مقاله پژوهشی

پایداری، توسعه و محیط زیست، دوره پنجم، شماره ٤، زمستان ١٤٠٣ (١٤٦-١٣٧)

مکان‌یابی بهینه توربین های بادی در مزارع با استفاده از الگوریتم (PSO)

شقایق مددپور[1]

آزاده نکوئی اصفهانی[2*]

azadehnekoueiesfahani@gmail.com

سید مهدی بنی‌هاشمی[3]

تاریخ دریافت: ۱۴۰۲/۱۰/۱۸ **تاریخ پذیرش: ۱۴۰۳/۴/۱۳**

چکیده

زمینه و هدف: در چند دهه اخیر منابع انرژی‌های تجدیدپذیر به جهت افزایش تقاضای انرژی و همچنین تغییر شرایط اقلیمی ناشی از مصرف سوخت‌های فسیلی مورد توجه بیشتری قرار گرفته‌اند. در حال حاضر انرژی باد یکی از اصلی‌ترین منابع تجدیدپذیر جهت تولید انرژی می‌باشد. یکی از روش‌های قابل قبول جهت افزایش توان تولیدی، کاهش هزینه بر واحد توان در مزارع بادی، مکان‌یابی بهینه توربین‌های بادی است و یکی از پارامترهای مهم و تاثیر گذار در مکان‌یابی توربین‌ها در مزارع بادی اثر گردابه است.

روش بررسی: در این پژوهش با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی که از روش‌های پرکاربرد جهت تعیین بهترین موقعیت قرارگیری توربین‌ها در مزارع بادی می‌باشد استفاده شده است. مدل‌سازی مکان‌یابی توربین‌ها برای یک مزرعه بادی در دو چیدمان منظم و نامنظم (بهینه) در سایت بادی منجیل توسط نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده است، که برای هر دو چیدمان در مزرعه بادی منظم و نامنظم از ۱۰ توربین ۵۵۰ کیلوواتی استفاده شده است.

یافته‌ها: از نتایج حاصل از شبیه‌سازی، توان تولیدی سالیانه مزرعه بادی منظم برابر با $۱/۱۲۴\times۱۰^{۷}$ کیلووات ساعت و تابع هزینه آن ۸/۴۱ بدست آمد و برای مزرعه بادی نامنظم از الگوریتم ازدحام ذرات (PSO) استفاده شده است که در این حالت توان تولیدی سالیانه مزرعه بادی نامنظم برابر با $۱/۳۰۹ \times ۱۰^{۷}$ کیلووات ساعت و همچنین تابع هزینه ۷/۲۲ بدست آمده است.

بحث و نتیجه‌گیری: در این پژوهش موقعیت قرارگیری توربین‌ها در مزرعه بادی با در نظر گرفتن اثر گردابه جهت افزایش توان تولیدی و کاهش هزینه تعیین شده است.

واژه های کلیدی: مزرعه بادی خشکی، چیدمان بهینه، توربین بادی، اثر گردابه، انرژی بادی، الگوریتم ازدحام ذرات.

۱- دانشجوی کارشناسی ارشد گروه مهندسی محیط زیست و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران

۲- استادیار گروه مهندسی محیط زیست و صنایع غذایی، دانشکده مهندسی عمران و منابع زمین، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران. *(مسوول مکاتبات)

۳- استادیارگروه مهندسی برق، دانشکده فنی، واحد تهران مرکزی، دانشگاه آزاد اسلامی، تهران، ایران و باشگاه پژوهشگران جوان و نخبگان، دانشگاه آزاد اسلامی، واحد تهران مرکزی، تهران، ایران

J. Sus. Dev. & Env., Vol 5, No.4, Winter 2025, pp.137-146

Optimized Placement of Wind Turbines in Farms Using the (PSO)

Shaghayegh Madadpour [1]
Azadeh Nekooei esfahani [2*]
azadehnekoueiesfahani@gmail.com
Mehdi Banihashemi[3]

Admission Date:July 3, 2024 Date Received: January 8, 2024

Abstract

Background and Objective: Currently, one of the acceptable methods for enhancing productivity in wind farms is optimizing turbine placement. This technique is utilized to determine the suitable and optimal positions for wind turbines within a wind farm. The primary objective of this placement is to maximize energy production within the wind farm. In a regular wind farm, turbines are positioned uniformly, symmetrically, and in grid-like patterns or columns. In contrast, in an optimized wind farm, the efficiency of turbine energy harnessing from the wind is enhanced through the identification of the best turbine placement positions.

Material and Methodology: One of the most widely employed approaches for determining the optimal turbine positions in wind farms is the utilization of optimization algorithms. In this research, the placement of two regular and optimized wind farms at the Manjil wind site has been simulated using MATLAB software, considering turbines with a capacity of kilowatts for both types of wind farms.

Findings: The results of the simulation for the regular wind farm indicate an annual production capacity of 1.124×10^7 kilowatt-hours with a cost factor of 8.41 For the optimized wind farm, a Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm has been employed, resulting in an annual production capacity of 1.309×10^7 kilowatts and a cost factor of 7.22 in this scenario.

Discussion and Conclusion: Consequently, this study aimed to demonstrate the impact of turbine placement on the wind farm

Keywords: Onshore wind farm, optimal layout, wind turbine, wake effect, wind energy, Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm.

1- MSC student, Department of Environmental Engineering and Food industry, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran
2- Assistant of Professor, Department of Environmental Engineering and Food industry, Faculty of Civil and Earth Resources Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad university, Tehran, Iran. *(*Corresponding Author*)
3- Assistant of Professor, Department of Electrical Engineering, Faculty of Engineering, Central Tehran Branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

مقدمه

در چند دهه اخیر میزان تولید انرژی به دلیل افزایش تقاضا، گسترش یافته است و با توجه به اینکه منابع انرژی مورد استفاده عمدتا سوخت‌های فسیلی بودند، باعث ایجاد آلودگی‌های محیط‌زیستی و افزایش انتشار گازهای گلخانه‌ای و در نهایت تغییرات اقلیمی شده‌اند. بنابراین بشر به دنبال منابع انرژی مناسب جهت توسعه پایدار است. در حال حاضر انرژی بادی یکی از پرکاربردترین منابع انرژی‌های پاک و تجدیدپذیر است. در مزارع بادی نحوه چیدمان توربین‌ها بر ظرفیت توان تولیدی تاثیر بسزایی دارد. یکی از پارامترهای مهم در تعیین چیدمان توربین‌ها اثر گردابه می‌باشد، که با کاهش اثر گردابه در مزارع بادی، ظرفیت توان تولیدی افزایش خواهد یافت و همچنین باعث کاهش هزینه خواهد شد. بنابراین برای تعیین موقعیت مناسب و مکان‌یابی بهینه توربین‌ها در مزارع بادی می‌توان از الگوریتم‌های بهینه‌سازی استفاده کرد. با توجه به کارایی مفید الگوریتم‌ها پژوهش‌های زیادی در این زمینه انجام شده است. به عنوان نمونه جهرمی و همکاران در سال ۱۳۹۱ با مدل‌سازی عوامل مختلف از جمله اثر گردابه و هزینه توربین سعی بر حداکثر کردن توان تولیدی مزرعه بادی و کاهش هزینه ها داشتند (1). توماس و همکاران در سال ۲۰۲۱ بهینه‌سازی مزارع بادی را به منظور حداقل رساندن اثر گردابه با دو الگوریتم مبتنی بر گرادیان و دیگری بدون گرادیان در شرایط متفاوت با چهار سناریو انجام داده‌اند، که در این پژوهش روش گرادیان نسبت به بهینه‌سازی بدون گرادیان کاهش قابل توجهی برای میزان حداقلی اثر گردابه داشته است (2). آسا و همکاران در سال ۲۰۲۱ پژوهش خود را با ۳ استراتژی مرحله‌ای برای مکان‌یابی بهینه مزرعه بادی به منظور کمینه کردن تابع هدف مورد بررسی قرارداده‌اند که برای یافتن بهترین موقعیت قرارگیری توربین‌ها از الگوریتم ازدحام ذرات استفاده شده است تا توان خروجی مزرعه بادی بیشینه شود (3). سولتانا و همکاران در سال ۲۰۲۲ برای افزایش راندمان مزرعه بادی با استفاده از الگوریتم ازدحام ذرات بهترین موقعیت قرارگیری توربین‌ها را با آرایه سرعت به صورت تصادفی مقداردهی کردند، که در این پژوهش ۶ توربین با فاصله ۱ کیلومتری از یکدیگر در فاصله بهینه قرار گرفته‌اند. در نهایت با توجه به روش بهینه‌سازی، راندمان مزرعه بادی افزایش یافته است (4).

تعریف مسئله و روش

با توجه به افزایش روزافزون از انرژی باد نیاز به ساخت مزارع بادی با توان تولیدی بالا و همچنین کاهش هزینه روز به روز افزایش پیدا کرده است. همچنین با توجه به این که اثر گردابه یکی از عوامل مهم و تاثیرگذار در توان تولیدی مزارع بادی می‌باشد، به همین منظور با قرار دادن توربین‌ها در بهترین مکان به منظور افزایش توان تولیدی مزرعه بادی با کمترین هزینه یکی از مهم‌ترین مراحل ساخت مزارع بادی می‌باشد. هدف از این مقاله مقایسه توان، هزینه و اثر گردابه برای هردو دو مزرعه بهینه و منظم با شرایط یکسان می‌باشد که این شرایط یکسان شامل مواردی از جمله : ابعاد زمین که ۲۰۰۰ متر در ۲۰۰۰ متر در نظر گرفته شده است. اندازه سرعت و جهت باد یکی از عوامل مهم در ساخت مزارع بادی می‌باشد که در پژوهش حاضر جهت بادی ثابت و میانگین سرعت بادی ۱۲ متر بر ثانیه و ثابت است. همچنین در این پژوهش تعداد ۱۰ توربین با ظرفیت ۵۵۰ کیلووات برای طراحی مزرعه لحاظ شده است.

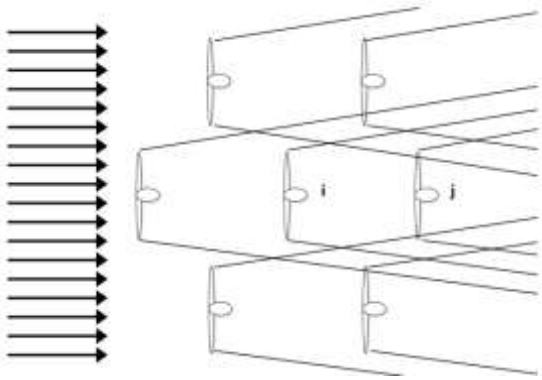
اثر گردابه

توربین‌های بادی از باد انرژی تولید می‌کنند. بنابراین در مزارع بادی، باد خروجی از توربین بالادست دارای انرژی کمتری نسبت به باد ورودی به توربین بالادست توربین می‌باشد. در نتیجه، باد پایین دست یک توربین بادی کاهش یافته و متلاطم می‌باشد که این باد، پایین دست دنباله توربین است. با ادامه جریان باد در پایین دست، این موج شروع به گسترش می‌کند و به تدریج به شرایط جریان آزاد باز میگردد. اگر این جریان با ناحیه جاروب شده یک توربین بادی تقاطع پیدا کند، توربین روبه باد تحت تاثیر اثر گردابه قرار می‌گیرد، دو مورد از تاثیرات مهم اثر گردابه عبارت اند از: ۱-کاهش سرعت باد و ۲- افزایش تلاطم باد (5-6). برای مدل‌سازی ریاضی اثر گردابه، در خصوص اهمیت مدل گردابه، ۳ روش مختلف برای مدل‌سازی اثر گردابه وجود دارد که شامل مدل Jensen، مدل Ainslie و مدل Larsen

می‌باشد. در اکثر مقالات برای تعیین مکان‌یابی بهینه توربین‌های بادی در مزارع از مدل جنسن که مهم‌ترین و معروف‌ترین آنها می‌باشد، استفاده شده است بنابراین در پژوهش حاضر نیز برای بررسی اثر گردابه در مزارع از مدل جنسن استفاده شده است. هنگامی که بیش از دو توربین بادی در یک مزرعه بادی وجود داشته باشد کاملا ممکن است که یک توربین تحت تاثیر چندین اثر گردابه قرار گیرد که باید محاسبه شود. در شکل (۱) نشان داده شده است که توربین بادی" j" نه تنها تحت تاثیر توربین " i"قرار گرفته است، بلکه در جهت اثر گردابه سایر توربین‌های دیگر قرار دارد (7).

از رابطه (۱) می‌توان سرعت ورودی به هرکدام از توربین‌های مزرعه بادی را به دست آورد.

$$V_{ij} = V_0\left(1 - \sum_{N_t}\left(1-\sqrt{1-C_T}\right)\left(\frac{R_r}{R_w}\right)^2\left(\frac{A_{shad}}{A_0}\right)\left(\frac{V_z}{V_{ref}}\right)\right) \quad (۱)$$



شکل ۱- اثر گردابه ادغام شده

Figure 1. The effect of the merged vortex

تابع هدف

توان

توان تولیدی توربین بادی، مقدار توانی است که تحت تاثیر اثر گردابه برای هر توربین بادی محاسبه می‌شود. پره‌های توربین بادی یک جریان مخروطی از باد ایجاد می‌کنند که این جریان مخروطی منجر به کاهش سرعت باد و در نهایت توان تولیدی در توربین بادی پایین دست خواهد شد. توان توربین که از باد دریافت می‌شود و به شرایطی مثل میزان باد و قطر روتور توربین بادی وابسته است که با رابطه (۲) تعریف می‌شود.

$$P = {}^1\!/_2 \cdot C_p \cdot \rho \cdot A \cdot V^3 \quad (۲)$$

که در این فرمول P توان خروجی، ρ چگالی هوا و A منطقه جاروب روتور، V سرعت باد ورودی(بالادست) و C_P ضریب توان است و درصدی از انرژی باد است که به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود.

تابع هزینه

تابع هزینه مورد نظر در این پژوهش در جهت کسب بیشترین توان تولیدی مزرعه بادی، با کمترین هزینه و تا حد امکان در تعداد دفعات کمتری به جواب قابل قبول رسیدن است. از منظر اقتصادی، مدل‌سازی تابع هزینه برای بهینه‌سازی مزرعه بادی یک ضرورت است. در این پژوهش، برای تعیین تابع هزینه فقط تعداد توربین‌ها را به عنوان متغیر در نظر می‌گیریم که این تابع را طبق رابطه موستی (۳) حساب می‌کنیم (8).

$$Cost_{tot} = N_t\left(\frac{2}{3} + \frac{1}{3}e^{-0.00174{N_t}^2}\right) \quad (۳)$$

که در این رابطه N_t تعداد توربین نصب شده در مزرعه بادی می‌باشد و اساس این رابطه به گونه‌ای است که هرچقدر تعداد توربین‌ها افزایش یابد مقدار هزینه نیز افزایش خواهد یافت.

در نهایت تابع هدف از طریق رابطه (۴) بدست می‌آید.

$$Objective_{Function} = \frac{Cost_{tot}}{P_{tot}} \quad (۴)$$

منظور از P_{tot} مجموع توان تولیدی کل توربین‌های مزرعه بادی می‌باشد. همانطور که در مطالب قبلی گفته شد ما به دنبال بیشترین توان تولیدی سالانه در ازاء کمترین هزینه هستیم، بنابراین هرچقدر مقدار رابطه (۴) کمتر باشد، تابع هدف قابل قبولی بدست می‌آید.

الگوریتم ازدحام ذرات

در الگوریتمPSO، تعدادی از موجودات وجود دارند، که به آنها ذره گفته می‌شود و در فضای جستجوی تابعی که قصد کمینه و یا بیشینه کردن (بهینه کردن) مقدار آن را داریم، پخش شده‌اند. هر ذره مقدار تابع هدف را در موقعیتی از فضا که در آن قرار گرفته است، محاسبه می‌کند. سپس با استفاده از ترکیب اطلاعات محل فعلی‌اش و بهترین محلی که در گذشته در آن بوده است و همچنین اطلاعات یک یا چند ذره از بهترین ذرات موجود در جمع، جهتی را برای حرکت انتخاب می‌کند. همه‌ی ذرات جهتی برای حرکت انتخاب می‌کنند و پس از انجام حرکت، یک مرحله از الگوریتم به پایان میرسد. این مراحل چندین بار تکرار می‌شود تا جواب مورد نظر بدست آید، الگوریتم PSO در طی سالیان گذشته، برای حل انواع مختلفی از مسائل مورد استفاده قرار گرفته است. الگوریتم PSO در حل مسایل پیچیده که چندین جواب بهینه محلی دارند مناسب است. برای حل چنین مسایلی یا روش دیگری وجود ندارد و یا در صورت وجود داشتن، جواب مناسبی به دست نمی‌آید. در شکل (۲) فلوچارت روند اجرای الگوریتم ازدحام ذرات نوشته شده است.

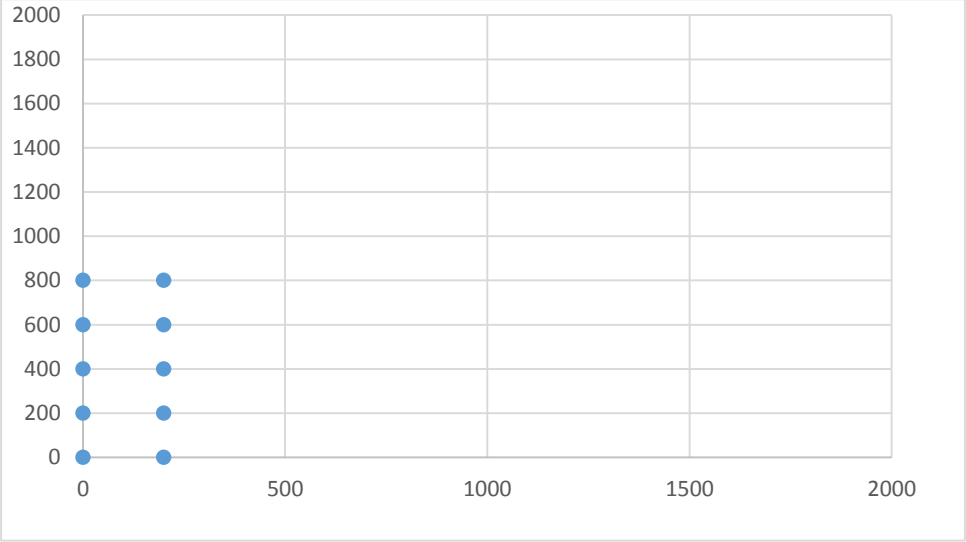
شکل ۲- فلوچارت روند اجرای الگوریتم ازدحام ذرات

Figure 2. Flowchart of the execution process of the particle swarm optimization algorithm

نتایج شبیه‌سازی

سناریو اول

در این سناریو مزرعه بادی به صورت منظم در نظر گرفته شده است. توربین‌ها در مزرعه منظم می‌توانند در یک خط عمودی یا افقی و در ردیف‌های متوالی و با فاصله مشخص و برابر از یکدیگر قرار می‌گیرند. به طور کلی توصیه می‌شود که فاصله بین توربین‌ها در این نوع مزارع بادی حداقل بین ۲ تا ۱۰ برابر قطر روتور توربین باشد. انتخاب مقدار دقیق فاصله بین توربین‌ها باید با توجه به نوع توربین، شرایط بادی منطقه و سایر مشخصه‌های مزرعه بادی مانند اثر گردابه تغییر کند. در این سناریو چیدمان توربین‌ها در ۵ ردیف و ۲ ستون می‌باشد و فاصله هر توربین از توربین مجاور و پایین‌دست به صورت ۵ برابر قطر روتور چیدمان شده است. همچنین این سناریو با در نظر گرفتن تاثیر اثر گردابه برای هر توربین در محیط متلب شبیه‌سازی گردید. نتایج حاصل از این شبیه‌سازی برای محل قرارگیری توربین‌ها، طبق شکل (۳) در مختصات دوبعدی نشان داده شده است.



شکل ۳- محل قرارگیری توربین‌ها طبق سناریو اول

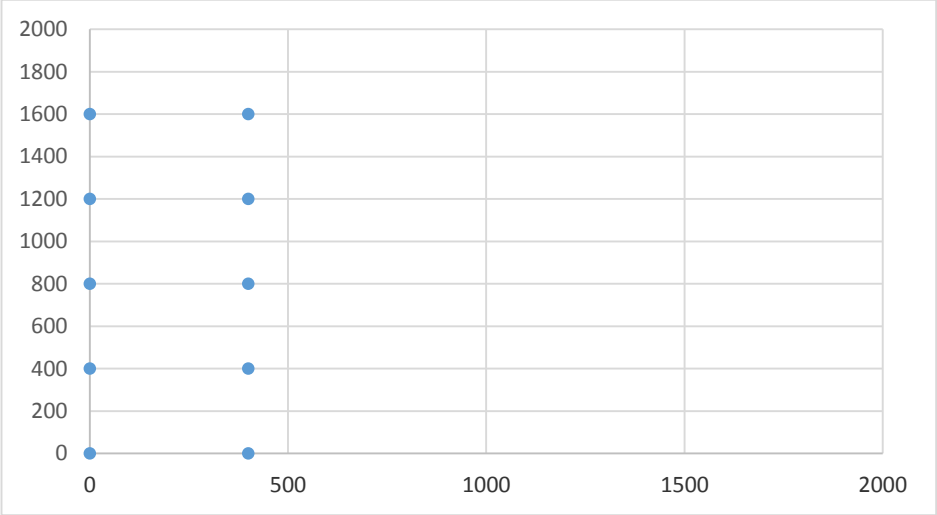
Figure 3. The placement of turbines according to scenario one

همانطور که در مطالب قبلی بیان شد، اثر گردابه یکی از پارامترهای مهم و تاثیرگذار در تعیین سرعت باد ورودی به توربین پایین‌دست می‌باشد و طبق رابطه (۲) اثر گردابه بر روی توان تولیدی تاثیر خواهد گذاشت. در سناریو پیش‌رو با چیدمان در نظر گرفته شده توان تولیدی سالانه مزرعه بادی را تحت اثر گردابه بدست آورده‌ایم که مقدار توان تولیدی سالانه برابر با $۱/۱۲۴\times۱۰^{۷}$ کیلووات ساعت بدست آمد. با توجه به اینکه توان تولیدی نامی سالانه این مزرعه بادی طبق ظرفیت توربین ۵۵۰ کیلوواتی و تعداد ۱۰ توربین، به صورت ۵۵۰*۱۰*۸۷۶۰=۴۸۱۸۰۰۰۰ کیلووات ساعت محاسبه می‌شود، می‌توان ضریب در دسترس پذیری این مزرعه را بدست آورد و طبق برآورد انجام شده، مقدار ضریب در دسترس پذیری مزرعه بادی مورد نظر در سناریو اول برابر ۲۴٪ است. از آنجاییکه میزان بازده معمول مزارع بادی بین ۲۰ الی ۴۰ درصد می‌باشد، بنابراین این چیدمان تقریبا مورد قبول خواهد بود.

سناریو دوم

در سناریو دوم نیز مانند سناریو اول، چیدمان توربین‌ها در مزرعه بادی به صورت منظم خواهد بود. با این تفاوت که در این حالت فاصله بین توربین‌ها نسبت به توربین‌های مجاور و پایین‌دست تغییر کرده است. هدف از ارائه این سناریو، بررسی میزان تغییرات توان تولیدی سالیانه مزرعه بادی با در نظر گرفتن افزایش فاصله بین توربین‌ها نسبت به حالت قبل می‌باشد. از طرفی با توجه به مطالب بیان شده و تاثیر اثر گردابه بر سرعت باد ورودی به توربین پایین‌دست، ایده‌ال ترین حالت در شرایطی ایجاد می‌شود که

جریان باد پشت توربین فرصت کافی برای بازگشت به شرایط اولیه را داشته باشد تا سرعت باد ورودی در پایین‌دست کاهش نیابد و در نهایت توان تولیدی مورد نظر بدست آید. پس تا اینجا متوجه شدیم که فاصله بین توربین‌ها دارای مقادیر ثابتی نیست و با توجه به شرایط و تعیین عملکرد بهینه مزرعه بادی می‌توانند بیشتر نیز باشند. بنابراین در این سناریو چیدمان توربین‌ها نیز مانند حالت اول در ۵ ردیف و ۲ ستون می‌باشد و فاصله بین توربین‌ها ۱۰ برابر قطر روتور تعیین شده است. در ادامه نتایج حاصل از این شبیه‌سازی برای محل قرارگیری توربین‌ها، طبق شکل (۴) در مختصات دوبعدی نشان داده شده است. در این سناریو توان تولیدی سالانه کل مزرعه بادی $۱/۲۲۲\times۱۰^{۷}$ کیلووات ساعت بدست آمد و طبق محاسباتی که برای توان نامی مزرعه با ۱۰ توربین ۵۰۰ کیلوواتی انجام شده، ضریب در دسترس‌پذیری مزرعه بادی برای این سناریو برابر با ۲۶٪ خواهد شد



شکل ۴- محل قرارگیری توربین‌ها طبق سناریو دوم

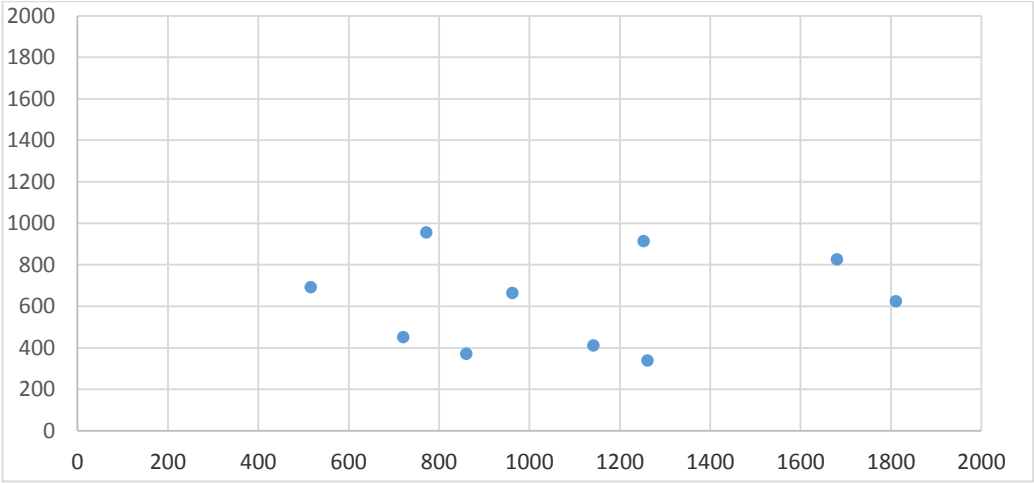
Figure 4. The location of the turbines according to the second scenario

سناریو سوم

برای بهبود بهره‌وری و افزایش تولید انرژی در مزارع بادی مهمترین هدف بهینه‌سازی چیدمان مزارع بادی می‌باشد. استفاده بهینه و مؤثر از پتانسیل باد، می‌تواند منجر به تولید انرژی بیشتر شود. در این راستا، کارهای مهمی از جمله بهینه‌سازی مکان‌یابی توربین‌ها با استفاده از الگوریتم‌های بهینه‌سازی انجام می‌شود تا کارایی توربین‌های بادی افزایش یابد و از باد بهره‌برداری بهینه‌تری شود. از جمله پارامترهایی که برای بهینه‌سازی در مزارع بادی در نظر گرفته می‌شود، کاهش اثر گردابه است. در بهینه سازی تلاش می‌شود که تورین‌ها در بهترین موقعیت نسبت به سرعت باد ورودی و کمترین تاثیر را از توربین‌های اطراف خود از نظر تغییر در رژیم باد دریافت کنند تا ظرفیت تولیدی هر توربین افزایش یابد. افزایش کارایی توربین‌ها و بهینه‌سازی تجهیزات می‌تواند منجر به کاهش هزینه تولید برق شود. با تحقیق و پژوهش و به کارگیری فناوری‌های جدید در زمینه بهبود عملکرد، می‌توان به تحقق این هدف نزدیک شد. علاوه بر تلاش در جهت افزایش توان تولیدی، بررسی آثار تخریبی محیط زیست نیز از اهداف اساسی بهینه سازی می‌باشد. استفاده مناسب و هوشمندانه از زمین‌ها و پتانسیل‌های بادی، باعث کاهش تاثیرات منفی بر محیط زیست می‌شود. این اقدامات می‌توانند به حفظ تنوع زیستی، پایداری منابع طبیعی و حفظ زیستگاه‌ها کمک کنند. استفاده بهینه از زمین‌ها و تسلط به روش‌های بهینه‌سازی مکانی از اهمیت ویژه برخوردار است. شناسایی مناطق با باد مناسب، ایجاد شبکه‌های مزارع بادی در مکان‌های استراتژیک و ایجاد تنوع در طرح‌های نصب توربین‌ها، می‌تواند به بهبود بهره‌وری و تولید انرژی کمک کند. یکی دیگر از جوانب مهم، استفاده مجدد و بهینه تر از زمین و تجهیزات قدیمی است.

همانطور که ذکر شد هدف از این مقاله افزایش توان در ازای کاهش اثر گردابه با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات

بوده است که در این سناریو نیز همانند دو سناریو قبل شرایط زمین، آب و هوا، سرعت باد، و جهت باد ثابت در نظر گرفته شده است. ولی با این تفاوت که در این سناریو به دنبال بهینه‌ترین چیدمان توربین‌ها در مزرعه بادی هستیم و توربین‌ها می‌توانند در هر مکانی با هر فاصله‌ای البته بر طبق الگوریتم بهینه‌سازی قرار گیرند و ماکزیمم توان قابل دسترسی را توسط این مدل الگوریتم به دست آید. همانطور که در شکل (۵) مشخص شده است، هر کدام از ده توربین در ناحیه‌ای از این مساحت به گونه‌ای قرار گرفته‌اند که بیشترین توان را در مجموع برای کل مزرعه بدست می‌آورد.



شکل ۵- محل قرارگیری توربین‌ها طبق سناریو سوم

Figure 5. The placement of turbines according to the third scenario

در ادامه در جدول (۱) مختصات دوبعدی قرارگیری هر کدام از توربین‌ها در مزرعه بادی مشخص شده است، که نشان دهنده این است که فاصله توربین‌ها با هم از مقادیر ثابتی تبعیت نمی‌کنند. از طرفی چون ما به دنبال بهینه‌ترین چیدمان بودیم، به این ترتیب توان تولیدی سالانه بدست آمده از مقادیر دو سناریو قبل بیشتر خواهد بود و برابر با $۱/۳۰۹\times۱۰^{۷}$ کیلووات ساعت می‌باشد و همچنین میزان ضریب در دسترس‌پذیری مزرعه بادی نسبت به حالت نامی برابر با ۲۸٪ برآورد شد که نشان از افزایش بازدهی مزرعه بادی و در نهایت کاهش هزینه برق تولیدی می‌باشد.

جدول ۱- مختصات قرارگیری توربین‌ها در سناریو سوم

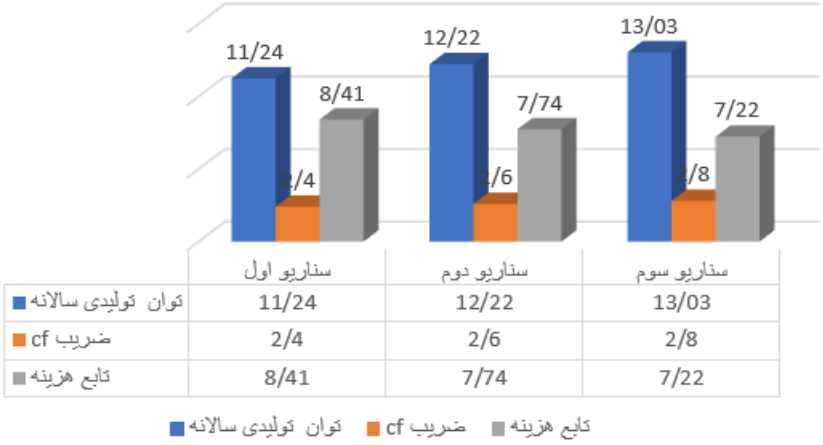
Table 1. The coordinates of the turbines' placement in the third scenario

شماره توربین	Y	X	شماره توربین	Y	X
۱	۳۷۰/۵۵	۸۶۰/۰۳	۶	۹۱۳/۶۶	۱۲۵۲/۷۹
۲	۳۳۸/۳۷	۱۲۶۰/۹۳	۷	۴۵۰/۰۱	۷۲۰/۵۵
۳	۶۲۲/۷۷	۱۸۱۰/۹۲	۸	۶۶۲/۸۷	۹۶۲/۱۴
۴	۸۲۵/۵۳	۱۶۸۰/۷۰	۹	۶۹۱/۶۴	۵۱۶/۲۰
۵	۴۰۹/۸۱	۱۱۴۱/۴۱	۱۰	۹۵۴/۵۶	۷۷۱/۵۹

هدف از این مطالعه

در آخرین بررسی انجام شده در شکل (۶) مقایسه‌ای بین هر سه سناریو از منظر توان تولیدی سالانه و میزان ضریب در دسترس‌پذیری و همچنین تابع هزینه برای هر مزرعه بادی آورده شده است که می‌توان به وضوح میزان تغییرات توان بر اثر تغییر فاصله بین توربین‌ها در سه سناریو را مشاهده کرد و در نهایت میزان توان تولیدی بدست آمده توسط الگوریتم بهینه‌سازی را

نسبت به دو سناریو قبل مقایسه می‌کند که شاهد افزایش توان تولیدی سالانه در سناریو بهینه‌سازی شده هستیم و همچنین افزایش ۲ درصدی ضریب در دسترس‌پذیری برای این سناریو نسبت به حالت منظم بدست آمد. لازم به ذکر است که تابع هدف مزرعه بادی از رابطه (۴) بدست می‌آید و با توجه به اینکه تعداد توربین‌ها در سه سناریو تغییری نداشته است، طبق شکل (۶) هرچقدر توان تولیدی سالانه افزایش یابد، شاهد کاهش تابع هدف خواهیم بود و هزینه تولید برق نیز کاهش خواهد یافت.



شکل ۶- مقایسه توان تولیدی، ضریب Cf و تابع هزینه

Figure 6. Comparison of generated power, Cf coefficient and cost function

نتیجه گیری

موضوع این مقاله مقایسه توان تولیدی سالانه یک مزرعه بادی با در نظر گرفتن اثر گردابه در دو چیدمان منظم و نامنظم (بهینه) می‌باشد. افزایش توان به عنوان هدف اصلی این مزرعه بادی بوده است که به منظور بهبود طرح‌های اولیه هر دو مزرعه منظم و نامنظم در نرم‌افزار متلب شبیه‌سازی شده و اثر گردابه برای هر دو مزرعه در نظر گرفته شده است. دو سناریور اول این مزرعه بادی به صورت چیدمان منظم می‌باشند و تنها تفاوت آنها در فاصله بین توربین‌ها خواهد بود، که به دنبال تاثیر فاصله بر توان تولیدی سالانه آنها هستیم و در سناریو سوم مزرعه نامنظمی معرفی شده است که با استفاده از الگوریتم بهینه سازی ازدحام ذرات به دنبال بیشینه کردن توان تولیدی سالانه بودیم و در نهایت مقایسه ای بین این سه سناریو آورده شده است. داده‌های باد این مزرعه از سایت اطلس باد جهانی[1] دریافت شده است که در این سایت جهت بررسی اولیه برای احداث هر مزرعه بادی دید مناسبی ارائه می‌کند. ابعاد زمین در سناریوهای مورد بررسی ۲۰۰۰ متر در ۲۰۰۰ متر می‌باشد. همچنین سرعت و جهت باد نیز ثابت در نظر گرفته شده است. در دو سناریو اول مشخص شد با توجه به وجود اثر گردابه که سرعت باد ورودی هر توربین را تحت تاثیر قرار می‌دهد، در شرایط یکسان و افزایش دو برابری فاصله بین توربین‌ها در مزرعه بادی، اثر گردابه کاهش و توان تولیدی سالانه نیز افزایش داشته است. همچنین مساحت زمین مورد استفاده با افزایش فاصله بین توربین‌ها زیاد خواهد شد که این خود نیز مستلزم افزایش هزینه در مورد راه‌اندازی مزرعه بادی می‌باشد اما در سناریو سوم همانطور که مشخص است علاوه بر اینکه توان تولیدی سالانه افزایش پیدا می‌کند همچنین شاهد کاهش مساحت زمین مورد نیاز برای این مزرعه بادی با همان تعداد توربین‌ها خواهیم بود و هزینه احداث و بازگشت سرمایه آن به طبع زودتر اتفاق می‌افتد، بنابراین با بهینه‌سازی توسط

1-Global wind atlas

الگوریتم ازدحام ذرات می‌توان هزینه‌ها را کاهش و توان تولیدی سالانه را افزایش داد که سبب بهبود راندمان مزرعه بادی نیز خواهد شد.

Reference

1. Nejadfard Jahromi, S., Moharrami, F., Fadaei Nejad, R., "Considering the Wake Effect in Optimal Siting of Wind Turbines in a Wind Farm" - The First Iranian Wind Energy Conference, Autumn 1391 - Tehran, Iran. (In Persian)
2. J. J. Thomas, S. McOmber, and A. Ning, "Wake expansion continuation: Multi-modality reduction in the wind farm layout optimization problem," Wind Energy, vol. 25, no. 4, pp. Apr. 2022, 678–699, doi: 10.1002/we.2692.
3. P. Asaah, L. Hao, and J. Ji, "Optimal Placement of Wind Turbines in Wind Farm Layout Using Particle Swarm Optimization," *J. Mod. Power Syst. Clean Energy*, vol. 9, no. 2, pp., 2021, 367–375, doi: 10.35833/MPCE.2019.000087.
4. Sultana et al. "Increase the Performance of Wind Energy Systems Using Optimal Layout Planning". Eng. Proc. 20– 20, 2022.
5. F. González-Longatt, P. Wall, and V. Terzija, "Wake effect in wind farm performance: Steady-state and dynamic behavior," *Renew. Energy*, vol. 39, no. 1, pp. 329–338, Mar. 2012, doi: 10.1016/j.renene.2011.08.053.
6. T. Göçmen, P. van der Laan, P.-E. Réthoré, A. P. Diaz, G. C. Larsen, and S. Ott, "Wind turbine wake models developed at the technical university of Denmark: A review," *Renew. Sustain. Energy Rev.*, vol. 60, pp. 752–769, Jul. 2016, doi: 10.1016/j.rser.2016.01.113.
7. K. E. Diamond and E. Crivella, "Wind Turbine Wakes, Wake Effect Impacts, and Wind Leases: Using Solar Access Laws as the Model for Capitalizing on Wind Rights During the Evolution of Wind Policy Standards," *SSRN Electron. J.*, 2011, doi: 10.2139/ssrn.2940408.
8. G. Mosetti, C. Poloni, and B. Diviacco, "Optimization of wind turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm," *J. Wind Eng. Ind. Aerodyn.*, vol. 51, no. 1, pp. 105–116, Jan. 1994, doi: 10.1016/0167-6105(94)90080-9.