شاخص‌های عملکرد اصلی بر اساس تأثیر آن بر مرتبط ترین شاخص‌های فرعی تجزیه و تحلیل می‌شود. توربین بادی از اجزای مختلفی تشکیل می‌شود. از جمله ترانسفورماتور، کابل، جعبه دنده و برای مثال، تنها هزینه دو جزء محرک، تیغه‌های برج و روتور در نظر گرفته شده که اینها به ترتیب ۲۹,۴٪ و ۹,۲۴٪ از هزینه توربین را تشکیل می‌دهد (۱۴). شکل ۳ نمودار دایره ای تفکیک هزینه اجزای توربین بادی را نشان می‌دهد. برج و پره‌های توربین بیشترین سهم را در هزینه کل توربین بادی دارند.

صنعت به تصویر کشیده شده است، و سمت راست خط چین سبز طرح‌بندی‌های بهینه شده از مطالعات مقالات نشان داده شده است.

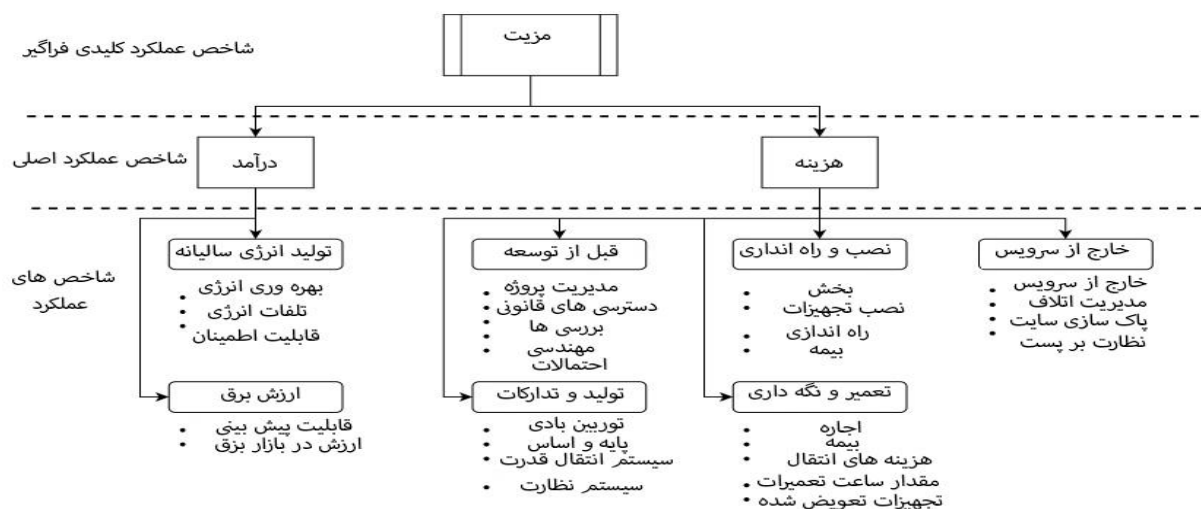
همانطور که شکل ۲ تفکیک شاخص‌های عملکرد در مزارع بادی را نشان می‌دهد می‌توان برای مطالعه و ساختار تجزیه هزینه استفاده کرد. درخت شاخص‌های عملکرد از چهار سطح مختلف تشکیل شده است: شاخص عملکرد کلیدی فراگیر، شاخص‌های عملکرد اصلی، شاخص‌های عملکرد و شاخص‌های فرعی عملکرد. همه اجزای فرعی ورودی سطح بالاتر را در بر می‌گیرد.

در یک سیستم پیچیده مانند یک مزرعه بادی فراساحلی برخی از شاخص‌های عملکرد فرعی و شاخص‌های عملکرد بسیار شبیه



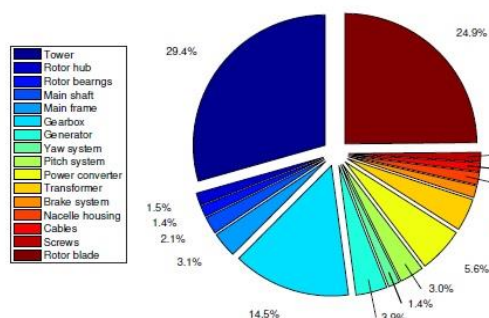
شکل ۱- طیفی از الگوهای مزارع بادی (۸,۹,۱۰,۱۱).

Figure1- A variety of wind farm layouts (8,9,10,11).



شکل ۲ - تفکیک شاخص‌های عملکرد در مزارع بادی.

Figure2- Breaking Down Performance Metrics in Wind Farms.



شکل ۳ - تفکیک هزینه اجزای توربین بادی
Figure3 - Cost segregation of wind turbine components

غیره که در این تحقیق نیز مورد استفاده قرار گرفته است. طرح منظم (الف) و نامنظم (ب) متشکل از ۷۴ توربین با توان نامی ۱۰ مگاوات در مزرعه بادی برد خون در شکل ۵ نشان داده شده است.

برای به دست آوردن یک مقدار تقریبی برای اندازه گیری بی نظمی، فاصله تعدادی از توربین ها با توربین های اطراف برای هر توربین در مزارع بادی محاسبه می گردد. تعداد زیادی توربین های با مقدار فاصله نامشخص، نشان دهنده الگوی نامنظم توربین بادی است. انتظار می رود که توربین های تعبیه شده در مزرعه بادی منظم، فاصله یکسانی از توربین های اطراف داشته باشند.

با در نظر گرفتن طرح های منظم و نامنظم مزرعه بادی برد خون (شکل ۵)، تحلیل دقیق تر نشان می دهد که در آرایش الف، فاصله بین توربین ها به طور متوسط ۱۰ برابر قطر روتور (10RD) در نظر گرفته شده که مطابق با دستورالعمل سازنده است. در مقابل، آرایش ب فاصله کمتری بین توربین ها را نشان می دهد.

مشخصات توربین بادی

بهینه سازی انجام شده بر اساس توربین بادی مرجع ۳۷ IEA Wind Task با توان نامی ۱۰ مگاوات (۱۳) است. مشخصات توربین در جدول ۱ ارائه شده است.

تجزیه و تحلیل داده ها

عملکرد توان

این گروه شاخص های فرعی شامل شاخص های زیر عملکرد زیر است: بازده انرژی و قابلیت پیش بینی پذیری. نمایش شماتیک طرح، تولید نیرو و رابطه هزینه و سود در شکل ۶ نشان داده شده است. با توجه به شکل ۶ و بررسی شاخص های بیان شده می توان حالت های مختلف توان تولیدی و بازدهی انرژی را بررسی کرد.

مشخصات باد منطقه

داده های هواشناسی و مجموعه داده ها شامل میانگین سرعت باد ساعتی در ارتفاع ۱۰۰ متر و جهت باد متناظر بر حسب درجه از سایت مرجع globalwindatlas بدست آمده است. اندازه گیری ها از سال ۱۹۷۹ تا ۲۰۲۲، منطقه اندازه گیری طول جغرافیای 27.851522° و عرض جغرافیای 51.567421° را پوشش می دهد. زمانی که یک دوره اندازه گیری حداقل شش ماهه در دسترس باشد و توزیع جهت باد کوتاه مدت و بلند مدت مشابه باشد، می توان فرض کرد که اندازه گیری ها شرایط تلاطم طولانی مدت را نشان دهد (۱۵).

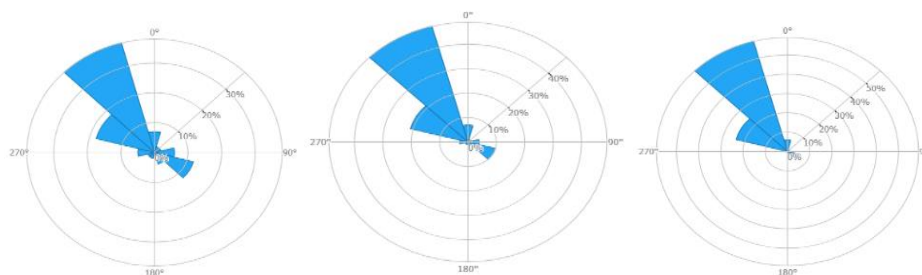
سپس برای تجزیه و تحلیل بیشتر داده های باد، گلباد^۱ را در ارتفاع و منطقه مورد نظر به دست آورد. برای این منظور توزیع جهت باد به ۱۲ بخش که هر کدام ۳۰ درجه است تقسیم می شود. برای هر بخش جهت باد، احتمال وقوع جهت باد، توزیع ویبول و میانگین سرعت باد محاسبه می شود. تجسم این گل رز باد در شکل ۴ نشان داده شده است، جایی که سرعت باد در پخش جهت باد به پنج بخش سرعت باد تقسیم شده که هر بخش نشان دهنده مقدار سرعت باد در جهت مشخص شده از کل داده های سرعت باد می باشد.

به وضوح می توان مشاهده کرد که باد غالب از جهت شمال شرقی است. میانگین سرعت باد در همه جهات ۷،۵۳ متر بر ثانیه است.

مشخصات مکان مورد مطالعه

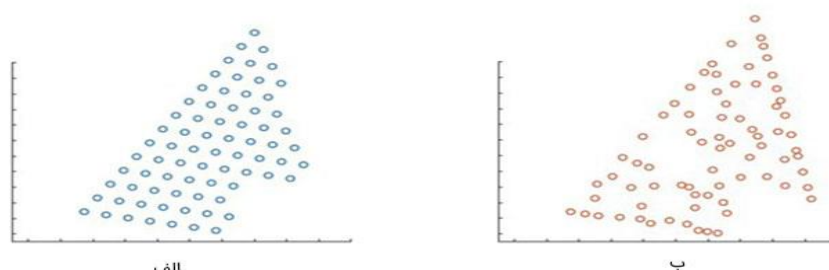
به دلیل عدم وجود سایت مزرعه بادی دریایی در منطقه، به صورت مجازی یک سایت در سواحل دهستان برد خون در استان بوشهر شامل ۷۴ توربین طراحی شد. با توجه به داده های در دسترس مانند داده های بادی، شرایط خاک، عمق آب و

^۱ نمودار ستاره گونه نمایش فراوانی نسبی سمت های باد و گاهی سرعت باد در یک ایستگاه برای دوره زمانی معین را گلباد می گویند



شکل ۴ - از راست به چپ به ترتیب فرکانس باد - سرعت باد - توان باد.

Figure 4- Wind frequency, wind speed, and wind power, from right to left respectively.



شکل ۵ - طرح منظم (الف) و نامنظم (ب) متشکل از ۷۴ توربین با توان نامی ۱۰ مگاوات در مزرعه بادی برد خون.

Figure 5- Regular (a) and irregular (b) layouts consisting of 74 turbines, each with a nominal capacity of 10 MW, at the Bord Khoun wind farm.

جدول ۱ - پارامترهای کلیدی توربین بادی مرجع ۱۰ مگاواتی IEA WIND TASK 37

Table 1- Key Parameters of the IEA Wind Task 37 10 MW Reference Wind Turbine

Parameter	10 MW turbine	unit
Wind regime	IEC ¹ class IA	[-]
Rate power	10	[MW]
Rate wind speed	11.4	[m/s]
Rotor diameter	190.8	[m]
Hub height	119	[m]
Cut in wind speed	4	[m/s]
Cut out wind speed	25	[m/s]



شکل ۶ - نمایش شماتیک طرح، تولید نیرو و رابطه هزینه و سود.

Figure 6- Schematic representation of layout, power production, and cost & profit relation.

بررسی تولید انرژی سالانه باید تاثیر شاخصهای عملکرد در طراحی مزارع بادی منظم و نامنظم تعیین شود. تولید انرژی

تولید سالانه انرژی

تمرکز اکثر الگوریتمهای بهینه سازی در طراحی مزرعه بادی بر حداکثر رساندن بازده انرژی می باشد (۹،۱۳،۱۷،۱۸) برای

¹ International Electrotechnical Commission

U نشان دهنده سرعت باد عملیاتی، و θ نشان دهنده جهت های سرعت باد است.

تجزیه و تحلیل سالانه تولید انرژی در سایت برد خون

برای طراحی مزارع بادی، در این مقاله از نرم افزار Wind PRO استفاده شده است. با استفاده از مدل PARK در نرم افزار Wind PRO می توان مجموع تولید انرژی سالیانه در چیدمان های منظم و نامنظم برای تمام ۷۴ توربین استفاده شده را محاسبه کرد. هر دو طرح مزرعه بادی دقیقاً تحت پارامترهای ورودی مشابهی قرار دارند. نتیجه مدل PARK در جدول ۲ نشان داده شده است.

سالیانه تخمینی از تولید انرژی یک مزرعه بادی در طول یک دوره یک ساله است. با فرض در دسترس بودن ۱۰۰ درصد توربین ها تولید سالیانه انرژی با معادله ۱ محاسبه می شود. (۱۹)

$$AEP = T \int_0^{2\pi} \int_{u_{cut-in}}^{u_{cut-out}} p(u) f(u, \theta) d\theta du \quad (\text{معادله 1})$$

تولید انرژی سالانه اغلب بر حسب مگاوات ساعت اندازه گیری می شود. تولید انرژی سالانه را زمانی می توان به دست آورد که منحنی توان و فرکانس توزیع سرعت باد برای یک مکان خاص مشخص باشد. در معادله ۱، T تعداد ساعت ها در سال، p منحنی توان توربین بادی خاص، f توزیع فرکانس سرعت باد،

جدول ۲ - سرانه تولید انرژی با چیدمان منظم و نامنظم

Table2- Per capita energy production with regular and irregular arrange

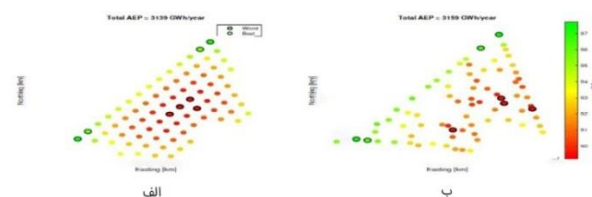
	تولید انرژی سالانه [GWh/y]	کاهش اثر گردابه [%]
طراحی منظم	۳۱۳۸,۷	۸,۱
طراحی نامنظم	۳۱۵۹,۵	۷,۵
اختلاف	+ ۰,۶۶ %	- ۰,۶ %

می دهند. این کاهش عملکرد ناشی از عوامل متعددی از جمله کاهش سرعت باد مؤثر، افزایش نیروهای آیرودینامیکی ناپایدار و افزایش خستگی سازه است. در نتیجه، افزایش تولید انرژی سالانه کل مزرعه بادی را نمی توان صرفاً با بهبود عملکرد توربین های واقع در مناطق با پتانسیل باد پایین (نقاط پرت) به دست آورد. بلکه برای افزایش قابل توجه تولید انرژی، بهینه سازی کلی چیدمان توربین ها، طراحی تیغه ها با عملکرد بهتر در شرایط بادی نامنظم و همچنین استفاده از سیستم های کنترل پیشرفته جهت کاهش اثرات منفی پدیده های بادی نامطلوب ضروری است. موقعیت توربین ها در مزرعه بادی بر اساس عملکرد آنها در شکل ۷ مشخص شده است. چهار توربین با بهترین و بدترین عملکرد به ترتیب، با خطوط سبز تیره و سیاه نشان داده شده اند. تفاوت واضحی در توزیع عملکرد بین مزرعه بادی منظم و نامنظم مشاهده می شود.

تولید انرژی سالانه مزرعه بادی نامنظم (۰,۶۶٪) از تولید انرژی سالانه مزرعه بادی منظم بالاتر است. این تفاوت ۲۰,۸ گیگاوات ساعت در سال است. مزرعه بادی معمولی ۹۴ درصد توان بالقوه خود را تولید می کند و مزرعه بادی نامنظم ۹۴,۵ درصد از این توان را تولید می کند. این در راستای هدف افزایش تولید توان با کاهش تلفات توان ناشی از اثرات گردابه است.

عملکرد تولید سالیانه انرژی توربین ها به صورت جداگانه

برای بررسی منبع تفاوت ذکر شده در بازده انرژی بین دو مزرعه بادی مورد نظر، رفتار هر یک از توربین ها مورد بررسی قرار گرفته است. بازده انرژی توربین به موقعیت آن در مزرعه بادی بستگی دارد. در مزارع بادی نامنظم، توربین هایی که در مناطق با پتانسیل باد کمتر یا تحت تأثیر شدید پدیده های بادی نامطلوب مانند گردایان باد و گردابه های بیداری قرار دارند، معمولاً عملکرد کمتری نسبت به سایر توربین ها از خود نشان



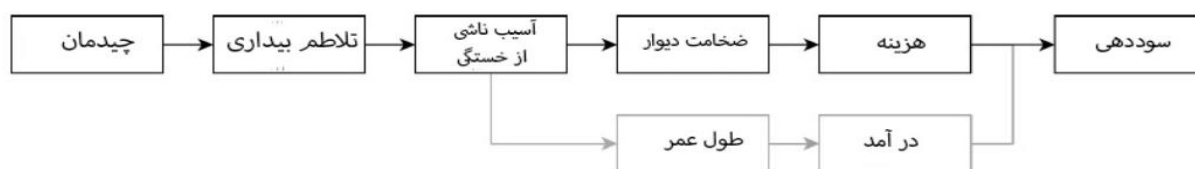
شکل ۷ - توربین ها در مزرعه بادی منظم (الف) و نامنظم (ب) بر اساس عملکرد شان از قرمز تا سبز.

Figure7- Wind turbines in a regular (a) and irregular (b) wind farm, with their performance indicated by a color scale from red to green.

سرعت مربوطه به توان نامی باشد، به این معنی است که تلفات گردابه در اینجا نقش بسزایی دارد. برای سرعت بادهای بالاتر اثر تلفات گردابه کاهش می‌یابد یا حتی به طور کامل ناپدید می‌شود. بنابراین تفاوت بین طرح مزرعه بادی منظم و نامنظم در این محدوده سرعت باد به طور قابل ملاحظه ای کاهش می‌یابد و یا حتی به صفر می‌رسد. بر اساس تجزیه و تحلیل و مفروضات در این بخش، چیدمان نامنظم مزرعه بادی برای هر دو شاخص زیر عملکرد تحلیل شده بهتر عمل می‌کند.

خستگی برج ناشی از اثر گردابه

این گروه از شاخص‌های عملکرد شامل شاخص‌های زیر عملکرد زیر است: توربین بادی و جایگزینی قطعات. موقعیت توربین‌های بادی در داخل یک مزرعه بادی و داده‌های باد منطقه نشان دهنده میزان اثرات گردابی است که توربین‌های پایین دست تجربه خواهند کرد. به خصوص در شرایط فراساحلی، این اثرات گردابه باعث بارگذاری خستگی توربین بادی می‌شود. با ناهمواری کم زمین و شدت آشفتنگی محیطی کم، اثرات این امواج بیشتر از مزارع بادی خشکی است. مطالعات متعدد انجام شده تأیید می‌کند که یکی از پارامترهای اساسی که ضخامت دیوار طراحی برج را تعیین می‌کند، خستگی است (۲۰، ۲۲). شماتیکی از چیدمان، بارهای خستگی و هزینه مواد اضافه شده در شکل ۸ در زیر ارائه شده است.



شکل ۸ - نمای کلی شماتیک از چیدمان، بارهای خستگی و هزینه مواد اضافه شده.

Figure8- Schematic overview of the layout, fatigue loads, and added material cost.

شرکت‌های طراحی و تولید توربین بادی و شرکت‌های توسعه دهنده مزرعه بادی علاقه‌مند به در نظر گرفتن هر دو هدف هستند. توربین‌های بادی دریایی اغلب برای طول عمر ۲۵ سال طراحی می‌شوند. طول عمر یک توربین توسط عوامل متعددی از جمله قابلیت اطمینان و خرابی تعیین می‌شود. اجزای متحرک که در معرض باد با سرعت بیشتر قرار دارند نسبت به اجزای محافظ فرسوده تر می‌شوند (۲۲).

نداشتن همپوشانی در فرکانس طبیعی برج با فرکانس‌های P1 (چرخش روتور) و P3 (عبور تیغه) یکی از مهمترین عوامل در طراحی برج توربین‌های بادی می‌باشد. زیرا تحریک در این

نتایج شبیه‌سازی حاکی از افزایش تقریبی ۰.۶۶ درصدی تولید سالانه انرژی در طرح مزرعه بادی نامنظم نسبت به طرح منظم است. تحلیل عملکرد هر توربین نشان می‌دهد که وجود نقاط پرت (توربین‌هایی با عملکرد به مراتب بهتر یا بدتر از میانگین) در هر دو طرح اجتناب‌ناپذیر است. با این حال، توزیع مکانی توربین‌های با عملکرد پایین‌تر در طرح منظم، الگوی مشخص‌تری را نشان می‌دهد که حاکی از تأثیرگذاری بیشتر چیدمان منظم بر کاهش عملکرد این دسته از توربین‌ها است.

پیش‌بینی تغییر جهت باد برای هر مزارع بادی منظم و نامنظم منجر به تفاوت در تولید توان می‌شود. ردیف‌های توربین‌ها در مزارع بادی با چیدمان منظم برای زاویه ای که افت توان در آن رخ می‌دهد، تعداد بیشتری از توربین‌ها با افت توان بیشتر مواجه می‌شوند. این اثر ممکن است به دلیل اثرات آرایه عمیق حتی خیلی بدتر شود. انتظار می‌رود که طرح مزرعه بادی با پایداری بیشتر نسبت به جهت باد منجر به کاهش خطاهای پیش‌بینی شده شود. این احتمالاً منجر به کاهش هزینه‌های عدم تعادل خواهد شد. با برآورد تقریبی بر اساس داده‌های هزینه عدم تعادل می‌توان نتیجه گرفت که هزینه عدم تعادل تقریباً ۱.۶٪ از درآمد تولید سالیانه انرژی است.

لازم به ذکر است که تحلیل پایداری در جهت باد با استفاده از میانگین سرعت ثابت باد که ۷.۵۳ متر بر ثانیه است. این ساده سازی احتمالاً افت توان را به عنوان تابعی از جهت باد بیش از حد برآورده می‌کند، زیرا تغییر وابسته به زمان تلفات اثر گردابه در مزرعه بادی در نظر گرفته نمی‌شود. اگر سرعت باد کمتر از

طرح مزرعه بادی با موقعیت و چیدمان توربین‌ها در یک مزرعه بادی شروع می‌شود و در ادامه می‌توان میزان تأثیرات اثر گردابه در توربین‌های پایین دست را تعیین کرد. شدت تغییرات بیشتر در آشفتنگی باعث افزایش بار خستگی بر روی سازه‌های توربین بادی می‌شود. افزایش بار خستگی به نوبه خود باعث آسیب خستگی بیشتر می‌شود. در نتیجه دو احتمال وجود دارد:

- طراحی برای طول عمر مشخص با هدف حداقل مصرف مواد
- طراحی برای بارهای خستگی مورد انتظار با هدف به حداکثر رساندن طول عمر توربین

است. ضخامت دیوار جدید با استفاده از معادله ۴ تعیین می شود (۲۹).

$$t_{new} = t_{old} \left(\frac{I_{eff}}{I_a} \right) \quad (\text{معادله 4})$$

T_{NEW} ضخامت دیواره بعد از افزایش ، T_{OLD} ضخامت دیواره اولیه و I_a شدت آشفستگی محیط است.

خستگی اضافه شده در برج برد خون

برای محاسبه معادله ۲، میانگین سرعت باد در ارتفاع هاب، تعداد توربین های اطراف، انحراف استاندارد محیط، نمایی و هلمر، و انحراف استاندارد ترکیبی آشفستگی گردابه و محیطی باید تعیین شود. از داده های اندازه گیری ساعتی موجود برای سایت بردخون، این مقادیر محاسبه و برآورد می شوند.

سپس، شدت آشفستگی محیطی باید از اندازه گیری میانگین سرعت باد در سایت بردخون تعیین شود. هنگامی که انحراف استاندارد تعیین شد، شدت آشفستگی را می توان به راحتی با استفاده از میانگین سرعت باد به دست آمده از داده های باد بردخون بدست آورد. برای به دست آوردن انحراف معیار، از معادله ۵ استفاده گردید .

$$\sigma_a = 0,03 \bar{U}_a + 0,455 \quad (\text{معادله 5})$$

σ_a انحراف معیار و $\bar{U}_a$ سرعت باد محیطی است. این منجر به یک شدت آشفستگی متوسط همه جهته تقریباً ۸,۱۴٪ می باشد که با مقادیر به دست آمده با شرایط باد و منطقه مطابقت دارد (سایت مرجع globalwindatlas). برای هر توربین و فاصله توربین های اطراف تا توربین مورد نظر، که در کدام بخش جهت باد قرار گرفته اند، میانگین سرعت باد و شدت آشفستگی مربوط به آن بخش جهت باد تعیین می شود (۳۰).

آسیب های اثر گردابه

برای برج های توربین بادی که معمولاً از فولاد جوش داده شده ساخته می شوند، توان و هلمر برابر با ۴ انتخاب می شود (۲۴). ضریب رانش توربین بادی توسط آژانس بین المللی انرژی برای هر بخش جهت باد تعیین می گردد . با استفاده از این پارامترهای ورودی (سرعت باد ، شرایط جغرافیایی و ..) و قطر روتور ۱۹۰,۸ متر، اختلاف بین آشفستگی موثر و محیطی که در شکل ۹ ارائه شده است محاسبه می شود.

فرکانس ها ممکن است منجر به تشدید شود که باعث به وجود آمدن بارهای دامنه بزرگ و در نتیجه افزایش آسیب خستگی می شود.

آشفستگی موثر

شدت آشفستگی موثر در مزارع بادی به میزان نوسانات سرعت باد نسبت به سرعت متوسط باد در یک نقطه مشخص گفته می شود. به عبارت دیگر، شدت آشفستگی نشان می دهد که سرعت باد تا چه اندازه به طور مداوم در حال تغییر است. شدت آشفستگی موثر نباید به عنوان یک نمایش فیزیکی از اثر آشفستگی در نظر گرفته شود، بلکه باید به عنوان روشی برای به دست آوردن بار خستگی مشابه در شرایط جریان واقعی در نظر گرفته شود. محاسبات برای ارتفاع هاب و میانگین سرعت باد از جهت باد غالب از مجموعه داده های انتخاب شده انجام می شود. سپس آشفستگی موثر را می توان با استفاده از معادله ۲ (۲۱) محاسبه کرد.

$$I_{eff}(\bar{U}_a) = \left(\int_0^{2\pi} (p(\theta/\bar{U}_a) I^m(\theta/\bar{U}_a)) d\theta \right)^{\frac{1}{m}} \quad (\text{معادله 2})$$

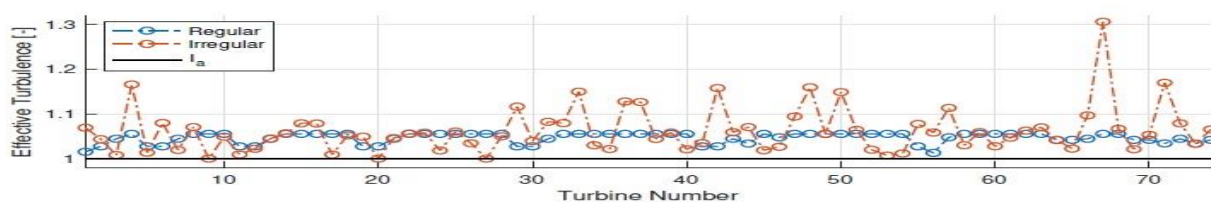
p احتمال وقوع یک جهت باد معین در ارتفاع هاب، θ جهت باد، $\bar{U}_a$ میانگین سرعت باد در ارتفاع هاب است. I شدت آشفستگی است که از شدت آشفستگی محیط و شدت آشفستگی اضافه شده تشکیل شده است. m نمایی و هلمر است.

ارتباط ضخامت دیوار برج با آشفستگی موثر

شدت آشفستگی بالا باعث افزایش تنش های ناشی از خستگی در اجزای توربین شده و عمر مفید آن ها را کاهش می دهد. در مدل فراندسن به طور ضمنی فرض می شود که محدوده بارهای ساختاری به صورت خطی با شدت آشفستگی تغییر می کند.

$$\sigma_{DEL} \propto \frac{M_{YT,DEL}}{t} \quad (\text{معادله 3})$$

$M_{YT,DEL}$ لنگر خمشی جلو و عقب پایین برج، t ضخامت، و σ_{DEL} تنش معادل آسیب است. برای حفظ تنش معادل آسیب یکسان، ضخامت دیوار برج باید متناسب با بار افزایش یابد. استفاده از بار معادل آسیب راحت است زیرا این نشان دهنده مصرف مواد اضافی در صورت حفظ هندسه بیرونی یکسان



شکل ۹ - کسر آشفتگی موثر تقسیم بر آشفتگی محیط (I_a) برای هر توربین در طرح مزرعه بادی منظم (آبی) و نامنظم (قرمز) ناشی از تلاطم گردابه اضافه شده با استفاده از فراندسن [۱۸].

Figure 9- Fraction of effective turbulence divided by the ambient turbulence (I_a) for each turbine in the regular (blue) and irregular (red) wind farm layout due to wake added turbulence using Frandsen

• کابل کشی بین آرایه ای که WTG ها را به پست دریایی متصل می کند.

• پست دریایی شامل ترانسفورماتورهای قدرت برای افزایش ولتاژ از ۶۶ کیلو ولت به ۱۳۲-۲۲۰ کیلو ولت.

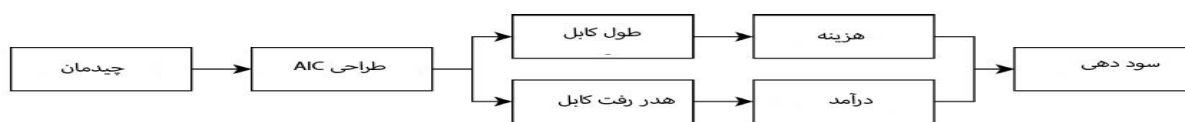
• خطوط انتقال که برق ولتاژ بالا را به یک اتصال ساحلی به شبکه منتقل می کند.

در این تحقیق تنها تفاوت هزینه ها و تلفات کابل کشی بین آرایه ای در نظر گرفته شده است. هدف کمی کردن رابطه بین چیدمان توربین ها، سیستم کابل کشی بین آرایه ای الکتریکی و هزینه و درآمد مزرعه بادی است. رابطه بین موقعیت یابی توربین بادی، طراحی کابل بین آرایه ای الکتریکی صورت شماتیک در شکل ۱۰ نشان داده شده است.

سیستم کابل کشی الکتریکی بین آرایه ای

این گروه از شاخص های عملکرد شامل شاخص های عملکرد زیر است: تلفات الکتریکی و سیستم انتقال نیرو. هزینه زیرساخت های الکتریکی می تواند تا ۱۵٪ از کل هزینه های سرمایه ای یک مزرعه بادی را تشکیل دهد. شبکه جمع آوری به عنوان شبکه برقی تعریف می شود که توربین ها در مزرعه بادی را به پست یا پست ها متصل می کند. زیرساخت های الکتریکی مزارع بادی فراساحلی شامل موارد زیر است:

• ترانسفورماتور ولتاژ پایین (WTG Wind Turbine Generator) را به ولتاژ بالا (۶۶ کیلو ولت) تبدیل می کند تا عواقب خرابی تجهیزات را به حداقل برساند (۲۸)



شکل ۱۰- نمایش شماتیک رابطه بین موقعیت یابی توربین بادی، طراحی کابل بین آرایه ای الکتریکی و سود یک مزرعه بادی فراساحلی

Figure 10- A Schematic Representation of the Relationship Between Wind Turbine Positioning, Electrical Inter-array Cable Design, and Profitability of an Offshore Wind Farm.

در هر نوع کابل متفاوت است. در این تحقیق از تعداد محدودی از انواع کابل های معرف استفاده شده است. هزینه انرژی را می توان با استفاده از ولتاژهای درون آرایه بالاتر تا ۱۵٪ کاهش داد. کابل های ۶۶ کیلو ولت به راحتی در دسترس هستند و برای این طرح کابل کشی بین آرایه ای انتخاب شده اند. از جمله مزایای استفاده از کابل های ۶۶ کیلو ولت به جای کابل های ۳۳ کیلو ولت تعداد بیشتر توربین ها در هر رشته از کابل ها می باشد که منجر به کاهش تلفات سیستم و در نتیجه طول کلی کابل را می توان کاهش داد. در جدول ۳ مشخصات کابل های انتخاب شده ذکر شده است.

هدف از طراحی مسیریابی کابل بین آرایه ای به حداقل رساندن هزینه اولیه کابل و نصب و همچنین کاهش درآمد ناشی از تلفات برق می باشد.

تعدادی از محدودیت های طراحی مسیریابی کابل ها عبارتند از: ممکن است موانعی در مزرعه بادی وجود داشته باشد که باعث ایجاد محدودیت می شود. که این به دلیل ماهیت خاص سایت در این تحلیل اولیه در نظر گرفته نشده است. جریان انرژی در هر اتصال وابسته به ظرفیت کابل های نصب شده است (۲۶). انواع کابل های در دسترس که ظرفیت ها، مقاومت الکتریکی و هزینه

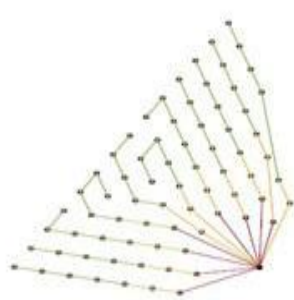
جدول ۳ - انواع کابل انتخابی با مشخصات مربوط برای مطالعه موردی سایت بردخون

Table 3- Selected cable types with their corresponding specifications for the case study Bordkhu

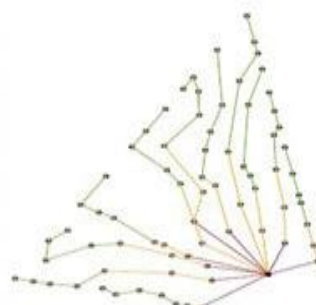
	تعداد توربین	عملکرد فازی ولتاژ [kv]	مقاومت رسانا [Ω/km]	توان [A]	مدل [mm^2]
کابل ۱	۴	۶۶	۰,۱۰۱	۴۲۴	۴۰۰
کابل ۲	۶	۶۶	۰,۰۶۳	۵۸۴	۶۳۰
کابل ۳	۷	۶۶	۰,۰۳۷	۷۵۰	۸۰۰

شده اند که هر کدام یک فاز را حمل می کنند. مزیت این نوع کابل در مقابل کابل های تک هسته ای این است که فازها کوپلینگ مغناطیسی ندارند که منجر به یک سیستم متعادل می شود. علاوه بر این، کابل سه هسته ای ارزان تر است زیرا می توان آن را در یک جا نصب کرد، برخلاف روش جداگانه ای که برای گذاشتن کابل های تک هسته ای استفاده می شود. یک طرح اولیه برای چیدمان منظم و نامنظم از سایت بردخون در شکل ۱۱ مشاهده می شود.

متداول ترین نوع کابل ها در صنعت بادی دریایی، کابل های زیر دریایی عایق شده با پلی اتیلن متقاطع هستند که با محیط زیست سازگار و قابل اعتماد هستند و طبق گفته اندگنانو و همکارانش تلفات الکتریکی کمی دارند. (۲۲). هر دو هادی آلومینیومی و مسی در صنعت در دسترس هستند. هادی های آلومینیومی ظرفیت حمل جریان کمتری دارند که منجر به قطرهای بزرگتر می شود (۸۹). برای این طرح، کابل های سه هسته ای انتخاب شده اند، در اینجا سه هسته با هم ترکیب



الف: چیدمان منظم با ۱۱ آرایه



ب: چیدمان نامنظم با ۱۱ آرایه

شکل ۱۱ - طراحی اولیه کابل بین آرایه ای الکتریکی برای طرح منظم (الف) و نامنظم (ب) سایت بردخون با استفاده از کابل های ، ۶۳۰ و ۸۰۰ میلی متر، ۶۶ کیلوولت، ۳ فاز متناوب.

Figure 11- Preliminary electrical inter-array cable design for Bordkhu regular and irregular case study using 400, 630, and 800 mm^2 , 66 kV, 3-phase AC cables.

جدول ۴ - طول حاصل به ازای هر نوع کابل با استفاده از کابل های $400, 630, 800 \text{ mm}^2$ طرح بندی منظم و نامنظم، و تفاوت مقایسه چیدمان نامنظم با طرح بندی منظم

Table 4 Resulting length per cable type using 400, 630, and 800 mm^2 cables regular and irregular layout, and the difference comparing the irregular layout to the regular layout

	طول [km]	
	منظم	نامنظم
کابل ۱	۷۴,۷۶	۷۸,۲۶
کابل ۲	۴۵,۲۴	۵۴,۱۷
کابل ۳	۲۸,۱۷	۱۸,۹۸
مجموع	۱۴۸,۱۷	۱۵۱,۴۲
اختلاف	+ ٪۲,۱۹	

با بررسی طول کابل‌ها در هر دو طرح منظم و نامنظم مشاهده می‌شود که طول کابل در اتصالات داخلی چیدمان منظم کمتر از چیدمان نامنظم است. با این حال، اندازه متوسط کابل‌ها در شبکه نامنظم در مقایسه با شبکه منظم به دلیل طول کمتر استفاده از کابل ۳ کوچکتر است. از آنجایی که این کابل گران تر است، کل هزینه سرمایه گذاری در سیستم کابل کشی آرایه الکتریکی در شبکه نامنظم منجر به عملکرد بهتر شود. در ارزیابی تفاوت هزینه و درآمد برای هر دو سیستم کابل کشی بین آرایه ای طرح منظم و نامنظم بررسی شده است. ابتدا، مؤلفه هزینه ارزیابی شده و طول کابل را با سرمایه‌گذاری اولیه و هزینه کابل بین‌آرایه دریایی مرتبط می‌کند. سپس، تأثیر بر

درآمد با توجه به تلفاتی که کابل‌ها در واحد طول ایجاد می‌کنند، ارزیابی می‌شود. هزینه سرمایه گذاری اولیه هر دو طرح منظم و نامنظم بر اساس طول کابل‌ها در جدول ۵ مشخص گردیده است. همانطور که قبلاً مشخص شد، طول کل طرح نامنظم بزرگتر از طرح منظم است. با این حال، به دلیل تفاوت در طول نوع کابل، این به معنای ارزان تر بودن سیستم کابل کشی بین آرایه‌ای نیست. بنابراین، برآورد هزینه در این بخش انجام شده و هزینه کابل در طرح منظم کمی بیشتر از طرح نامنظم است. هزینه شاخص در هر متر برای کابل‌های بین آرایه ای دریایی در جدول ۵ ارائه شده است.

جدول ۵ - برآوردهای حاصل از هزینه مستقیم کابل بین آرایه ای دریایی و تلفات بار کامل تقریبی طراحی کابل بین آرایه ای برای سایت بردخون معمولی و نامنظم.

Table 5- Resulting estimates of the direct offshore inter-array cable cost and approximate full load losses of the inter-array cable design for the regular and irregular Bordkhun

	هزینه [10 ⁶ €]		مجموع بار هدر رفته [MW]	
	منظم	نامنظم	منظم	نامنظم
کابل ۱	۱۱,۳۶	۱۱,۹۰	۵,۷۵	۶,۰۱
کابل ۲	۷,۴۲	۸,۸۸	۴,۱۵	۴,۹۷
کابل ۳	۷,۰۴	۴,۷۵	۲,۸۱	۱,۹۰
مجموع	۲۵,۸۳	۲۵,۵۳	۱۲,۷۰	۱۲,۸۷
اختلاف	- ۱,۱۶ %		+ ۱,۳۵ %	

تلفات در واحد متر را می‌توان با استفاده از مقاومت هادی تعیین کرد. سپس تلفات بر حسب مگاوات را می‌توان با استفاده از طول‌های محاسبه شده محاسبه کرد. که این تلفات در دو ستون سمت راست جدول ۵ مشاهده می‌شود. تفاوت نسبتاً کمی بین ضررها دیده می‌شود، همانطور که در مورد هزینه سرمایه‌گذاری اولیه طراحی برای هر دو طرح‌بندی نیز وجود داشت.

نتایج

شدت آشفته‌گی موثر با استفاده از مدل فراندسن معادل سازی شده است. شدت آشفته‌گی موثر توسط فاصله بین توربین‌ها از تعداد توربین‌ها در شعاع فاصله ۱۰RD تعیین می‌شود. مزرعه بادی نامنظم ۲۳,۸ درصد آشفته‌گی موثر بیشتری نسبت به مزرعه بادی منظم دارد. ضخامت دیوار برج به صورت خطی با افزایش بار معادل آسیب افزایش می‌یابد که از این افزایش آشفته‌گی مؤثر ناشی می‌شود.

انتظار می‌رود تغییر ضخامت دیواره برج به دلیل افزایش آشفته‌گی موثر، هزینه برج توربین را در مزرعه بادی نامنظم با

حدود ۲ درصد در مقایسه با مزرعه بادی منظم افزایش دهد. بنابراین، شاخص‌های زیر عملکرد توربین بادی (برج) و هزینه تعویض قطعات در مزرعه بادی منظم بهتر عمل می‌کنند. یعنی با فرض اینکه طرح یک برج بر اساس بدترین حالت خستگی در مزرعه بادی برای همه برج‌ها اعمال شود. با این حال می‌توان استفاده از طرح‌های چند برج را در یک مزرعه بادی نیز در نظر گرفت، این امر به طور قابل توجهی هزینه کل برج را در مزرعه بادی کاهش می‌دهد.

لازم به ذکر است که آسیب خستگی اضافه شده با استفاده از یک مدل با دقت کم برای ایجاد یک تخمین اولیه به جای توسعه یک تحلیل خستگی دقیق محاسبه می‌شود. مدل فراندسن برای برآورد بیش از حد شدت آشفته‌گی موثر شناخته شده است. همچنین، برای بررسی بارهای خستگی ترکیب هر دو اثر ناشی از موج و گردابه باید هنگام تعیین ضخامت واقعی دیوار برج در نظر گرفته شود. بنابراین انتظار می‌رود افزایش نسبی هزینه برج بر اساس برآورد بیش از حد مدل فراندسن

بادی ذاتی می باشد. سه شاخص عملکرد انتخاب شده تا الگوهای منظم و نامنظم با یکدیگر مقایسه شوند (۱) توان تولید شده (۲) خستگی برج ناشی از اثر گردابه (۳) سیستم کابل کشی بین آرایه ای. تعیین شاخص های عملکرد ذکر شده، امکان پذیر، مستقل از سایت و فنی هستند که توسط یک تحلیل تصمیم گیری چند معیاره شناسایی می شود.

مطابق با انتظارات، مزرعه بادی نامنظم در تولید انرژی با کاهش تلفات عملکرد کلی بهتری دارد. این افزایش در تولید انرژی سالانه از ۰.۶۶٪ در مطالعه موردی تا ۱.۰۴٪ در طرح MDAO دارد. همچنین یک یافته قابل توجه این است که در چیدمان های نامنظم پایداری در جهت باد را افزایش می دهد، به این معنی که توان خروجی نسبت به نوسانات جهت باد حساسیت کمتری خواهد داشت. در مطالعه موردی مزرعه بادی منظم افت توان برای تغییر محدود جهت باد را تا ۶۶.۶٪ نشان می دهد، در حالی که طرح نامنظم و در شرایط مشابه افت توان ۱۸.۸٪ را نشان می دهد. این مشخصه قابلیت پیش بینی توان خروجی را بهبود می بخشد و مقدار توان را افزایش می دهد.

برای وزن فولادی برج طراحی منظم ترجیح داده می شود. بر اساس مدل فراندسن، طرح نامنظم مزرعه بادی به طور قابل توجهی سطوح آشفته ناشی از گردابه را به بالاترین حالت تبدیل می کند که منجر به بارهای خستگی بیشتر می شود. برای طراحی برج مبتنی بر خستگی، منجر به افزایش ضخامت دیوار و در نتیجه مصرف مواد بیشتر می شود. حداکثر آشفته مثر برای مزرعه بادی نامنظم در مقایسه با مزرعه بادی معمولی بین ۱۴.۴ تا ۲۳.۸ درصد است. بر اساس شیوه های فعلی صنعت، برج بر اساس بدترین شرایط آشفته در یک مزرعه بادی طراحی می شود. تجزیه و تحلیل نشان می دهد که هدایت آشفته ناشی از گردابه عمدتاً بین توربین هایی با کمترین فاصله در مزرعه بادی می باشد. با اجرای استاندارد IEC 61400-1 در حداقل فاصله در بدترین حالت شدت آشفته خستگی را تا ۲۰٪ کاهش می دهد (در مقایسه با مطالعه موردی). طبق مطالعات انجام شده نشان می دهد که، تعداد کمی از توربین هایی که با فاصله محدود قرار گرفته اند، در طرح بندی های نامنظم قرار دارند، بنابراین این نتیجه گیری برای همه حالت های طرح مزرعه بادی معتبر است.

منابع

1. Peter Musgrove. Wind Power. Number 9780521762380 in Cambridge Books. Cambridge University Press, Enero 2009. URL <https://ideas.repec.org/b/cup/cbooks/9780521762380.html>. ##

کاهش یابد. اگر بیش از یک طرح برج برای مزرعه بادی در نظر گرفته شود، این اثر می تواند بهبود یابد.

چیدمان نامنظم توربین های بادی در مزارع فراساحلی، علی رغم افزایش اندک هزینه های کابل کشی بین آرایه ای به میزان ۱.۱۵ درصد نسبت به چیدمان های منظم، مزایای قابل توجهی را در بهره وری انرژی و کاهش اثرات زیست محیطی به همراه دارد. تفاوت اصلی در سیستم های الکتریکی مزارع بادی فراساحلی نسبت به مزارع زمینی، در طراحی پیچیده تر کابل های بین آرایه ای است. این کابل ها تحت تأثیر عوامل متعددی از جمله مقاومت بستر دریا، عمق آب، و محدودیت های زیست محیطی قرار دارند. لذا، پیش از اجرای پروژه، انجام مطالعات جامع سایت و شبیه سازی های دقیق جهت تعیین بهینه ترین مسیر کابل کشی و انتخاب نوع کابل مناسب، امری ضروری است.

تفاوت در طول کابل: شبکه نامنظم دارای افزایش طول ۲.۱۹ درصدی نسبت به چیدمان منظم توربین ها است. این باعث افزایش هزینه و تلفات بار کامل تقریبی می شود.

مطالعه حساسیت برای چیدمان نامنظم برای ارزیابی تأثیر تغییرات در نوع کابل و موقعیت پست و نتایج آن انجام شده است. تغییر مکان پست منجر به تغییرات قابل توجهی در نتایج می شود. طول کل کابل ۲۲.۲ درصد و هزینه کل ۲۰.۸ درصد کاهش می یابد. هر چند این نتایج امیدوارکننده به نظر می رسد، اما موقعیت پست تا حد زیادی توسط شرکت انتقال انرژی تعیین می شود، که به نوبه خود به مقررات ملی بستگی دارد که منجر به موقعیت پست ثابت می شود.

با توجه به حساسیت بالا به خصوص به موقعیت پست، هیچ نتیجه گیری نهایی برای این گروه شاخص عملکرد گرفته نمی شود. با یک مکان ثابت پست، و انتخاب نوع کابل یکسان، تفاوت بین طول کابل، هزینه و تلفات بار کامل بین آرایه ای منظم و نامنظم، ناچیز در نظر گرفته می شود.

بر اساس سه شاخص عملکرد انتخاب شده، عملکرد چیدمان مزرعه بادی نامنظم بهتر از مزرعه بادی منظم است. بازده انرژی بالاتر و پایداری بیشتر در جهت باد از مزایای طرح بندی نامنظم است. و یکی از معایب چیدمان نامنظم مزرعه بادی، افزایش امواج ناشی از گردابه است. برای توسعه مزرعه بادی در آینده، استفاده از الگوهای نامنظم مزرعه بادی انتظار می رود عملکرد مزرعه بادی را به طور کلی افزایش دهد. البته توجه به حداقل فاصله بین توربین برای محدود کردن اثر منفی افزایش بار خستگی لازم است.

بحث و نتیجه گیری

در استفاده از الگوریتم های بهینه سازی الگوهای نامنظم توربین

2. M. Z. Jacobson. Review of solutions to global warming, air pollution and energy security. *Geochimica Et Cosmochimica Acta*, 73(13):A581–A581, 2009. ISSN 0016-7037. URL <GotoISI>://WOS:000267229901394. ##
3. S. Keivanpour, A. Ramudhin, and D. A. Kadi. The sustainable worldwide offshore wind energy potential: A systematic review. *Journal of Renewable and Sustainable Energy*, 9(6):18, 2017. ISSN 1941-7012. doi: 10.1063/1.5009948. URL <GotoISI>://WOS:000416106300020. ##
4. S. Markarian, F. Fazelpour, and E. Markarian. Optimization of wind farm layout considering wake effect and multiple parameters. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, 38 (5):16, 2019. ISSN 1944-7442. doi: 10.1002/ep.13193. URL <GotoISI>://WOS:000486024400055https://aiche.onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/ep.13193. ##
5. Bloothoofd, J. (2023). "A Multi-Objective Optimization Model for Offshore Wind Farm Operations & Maintenance Fleet Selection. ##
6. Regular definition of regular by oxford dictionary on lexico.com also meaning of regular, jul 2020. URL <https://www.lexico.com/definition/regular>. ##
7. Irregular | definition of irregular by oxford dictionary on lexico.com also meaning of irregular, jul 2020. URL <https://www.lexico.com/definition/irregular>. ##
8. B. Akay, D. Ragni, C. S. Ferreira, and G J W Van Bussel. Investigation of the root flow in a Horizontal Axis. *Wind Energy*, (July 2015):1–20, 2013. doi: 10.1002/we. ##
9. Nicolai Gayle Nygaard. Wakes in very large wind farms and the effect of neighbouring wind farms. *Journal of Physics: Conference Series*, 524(1), 2014. ISSN 17426596. doi: 10.1088/1742-6596/524/1/012162. ##
10. Naima Charhouni, Mohammed Sallaou, and Khalifa Mansouri. Realistic wind farm design layout optimization with different wind turbines types. *International Journal of Energy and Environmental Engineering*, 10(3):307–318, 2019. ISSN 22516832. doi: 10.1007/s40095-019-0303-2. URL https://doi.org/10.1007/s40095-019-0303-2. ##
11. Yassine Karouani and Ziyati Elhoussaine. *Toward an intelligent traffic management based on big data for smart city*, volume 37. 2018. ISBN 9783319744995. doi: 10.1007/978-3-319-74500-8_47. ##
12. Thomas Corke. Triton Knoll offshore wind farm. *Wind Energy Design*, 44(January):183–194, 2018. doi: 10.1201/b22301-8. ##
13. Grigorios Marmidis, Stavros Lazarou, and Eleftheria Pyrgioti. Optimal placement of wind turbines in a wind park using monte carlo simulation. *Renewable Energy*, 33:1455–1460, 2008. doi: 10.1016/j.renene.2007.09.004. ##
14. IEC. International standard IEC 61400-1, Wind turbines Part 1: Design requirements. *International standard*, 2005, 2005. URL www.iec.ch. ##
15. Junying Chang, Bart C. Ummels, Wilfried G.J.H.M. van Sark, Huub P.G.M. den Rooijen, and Wil L. Kling. Economic evaluation of offshore wind power in the liberalized Dutch power market. *Wind Energy*, 12(5):507–523, 2009. ISSN 10954244. doi: 10.1002/we.334. ##
16. Peter Yun Zhang. Topics in Wind Farm Layout Optimization: Analytical Wake Models, Noise Propagation, and Energy Production. 2013. ##
17. Souma Chowdhury, Jie Zhang, Achille Messac, and Luciano Castillo. Unrestricted wind farm layout optimization (uwflo): Investigating key factors influencing the maximum power generation. *Renewable Energy*, 38:16–30, 2011. doi: 10.1016/j.renene.2011.06.033. ##
18. Stephan Meier and Philip C. Kjr. Benchmark of annual energy production for different wind farm topologies. *PESC Record - IEEE Annual Power Electronics Specialists Conference*, 2005: 2073–2080, 2005. ISSN 02759306. doi: 10.1109/PESC.2005.1581918. ##
19. Shafiul Murshed Maruf. WIND RESOURCE ASSESSMENT AND SITE SUITABILITY Dissertation in partial fulfillment of the requirements for the degree of WIND RESOURCE ASSESSMENT AND SITE SUITABILITY. page 69, 2015. URL <http://www.diva-portal.org/smash/get/824303/ATTACHMENT01.pdf>. ##
20. Victor Igwemezie, Ali Mehmanparast, and Athanasios Kolios. Current trend in offshore wind energy sector and material requirements for fatigue resistance improvement in large wind turbine support structures – A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 101(October 2018): 181–196, 2019. ISSN 18790690. doi: 10.1016/j.rser.2018.11.002. URL <https://doi.org/10.1016/j.rser.2018.11.002>. ##
21. Peter Frohboese and Christian Schmuck. Thrust coefficients used for estimation of wake effects for fatigue load calculation. *European Wind Energy Conference and Exhibition 2010, EWEC 2010*, 5:3434–3444, 2010. ##
22. Tim Cooper and Burton Street. *Product Lifetimes and The Environment conference proceedings*. 2015. ISBN 9780957600997. ##
23. Katherine Dykes, Rick Damiani, Owen Roberts, and Eric Lantz. Analysis of ideal towers for tall wind applications. *Wind Energy Symposium*, 2018, (210029), 2018. doi: 10.2514/6.2018-0999. ##

24. Victor Igwemezie, Ali Mehmanparast, and Athanasios Kolios. Materials selection for XL wind turbine support structures: A corrosion-fatigue perspective. *Marine Structures*, 61(May 2018): 381–397, 2018. ISSN 09518339. doi:10.1016/j.marstruc.2018.06.008. URL <https://doi.org/10.1016/j.marstruc.2018.06.008>. ##
25. A. Endegnanew, H. Svedsen, R. Torres-Olguin, and L. Faiella. Design procedure for in array electric design. *EERA DTOC report*, 2013. URL <http://www.eera-dtoc.eu/wp-content/uploads/files/D2.2-Design-procedure-for-inter-array-electric-design>. ##
26. Martina Fischetti and David Pisinger. Optimizing wind farm cable routing considering power losses. *European Journal of Operational Research*, 270(3):917–930, 2018. ISSN 03772217. doi:10.1016/j.ejor.2017.07.061. URL <https://doi.org/10.1016/j.ejor.2017.07.061>. ##
27. Anna Ferguson, Phil De Villiers, Brendan Fitzgerald, and Jan Matthiesen. Benefits in moving the inter-array voltage from 33 kV to 66 kV AC for large offshore wind farms. *European Wind Energy Conference and Exhibition 2012, EWEC 2012*, 2(1):902–909, 2012. ##
28. Javier Serrano González, Manuel Burgos Payán, Jesús Manuel Riquelme Santos, and Francisco González-Longatt. A review and recent developments in the optimal wind-turbine micro-siting problem. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 30:133–144, 2014. ISSN 13640321. Doi: 10.1016/j.rser.2013.09.027. URL <http://dx.doi.org/10.1016/j.rser.2013.09.027>. ##
29. Martin Shan. Load Reducing Control for Wind Turbines: Load Estimation and Higher Level Controller Tuning based on Disturbance Spectra and Linear Models. 2017. URL <https://kobra.bibliothek.unikassel.de/bitstream/urn:nbn:de:hebis:342017050852519/3/DissertationMartinShan.pdf>.
30. Borssele Wind and Farm Zone. Site Studies Wind Farm Zone Borssele. Technical report, 2015. URL https://english.rvo.nl/sites/default/files/2015/02/SiteStudiesWindFarmZoneBorssele_{_}MorphodynamicsofBorsseleWindFarmZone.pdf.