

بررسی و بهینه‌سازی پارامترهای مؤثر بر تولید توان ماکزیمم از مزارع بادی در زمین هموار

ایوب فرجی پور^{۱*}

A.farajipur@srbiau.ac.ir

فرامرز فقیهی^۲

رضا شریفی^۳

تاریخ پذیرش: ۹۵/۴/۲۶

تاریخ دریافت: ۹۵/۱/۲۲

چکیده

زمینه و هدف: باد منبعی از انرژی پاک، فراوان و به طور کامل تجدیدپذیر می‌باشد. مزارع بادی بزرگ در حال احداث در سراسر جهان به‌عنوان یک راه پاک برای تولید برق می‌باشد، اما اپراتورها هنوز به دنبال موثرترین آرایش توربین‌های بادی در مزرعه بادی برای به حداکثر رساندن جذب انرژی باد هستند. بهینه‌سازی جانمایی مزارع بادی یکی از راه‌های افزایش توان خروجی مزرعه بادی می‌باشد. **روش بررسی:** در این مقاله از الگوریتم ژنتیک برای به حداکثر رساندن انرژی خروجی مورد انتظار، استفاده شده است. هدف الگوریتم ژنتیک، بهینه‌سازی آرایش مزرعه بادی از نظر مکان، ارتفاع مبتنی بر هاب و قطر روتور توربین‌ها، برای جذب حداکثر انرژی باد و کاهش اثر سایه می‌باشد. مدل پیشنهادی با دو سناریو از سرعت باد و جهت توزیع آن از سایت بادی در زمین صاف نشان داده شده است. **یافته‌ها:** نتایج مطالعه حاضر با نتایج مطالعات پیشین مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که با بهینه‌سازی آرایش مزرعه بادی از نظر مکان، ارتفاع مبتنی بر هاب و قطر روتور توربین‌ها به طور هم‌زمان، اجرای بهتری - بر حسب حداکثر مقادیر انرژی خروجی مورد انتظار و کاهش اثر سایه - از استراتژی‌های موجود که فقط به بهینه‌سازی یک یا دو مورد از پارامترها بطور هم‌زمان می‌پرداختند، را در بر دارد. **نتیجه‌گیری:** استفاده از توربین‌های بادی با ارتفاع هاب و قطر روتور متفاوت در یک مزرعه بادی در واقع مزایای کاهش اثر سایه و جذب حداکثر انرژی باد را دارد.

واژه‌های کلیدی: الگوریتم ژنتیک، اثر سایه، بهینه‌سازی، توربین بادی، مزارع بادی.

۱- دانش آموخته کارشناسی ارشد برق قدرت، دانشگاه آزاد اسلامی واحد بندرعباس* (مسئول مکاتبات)

۲- استادیار گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران

۳- استادیار گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب

Study and Optimization of Parameters Affecting the Maximum Power Output of Wind Farms on Flat Ground

Ayyub Farajipour^{1*}

A.farajipur@srbiau.ac.ir

Faramarz Faghihi²

Reza Sharifi³

Admission Date: July 16, 2016

Date Received: April 10, 2016

Abstract

Background and Objective: Wind is a clean and abundant source of energy which is completely renewable. Large wind farms are being built around the world as a way to generate electricity, but operators still seek the most effective arrangement of wind turbines in the wind farm to maximize absorption of wind energy. Wind farm layout optimization is one of the ways to increase the output of the wind farm.

Method: In this paper, a genetic algorithm to maximize the expected energy output was used. The purpose of the genetic algorithm optimization of wind farm was arranged in terms of location, hub height and rotor diameter of the turbines to capture maximum wind energy and reduce the wake effect. The proposed model with two scenarios of wind speed and direction distribution of wind sites are shown on the flat ground.

Results: The results of the present study were compared with the previous studies. The results showed that by wind farm layout optimization of the place, the hub height and rotor diameter of the turbines, at the same time, has a better performance - in terms of the maximum value of the expected energy output and reduces the wake effect with strategies which optimize with one or two parameters simultaneously.

Discussion and Conclusion: The use of wind turbines with a hub height and rotor diameter varies in a wind farm and has the benefits of reducing the wake effect and capturing maximum wind energy.

Key words: Genetic algorithm, wake effect, optimization, wind turbines, wind farm

1- Department of Electrical and Computer Engineering, Science and Research branch, Islamic Azad University, Hormozgan, Iran. *(Corresponding Author)

2- Department of Electrical and Computer Engineering, Science and Research branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

3- Department of Electrical and Computer Engineering, West Tehran branch, Islamic Azad University, Tehran, Iran.

مقدمه

باد منبعی از انرژی پاک، فراوان و به طور کامل تجدیدپذیر می‌باشد. مزارع بادی بزرگ در حال احداث در سراسر جهان به عنوان یک‌راه پاک برای تولید برق می‌باشد، اما اپراتورها هنوز بدنبال موثرترین جانمایی توربین‌های بادی در مزرعه بادی برای به حداکثر رساندن جذب انرژی باد هستند. پارامترهای متعددی از جمله مکان توربین‌ها، ارتفاع هاب و قطر روتور توربین‌ها بر توان خروجی از مزرعه بادی تأثیرگذار می‌باشند برای بهینه‌سازی آرایش مزارع بادی باید مقدار بهینه آنها اعمال شود. چن و همکارانش (۱) بهینه‌سازی آرایش مزارع بادی را با توربین‌های بادی با ارتفاع هاب متفاوت، برای افزایش توان خروجی و کاهش هزینه بر واحد توان، با استفاده از الگوریتم حریصانه انجام داده‌اند. دوپنت و همکارانش (۲) به بررسی بهینه‌سازی جانمایی مزارع بادی، برای مشخص کردن مقدار بهینه ارتفاع هاب و قطر روتور توربین با استفاده از یک الگوی جستجوی توسعه یافته پرداخته‌اند. در مطالعات پیشین ینگ چن و همکارانش (۳) به بررسی بهینه‌سازی آرایش مزارع بادی با توربین‌های بادی با ارتفاع هاب متفاوت، برای افزایش توان خروجی مزرعه و کاهش اثر سایه با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند.

پارامترهای متعددی از جمله مکان توربین‌ها، ارتفاع هاب و قطر روتور بر بهینه‌سازی آرایش مزارع بادی تأثیرگذار می‌باشند ولی اکثر مطالعات پیشین هر کدام به بررسی تأثیر یک یا دو مورد از این پارامترها بر روی بهینه‌سازی آرایش مزارع بادی پرداخته‌اند و به بررسی تأثیر کلیه پارامترها به صورت هم‌زمان بر روی بهینه‌سازی آرایش مزارع بادی و بدست آوردن ماکزیمم توان خروجی از مزارع بادی نپرداخته‌اند. انتظار می‌رود نتایج حاصل از این تحقیق به بهینه‌سازی هرچه بهتر آرایش مزارع بادی کمک کند.

تعریف مسأله و روش

هر مسأله بهینه‌سازی آرایش مزرعه بادی دارای فرضیه‌ها و محدودیت‌هایی می‌باشد که در این مقاله به شرح زیر می‌باشند:

۱- شکل مزرعه باد طراحی شده، مستطیلی فرض می‌شود. ۲-

معرفی جانمایی توربین‌ها با مختصات دکارتی (X, Y) است و فاصله از محل توربین $\sqrt{x^2 + y^2}$ است. ناهمواری سطح زمین را می‌توان ناچیز انگاشته و راه حل بهینه با مختصات دکارتی نشان داده می‌شود. $(x_i, y_i) \quad i = 1, 2, \dots, N$ (تعداد کل توربین‌ها) ۳- به منظور کاهش برخی از بارهای خطرناک بر روی توربین‌ها مانند تلاطم باد، باید فضای کافی بین هر دو توربین وجود داشته‌باشد. ۴. فرض می‌شود در مدل سایه تحلیلی (۳) مورد استفاده در این مقاله، (الف) سرعت در داخل سایه متقارن محوری و یکنواخت است، (ب) سایه دقیقاً از پشت توربین شروع به گسترش می‌کند و (ج) سرعت جریان آزاد یکنواخت است. علاوه بر این، فرض می‌شود شکل سرعت پخش سایه خود مشابه است (۳). پارامتر افزودنی حباب (α) به طور تجربی و براساس ساختار تلاطم تعیین می‌شود. ۵. در یک مزرعه بادی در مقیاس تجاری، مکان نسبی توربین نیز توسط عواملی مانند (الف) بارگذاری دینامیکی در توربین، (ب) زمین‌های محلی، (ج) ظرفیت تحمل بار و خاک و (د) طرح جاده مزرعه، تنظیم می‌شود (۷). با این حال، این محدودیت‌های عملی اضافی در آرایش مزرعه در این مقاله در نظر گرفته نشده است. ۶- فضای جستجوی مسأله، متغیرهای مختصات گسسته دارد و آن را با شکل مزرعه باد محدود کرده است. ۷- مدل ریاضی مسأله در دو بخش ساخته شده است. بخش اول، اثر سایه که ممکن است باعث تولید توان کم‌تر از توربین‌های پایین دست شود و بخش دوم، مدل توان خروجی است. ۸- هدف به حداکثر رساندن توان خروجی است، به طوری که اثر سایه به حداقل رسانده شود.

مدل اثر سایه

در (۱۶)، بیان می‌شود که بازده یک توربین بادی پس از قرار دادن آن در یک مزرعه بادی با توربین‌های دیگر به علت اثر سایه کاهش خواهد یافت. هنگامی که باد از طریق یک توربین بادی گردش می‌یابد، بخشی از انرژی جنبشی به پره‌های توربین منتقل می‌شود. همانطور که سرعت باد توسط پره‌ها کاهش یافته، آن یک گسترش حجمی در خصوص تجمع جرم قبل از

$$U_{def} = \frac{2a}{\left(1 + \alpha \frac{x}{r_r}\right)^2} \quad (۳)$$

که در آن α ثابت افزودنی حباب، و x فاصله پایین دست از توربین بادی که سایه تولید می‌کند است. و α می‌تواند با استفاده از معادله (۴) محاسبه شود. از آنجا که ما از توربین‌های بادی با ارتفاع هاب متفاوت استفاده می‌کنیم، مقدار α زمانی که ارتفاع هاب h_j تغییر کند تغییر خواهد کرد. شعاع سایه r_r مربوط به ثابت افزودنی حباب α و فاصله x می‌تواند با معادله (۵) مشخص شود (۱۹). معادله (۷) معرفی رابطه بین ضریب محوری و عامل القا محوری، که برای محاسبه شعاع روتور پایین دست به مانند معادله (۶) استفاده شده است. هنگامی که چند سایه با هم ادغام می‌شوند، سرعت حاصل U به وسیله معادله کسری انرژی جنبشی از سایه مخلوط شده، از مجموع کسری انرژی جنبشی هر سایه تکی در آن نقطه، که در معادله (۸) نشان داده شده است محاسبه می‌شود.

$$\alpha = \frac{0.5}{\ln\left(\frac{h_j}{Z_0}\right)} \quad (۴)$$

$$r_1 = \alpha x + r \quad (۵)$$

$$r_r = r \sqrt{(1-a)/(1-2a)} \quad (۶)$$

$$a = \frac{1 - \sqrt{1 - C_T}}{2} \quad (۷)$$

$$(1 - u/U_0)^2 = \sum_{i=1}^N (1 - U_i/U_0)^2 \quad (۸)$$

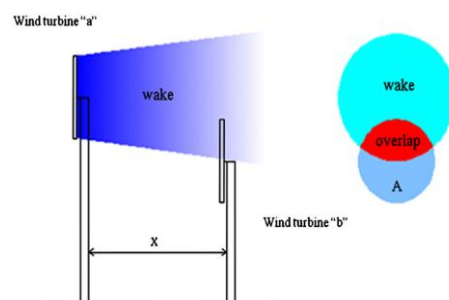
۱-مدل توان

توان تولید شده توسط یک توربین بادی از طریق معادلات زیر محاسبه می‌شود. معادله (۹) توان خروجی از توربین بادی U_i با سرعت باد U_i را محاسبه می‌کند:

$$P_i = \frac{1}{2} \rho A U_i^3 C_p \quad (۹)$$

که در آن چگالی هوا و برابر 1.2245 kg/m^3 ، منطقه جاروب شده توسط پره‌های توربین و C_p ضریب توان و برابر 0.4 می‌باشد. تابع هدف استفاده شده در الگوریتم ژنتیک برای

تیغه‌ها تولید می‌شود. برای ساده کردن مدل سایه بدون در نظر گرفتن شدت تلاطم در نزدیکی، این اثر انتشار به طور پیوسته و خطی همان‌طور که در شکل ۱ نشان داده شده است فرض شده است. اثر سایه وقتی که سایه‌های متعدد به همان توربین بادی اعمال می‌شود افزایش می‌یابد. مدل سایه تحلیلی مورد استفاده در این مطالعه برای اولین بار توسط جنسن (۱۷) توسعه داده شد و بعد از آن توسط کتیک و همکارانش (۱۸) و فرندسن (۱۹) بهبود یافته است. در این مدل، سرعت حرکت در داخل سایه ثابت فرض شده است.



شکل ۱- طرحی از مدل سایه مربوط به توربین‌های غیر یکسان (۱)

Figure 1. A proposal from the wake model, related to non-identical turbines (1)

کسری سرعت توربین‌های بادی توسط معادله زیر بیان می‌شود:

$$U_i = U_0 \left(1 - U_{def} \times (A_{overlap} / A)\right) \quad (۱)$$

$$U_0^j(Z_j) = \frac{u^*}{k} \ln\left(\frac{h_j}{Z_0}\right) + \psi \quad (۲)$$

که در آن U_0^j سرعت جریان آزاد قبل از توربین بادی J ، u^* سرعت اصطکاک مربوط به ارتفاع هاب توربین، k ثابت فون کارمن است که به طور معمول (۳) مقدار 0.4 تنظیم شده است، و ψ مدت ثبات است. مقدار (ارزش) ψ در شرایط خنثی صفر، در شرایط پایدار مثبت و در شرایط ناپایدار منفی است. شرایط در این مطالعه خنثی فرض می‌شود. بر اساس مقادیر تجربی (۲۰)، در این مطالعه طول زبری سطح Z_0 مقدار 0.3 در نظر گرفته شده است. کاهش سرعت U_{def} در معادله زیر بیان می‌شود:

را در بر دارد. سپس مقدار تابع هدف به ازای جوابهای هر رشته محاسبه شده و مطابق با آن برازندگی هر رشته تعیین می‌گردد. سپس با استفاده از عملگرهای جابجایی و جهش، جمعیت جدیدی که در حکم فرزندان جمعیت قبلی هستند تشکیل می‌شود. این روند تا رسیدن به نقطه بهینه ادامه می‌یابد. شرط توقف مسأله می‌تواند طی کردن تعداد معینی تکرار یا عدم تغییر در برازندگی بهترین رشته بعد از چند تکرار و یا شرایط خاص دیگری باشد. بررسی پارامترهایی که تأثیر بیش‌تری بر بهبود عملکرد الگوریتم خواهند داشت:

ایجاد جمعیت اولیه

جمعیت اولیه در الگوریتم‌های ژنتیک به طور معمول به صورت تصادفی ایجاد می‌شود. با توجه به حدود جواب مسأله در هر ژن یک عدد تصادفی قرار می‌گیرد. در روش انتخاب اعضای نسل اول، محدودیتی وجود ندارد. در مسایل ویژه می‌توان اعضای نسل اول را با دانش موجود در مورد مسأله، به گونه‌ای انتخاب کرد که به نقاط بهینه نزدیک‌تر باشند. باید نقاط کافی در فضا پخش باشند تا الگوریتم برای پیدا کردن نقطه بهینه، مناطق مختلفی را بررسی کند.

آمیزش یا جابجایی

جابجایی در الگوریتم ژنتیک نقش اصلی را در همگرایی و رسیدن به نقطه بهینه داراست. برای پیاده‌سازی جابجایی بر روی کروموزوم‌ها، روش‌های گوناگونی تاکنون پیشنهاد شده است. عملکرد مشترک آن‌ها، ایجاد عناصر جمعیت نسل آینده با ترکیب بخش‌هایی از کروموزوم‌های نسل موجود می‌باشد. معمولاً ضریب آمیزش عددی بین ۰/۸ تا ۱ انتخاب می‌شود.

جهش

جستجوی الگوریتم ژنتیک و رسیدن به نقطه بهینه، بیش‌تر بر پایه عمل جابجایی است. جهش تنها برای جلوگیری از همگرا شدن سریع جمعیت به یک مقدار و توقف در نقاط بهینه محلی و ایجاد تنوع در عناصر جمعیت استفاده می‌شود. معمولاً ضریب جهش عددی بین ۰/۰۰۱ و ۰/۱ انتخاب می‌شود.

در این مطالعه، برای نمایش مکان یک توربین از دو ژن و برای نمایش ارتفاع هاب و قطر روتور به ازای هر کدام از یک ژن

به حداکثر رساندن توان خروجی کل از یک مزرعه بادی در معادله (۱۰) نشان داده شده است.

$$Max P = \sum_{i=1}^N P_i \quad (10)$$

سرعت باد نامی یک توربین بادی، یکی دیگر از عوامل بسیار مهم است که نیاز به توجه دارد. اگر سرعت باد واقعی بیش از سرعت باد نامی توربین بادی باشد، تولید برق افزایش نمی‌یابد. هنگام محاسبه توان خروجی، دو حالت در نظر گرفته شده است: (۱) سرعت باد واقعی مساوی یا بزرگ‌تر از سرعت باد نامی توربین، که در آن توان خروجی برابر ظرفیت نصب شده است و (۲) سرعت باد واقعی کم‌تر از سرعت باد نامی توربین، که در آن توان خروجی با استفاده از معادله (۹) محاسبه می‌شود. در ضمن، بسیاری از توربین‌های بادی تجاری دارای سرعت باد قطع (برش) می‌باشند، بنابراین زمانی که سرعت باد بیش از سرعت قطع (برش) شود ارتباط روتور با جعبه دنده (گیربکس) قطع خواهد شد. سرعت باد قطع (برش) به طور معمول حدود ۲۰ - ۲۵ m/s است که بالاتر از سرعت باد مرجع مورداستفاده در این مطالعه است، به طوری که سناریوی قطع ارتباط روتور با جعبه دنده در این مطالعه در نظر گرفته نشده است.

$$P_i(U) = \begin{cases} 0 & U < U_c \text{ or } U > U_f \\ \frac{1}{2} \rho A U_i^3 C_p & U_c \leq U \leq U_r \\ P_{rated} & U_r \leq U \leq U_f \end{cases} \quad (11)$$

که در آن U_c سرعت باد شروع در توربین (که به نام سرعت راه اندازی تولید انرژی نیز نامیده می‌شود)، U_f سرعت قطع و U_r حد مجاز سرعت باد است. به عبارت دیگر تولید توان پایدار توربین بین U_r و U_f است.

۲- الگوریتم ژنتیک (GA)

الگوریتم ژنتیک یک روش آماری برای بهینه‌سازی و جستجو است. کارکرد الگوریتم بر اساس ژنتیک طبیعی استوار می‌باشد. در این روش ابتدا یک جمعیت اولیه که چندین رشته را شامل می‌شود تشکیل می‌گردد. هر رشته جواب‌های متفاوتی از مسأله

محدودیت حداقل فاصله، تعداد واقعی از توربین‌های بادی که می‌تواند در این مزرعه بادی قرار داده شود کمتر از ۳۶۱ خواهد بود. پارامترهای زیر (نشان داده شده در جدول ۲) از توربین‌های بادی بر اساس (۳ و ۷) برای هدف ساده‌سازی انتخاب شده است. از آنجایی که دو ارتفاع هاب متفاوت در نظر گرفته شده است دو سرعت جریان آزاد وجود دارد، سرعت جریان آزاد در ۷۸ متر بالاتر از سطح زمین به مانند سرعت باد مرجع انتخاب شده است و سرعت جریان آزاد در ۵۰ متر بر اساس سرعت باد مرجع محاسبه شده است. در مطالعه مورد اول، سرعت باد مرجع m/s ۱۲ است و جهت باد از شمال به جنوب فرض شده است. در مطالعه موردی دوم، سرعت باد مرجع m/s ۱۲ است، در حالی که جهت باد به ۳۶ جهت با ۱۰ درجه افزایش بین دو جهت مجاور جدا شده است. احتمال وقوع هر جهت یکسان فرض شده است.

هدف از این مطالعه، بررسی اثر استفاده از توربین‌های بادی غیر یکسان (با ارتفاع هاب و قطر روتور متفاوت) بر تولید توان کل از مزرعه بادی است. این بررسی مستلزم بهینه‌سازی همزمان مکان، ارتفاع هاب و قطر روتور هر توربین قرار داده شده در مزرعه بادی است. لازم به ذکر است، از آنجایی که ما از بهینه‌سازی اکتشافی استفاده می‌کنیم، این روش لزوماً تضمین بهینه کلی نیست.

استفاده می‌شود. ابتدا جمعیت اولیه الگوریتم شامل مکان توربین‌ها تشکیل می‌شود سپس، ارتفاع هاب و قطر روتور هر توربین بادی به منظور محاسبه توان خروجی هر یک از آرایش مزرعه بادی بالقوه مشخص خواهد شد. مقدار تابع هدف برابر با توان خروجی مزرعه بادی می‌باشد. با تشکیل جمعیت‌های جدید، مکان توربین‌ها، ارتفاع هاب، قطر روتور و مقدار توان خروجی مزرعه بادی تغییر می‌کند.

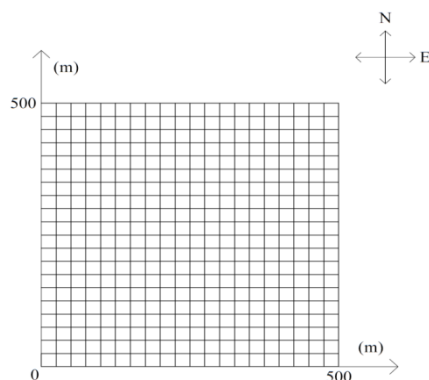
نتایج شبیه‌سازی

با توجه به محدودیت ظرفیت محاسبات، اندازه مزرعه باد داده شده $۵۰۰ \text{ متر} * ۵۰۰ \text{ متر}$ است که به ۴۰۰ سلول با اندازه سلول $۲۵ \text{ متر} * ۲۵ \text{ متر}$ همان‌طور که در شکل ۲ نشان داده شده است تقسیم شده است. این اندازه سلول باید به اندازه کافی مناسب برای ارایه مکان‌های بالقوه برای توربین‌های بادی باشد. در اینجا بجای قرار دادن توربین‌های بادی در مرکز هر سلول، تمام توربین‌های بادی در نقاط تقاطع در شبکه (نشان داده شده در شکل ۲) در داخل منطقه از مزرعه باد داده شده قرار می‌گیرند. با توجه به اندازه پایه برج، مواضع در دسترس شامل آن نقطه تقاطع در چهار لبه نخواهد شد. به عنوان مثال، نقطه تقاطع (۲۵، ۲۵) یک موقعیت بالقوه است، اما (۰، ۲۵) یک موقعیت بالقوه نیست. بنابراین، ۳۶۱ مکان بالقوه موجود در این مزرعه بادی کوچک وجود دارد. با این حال، با توجه به

جدول ۲- پارامترهای توربین بادی استفاده شده (۱)

Table 2. Wind turbine parameters used (1)

ارتفاع هاب	قطر	CT	CP	ظرفیت نصب شده	سرعت باد نامی
۷۸ متر / ۵۰	۸۰ متر / ۵۰ متر / ۴۰ متر	۰/۸۸۸۸	۰/۴	۶۸۰ kW	۱۳/۰۱۵۸ m/s



شکل ۲- شبکه مزرعه باد استفاده شده در سناریوها

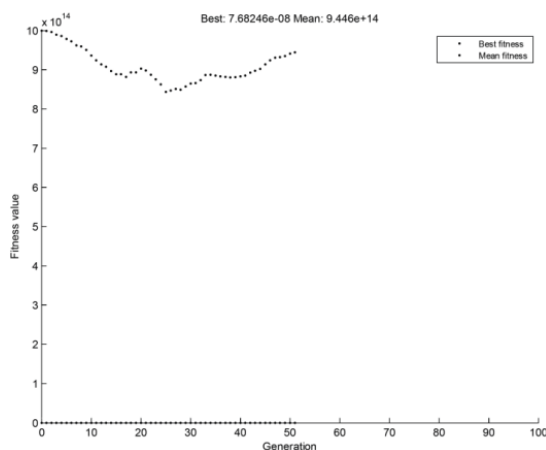
Figure 2. Network wind farm in the scenarios

مطالعه مورد اول: سرعت و جهت باد ثابت

آرایش بهینه مزرعه بادی برای این حالت در شکل ۴ نشان داده شده است. در واقع، توربین‌های بادی براساس قرار گرفتن یکنواخت رو به جهت باد، مرتب‌سازی شده‌اند. در شکل ۴، ۲۵ توربین بادی استفاده شده است و حداکثر توان خروجی کل $25/6843 \text{ MW}$ است. منحنی تغییرات تابع هدف آن با نسل در حال افزایش در شکل ۳ نشان داده شده است.

نخستین مطالعه موردی در شرایط سرعت و جهت باد ثابت است. مزرعه باد از تعداد ثابتی از توربین‌های بادی تشکیل شده است. در این حالت حداقل فاصله بین توربین‌ها 50 m در نظر گرفته شده است. توان خروجی از مزرعه باد داده شده با استفاده از توربین‌های بادی با ارتفاع هاب 78 m و 50 m متر و قطر روتور 40 m و 80 m محاسبه می‌شود.

بهینه‌سازی با استفاده از الگوریتم ژنتیک، که با جمعیت اولیه تصادفی از آرایش‌های مزرعه بادی آغاز شده، انجام می‌شود.



شکل ۳- منحنی تغییرات تابع هدف با نسل در حال افزایش

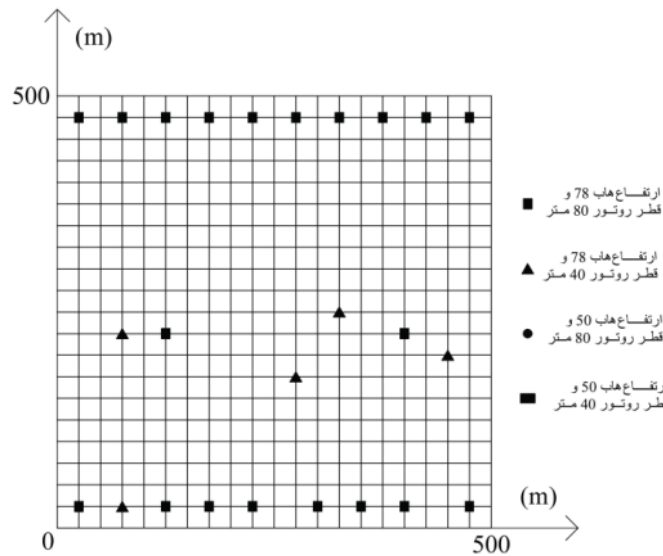
Figure 3. Curves objective function of the rising generation

خروجی و کاهش اثر سایه، از توربین‌های بادی داری ارتفاع هاب بیشتر استفاده کرده است. با این شرایط، توان مزرعه بادی با افزایش ارتفاع هاب، افزایش یافته است ولی توان خروجی مزرعه بادی، با قطر روتور توربین‌ها رابطه مستقیم ندارد و الگوریتم هوشمند از هر دو اندازه قطر روتور برای بهینه‌سازی

از شکل ۴، مشخص می‌شود که در ردیف اول حداکثر تعداد مجاز از توربین‌های بادی قرار می‌گیرد، زیرا توربین‌های بادی در ردیف اول هیچ اثر سایه‌ای بر آن‌ها وجود ندارد و به طور معمول توان خروجی بیشتری از دیگر توربین‌ها تولید می‌کنند. همانطور که از شکل ۴ مشخص است الگوریتم برای ماکزیمم کردن توان

نتایج بهتری از نظر افزایش توان خروجی مزرعه باد نسبت به بهینه‌سازی همزمان مکان و ارتفاع هاب خواهد داشت.

استفاده کرده است. با توجه به نتایج مشخص می‌شود که بهینه‌سازی همزمان مکان، ارتفاع هاب و قطر روتور به مراتب



شکل ۴- آرایش بهینه ایجاد شده توسط الگوریتم ژنتیک

Figure 4. The optimal arrangement created by Genetic Algorithm

۷۸ m و ۵۰ m متر و قطر روتور ۴۰ m و ۵۰ m محاسبه می‌شود.

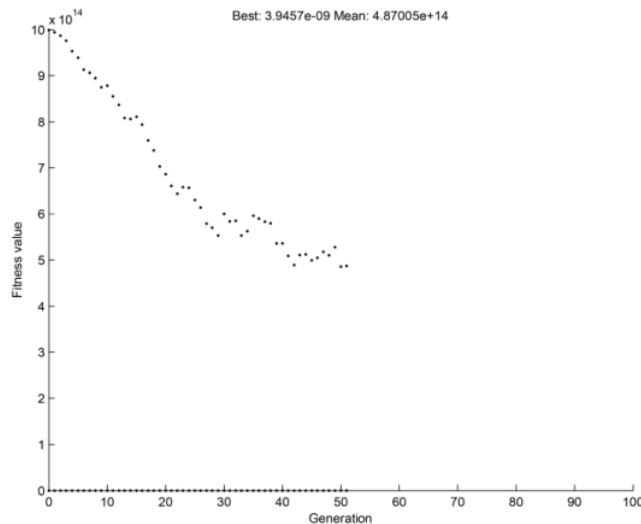
آرایش بهینه مزرعه بادی برای این حالت در شکل ۶ و منحنی تغییرات تابع هدف آن با نسل در حال افزایش در شکل ۵ نشان داده شده است. آرایش نشان داده شده است در (۳)، تعداد ۲۵ توربین بادی - شامل هجده توربین با ارتفاع هاب ۷۸ متر و هفت توربین بادی با ارتفاع هاب ۵۰ متر و قطر روتور ۴۰ متر - دارد و آن می‌تواند حداکثر توان خروجی 71112 MW تولید کند. در (۳)، همان تعداد توربین‌های بادی - شامل ۲۵ توربین بادی با ارتفاع هاب ۷۸ متر و قطر روتور ۴۰ متر - را دارد و آن می‌تواند حداکثر توان خروجی 66271 MW تولید کند. در شکل ۶، همان تعداد توربین بادی - شامل ۲۵ توربین بادی با ارتفاع هاب ۷۸ متر و قطر روتور ۵۰ متر - را دارد اما آن می‌تواند حداکثر توان خروجی 89999 MW که بترتیب 20.99% و 26.37% افزایش نسبت به جانمایی دارای توربین با ارتفاع هاب غیر یکسان و ارتفاع هاب یکسان در (۳) تولید خواهد کرد. ضمناً، ما می‌توانیم توجه کنیم که توربین‌های بادی در جانمایی به نظر می‌رسد که ترجیح می‌دهند اطراف طرح

نتایج نشان می‌دهد که توان خروجی از (۳) به ازای ۲۵ توربین با ارتفاع هاب متفاوت 79058 MW و توان خروجی از (۳) به ازای ۲۵ توربین با ارتفاع هاب یکسان 75985 MW می‌باشد و برای مطالعه حاضر به ازای ۲۵ توربین با ارتفاع هاب و قطر روتور متفاوت 256843 MW می‌باشد.

مطالعه موردی دوم: سرعت باد ثابت و جهت‌های باد مختلف در مطالعه دوم، شرایط باد دارای سرعت باد ثابت و جهت‌های باد مختلف است. فرض بر این است احتمال وقوع تمام جهات یکسان است، به طوری که جانمایی جهت‌گرا نخواهد شد. ضمناً، آن آرایش بهینه چندگانه‌ای که توان خروجی یکسان و یا بسیار نزدیک به دلیل فاقد جهت‌دار بودن تولید می‌کنند ایجاد نمی‌شود. یک توربین بادی زمانی که جهت باد تغییر کند ممکن است در سایه توربین‌های دیگر باشد به طوری که نتایج آرایش بهینه به خطر خواهد افتاد. مزرعه باد از تعداد ثابتی از توربین‌های بادی غیر یکسان (با ارتفاع هاب و قطر روتور متفاوت) تشکیل شده است. در این حالت حداقل فاصله بین توربین‌ها 100 m در نظر گرفته شده است. توان خروجی از مزرعه باد داده شده با استفاده از توربین‌های بادی با ارتفاع هاب

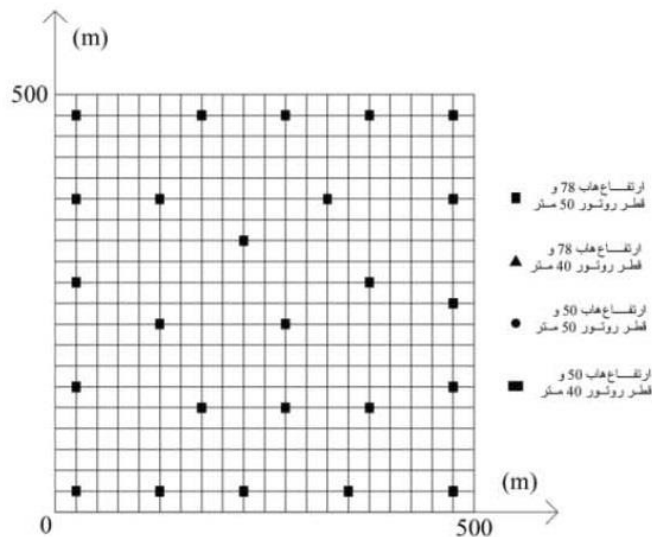
ارتفاع هاب و قطر روتور، افزایش یافته است. قابل ذکر است که به علت جهت‌های مختلف باد و تغییر حداقل فاصله بین توربین‌ها، نحوه آرایش مزرعه - هم از نظر مکان و هم از نظر مشخصات توربین‌های انتخابی - نسبت به حالت قبل تفاوت پیدا کرده است.

کلی از مزرعه باد قرار گیرند بنابراین توربین‌های بادی می‌توانند روبه روی باد در همه جهات با اثر سایه کمتر، توان خروجی بیشتر تولید کنند. همانطور که از شکل ۶ مشخص است الگوریتم برای ماکزیمم کردن توان خروجی و کاهش اثر سایه، از توربین‌های بادی داری ارتفاع هاب و قطر روتور بیشتر استفاده کرده است. با این شرایط، توان مزرعه بادی با افزایش



شکل ۵- منحنی تغییرات تابع هدف با نسل در حال افزایش

Figure 5. Curve objective function of the rising generation



شکل ۶- آرایش بهینه ایجاد شده توسط الگوریتم ژنتیک

Figure 6. The optimal arrangement created by Genetic Algorithm

نتیجه گیری

متفاوت انتخابی به کار رود. ضمناً، از این روش می توان برای انواع دیگر مزارع بادی تا زمانی که مدل سایه ثابت می ماند استفاده شود. لازم به ذکر است استفاده از توربین های بادی با ارتفاع هاب و قطر روتور متفاوت در یک مزرعه بادی در واقع مزایای کاهش اثر سایه را دارد در نتیجه، این کاربرد نمی تواند بسیار مفید باشد اگر تفاوت دو یا بیش تر از ارتفاع های هاب و قطرهای روتور بیش از حد کم باشد.

Reference

1. K, Chen., [M.X. Song.](#), [X. Zhang.](#), [S.F. Wang.](#), 2016. Wind turbine layout optimization with multiple hub height wind turbines using greedy algorithm. [Renewable Energy](#), vol. 96 , pp. 676-686
2. [Bryony, DuPont.](#), [Jonathan, Cagan.](#), [Patrick, Moriarty.](#), 2016. An advanced modeling system for optimization of wind farm layout and wind turbine sizing using a multi-level extended pattern search algorithm. [Energy](#), vol. 106 , pp. 802-814
3. Chen, Y., Li, H., Jin, K., Song, Q., 2013. Wind farm layout optimization using genetic algorithm with different hub height wind turbines. [Energy Conversion and Management](#), vol. 70 , pp. 56-65
4. Yeh, T-H., Wang, L., 2008. A Study on Generator Capacity for Wind Turbines Under Various Tower Heights and Rated Wind Speeds Using Weibull Distribution. [IEEE Transactions. Energy Conversion](#), vol. 23, pp. 592-602
5. Chowdhury, S., Zhang, J., Messac, A., Castillo, L., 2012. Unrestricted wind farm layout optimization (UWFLO): Investigating key factors influencing

در این مطالعه، اثر استفاده از توربین های بادی غیر یکسان شامل بهینه سازی هم زمان مکان، ارتفاع هاب و قطر روتور توربین با استفاده از روش GA بررسی شده است ولی مطالعات پیشین هر کدام به بررسی تأثیر یک یا دو مورد از این پارامترها بر روی بهینه سازی آرایش مزارع بادی پرداخته اند و به بررسی تأثیر کلیه پارامترها به صورت هم زمان بر روی بهینه سازی آرایش مزارع بادی و بدست آوردن ماکزیمم توان خروجی از مزارع بادی نپرداخته اند. پارامترهای GA ابتدا از طریق آزمایش و خطا و مقایسه آن با نتایج تحقیقات پیشین تایید شده است (اعتبار سنجی شده است). جمعیت اولیه در GA نقش بسزایی در رسیدن به بهینه مطلق و سرعت همگرایی دارد. با انتخاب جمعیت اولیه مناسب برای GA، جواب مسأله به جواب بهینه مطلق نزدیک تر می شود. محدودیت های مسأله در الگوریتم ادغام شده اند. بنابراین، پروسه بهینه سازی تنها به عنوان یک مسأله بهینه سازی غیر خطی کار می کند. راه حل های بهینه از طریق طراحی دقیق تر آرایش مزرعه بادی برای جذب حداکثر توان خروجی با کاهش اثر سایه نشان داده شده است و عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر روی محک مسأله مورد تأیید قرار گرفت. دو مطالعه موردی برای مقایسه مزارع بادی الف) با استفاده از توربین های بادی با ارتفاع هاب و قطر روتور یکسان، ب) با استفاده از توربین های بادی با ارتفاع هاب متفاوت و قطر روتور یکسان و ج) با استفاده از توربین های بادی با ارتفاع هاب و قطر روتور متفاوت انجام شده است. نتایج نشان می دهد که توان خروجی از مزرعه بادی با توربین های بادی دارای ارتفاع هاب و قطر روتور متفاوت، افزایش قابل توجهی (حدود ۲۶/۳۷٪) نسبت به مزرعه بادی با توربین های بادی یکسان و (حدود ۲۰/۹۹٪) نسبت به مزرعه بادی با توربین های بادی دارای ارتفاع هاب متفاوت و قطر روتور یکسان، حتی زمانی که تعداد کل توربین بادی برابر است دارد.

روش های ارایه شده در این مطالعه، تنها به توربین های بادی با دو ارتفاع هاب، دو قطر روتور و مقادیر گسسته محدود نمی شود. GA کدگذاری شده واقعی می تواند با استفاده از کدها برای نشان دادن هم زمان تعداد، مکان، ارتفاع هاب و قطر روتور

- assessment. *Renewable Energy*, vol. 67 , pp. 1-7
14. Mustakerov, I., Borissova, D., 2010. Wind turbines type and number choice using combinatorial optimization. *Renewable Energy*, vol. 35 , pp. 1887–1894
 15. Gu, H., Wang, J., 2013. Irregular-shape wind farm micro-siting optimization. *Energy*, vol. 57 , pp. 535-544
 16. Sorensen, P., Nielsen, T., Recalibrating wind turbine wake model parameters- validating the wake model performance for large offshore wind farms, European wind energy conference and exhibition, 2006, Athens: Greece
 17. Jensen, NO., A note on wind generator interaction. Roskilde, Denmark, Risø National Laboratory, 1983.
 18. Katic, I., Hojstrub, J., Jensen, ON. A simple model for cluster efficiency. European wind energy Association Conference and Exhibition, 7-9 October 1986, Rome, Italy, pp. 407-410
 19. Frandsen, S., 1992. On the wind speed reduction in the center of large clusters of wind turbines. *J Wind Eng Ind Aerodyn*, vol. 39(1–3) , pp. 251–65
 20. Mosetti, G., Poloni, C., Diviacco, B., 1994. Optimization of wind turbine positioning in large wind farms by means of a genetic algorithm. *J Wind Eng Ind Aerodynamics*, vol. 51 , pp. 105-116.
 - the maximum power generation. *Renewable Energy*, vol. 38 , pp.16-30
 6. Husien, W., El-Osta, W., Dekam, E., 2013. Effect of the wake behind wind rotor on optimum energy output of wind farms. *Renewable Energy*, vol. 49 , pp. 128-132
 7. Son, E., Lee, S., Hwang, B., Lee, S., 2013. Characteristics of turbine spacing in a wind farm using an optimal design process. *Renewable Energy*, vol. 65 , pp. 1-5
 8. Adaramola, M., Krogstad, P., 2011. Experimental investigation of wake effects on wind turbine performance. *Renewable Energy*, vol. 36 , pp. 2078-2086
 9. Samorani, M., 2010. The wind farm layout optimization problem. *Research Paper Series*. Leeds School of Business, Jan 28,
 10. Eroglu, Y., Seckiner, S., 2012. Design of wind farm layout using ant colony algorithm. *Renew Energy*, vol. 44 , pp. 53-62
 11. Kusiak, A., Song, Z., 2010. Design of wind farm layout for maximum wind energy capture. *Renew Energy*, vol. 35 , pp. 685-694
 12. Wagner, M., Day, J., Neumann, F., 2013. A fast and effective local search algorithm for optimizing the placement of wind turbines. *Renewable Energy*, vol. 51 , pp. 64-70
 13. Katsigiannis, Y., Stavrakakis, G., 2013. Estimation of wind energy production in various sites in Australia for different wind turbine classes: A comparative technical and economic