نشریه علمی‌پژوهشی مهندسی و مدیریت انرژی
سال ششم، شمارهٔ اول/ بهار ۱۳۹۵/ صفحه ۴۰ـ۵۱

تعیین آرایش بهینهٔ توربین‌های بادی با در نظرگیری ماکزیمم توان مزرعه و مینیمم هزینهٔ اتصال توربین‌ها

محمدعلی بهشتی‌نیا[1*]، امید گزانه[2]

[1] استادیار مهندسی صنایع، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
beheshtinia@semnan.ac.ir
[2] کارشناس ارشد مهندسی سیستم‌های انرژی، دانشگاه سمنان، سمنان، ایران
Omidgazaneh@gmail.com

چکیده: یکی از منابع مهم انرژی که در سال‌های اخیر بسیار مورد توجه کشورهای پیشرفتهٔ دنیا قرار گرفته، انرژی حاصل از جریان باد است که بسیار ارزان، پاک، در دسترس و همیشگی می‌باشد. نحوهٔ چیدمان و نصب توربین‌ها در مزرعه با توجه به محدودیت زمین و سرمایه به محاسبات دقیقی نیاز دارد تا بتوان بیشترین انرژی را از نیروگاه به‌دست آورد. در این پژوهش، به تعیین مکان استقرار چیدمان توربین‌ها در یک مزرعهٔ بادی به‌منظور دستیابی هم‌زمان به توان حداکثری مزرعه و حداقل‌نمودن هزینهٔ کابل‌کشی بین توربین‌ها پرداخته شده است. در این مسئله با در نظرگیری معادلات ویک (Wake)، اثراتی که توربین‌ها روی یکدیگر می‌گذارند نیز در نظر گرفته شده است. به‌منظور حل مسئله یک الگوریتم ژنتیک جدید برای حل مسئله ارائه شده است. به‌منظور بررسی عملکرد الگوریتم پیشنهادی، نتایج این الگوریتم با الگوریتم ژنتیک معمولی و چند جواب پایه مقایسه شده است. نتایج نشان از عملکرد بهتر الگوریتم ژنتیک پیشنهادی دارد.

کلیدواژه‌ها: توربین، مزرعهٔ بادی، حداکثر توان، معادلات ویک، الگوریتم ژنتیک، مکان‌یابی.

---

* نویسندهٔ مسئول

۱. مقدمه

نگرانی‌هایی که در زمینهٔ تغییرات آب‌وهـوایی ناشـی از انتشـار گازهـای کربنی در جو وجود دارد، تمام کشورهای دنیا را مجبور کرده است تا بـه دنبال یافتن راه‌هایی برای کـاهش میـزان انتشـار ایـن گازهـا باشـند [۱]. اتحادیهٔ اروپا تصمیم گرفته است تا سال ۲۰۲۰ بـه میـزان ۲۰ درصـد از پخش گازهای گلخانه‌ای کم کند [۲]. نیروگاه‌های بادی به‌دلیـل بـازدهی بالا، نهادینه‌شدن فناوری مورد استفاده برای بهـره‌بـرداری از انـرژی بـاد، ارزان تمام شدن قیمت برق تولیدی، وجود نقاطی بـا وزش بـاد در اکثـر اوقات و همچنین قابلیت تولید توان در مقیاس بـزرگ و باصـرفه بـودن، بیش از هریک از فناوری‌های موجود برای بهره‌بـرداری از منـابع انـرژی تجدیدپذیر در سیستم قدرت گسترش یافتـه اسـت. از طرفـی پیشـرفت فزایندهٔ تکنولوژی ساخت توربین‌های بادی که شامل کاهش هزینـه‌هـای طراحی و بهره‌برداری توربین‌های بادی شده است، کشـورهای جهـان را به استفادهٔ هرچه بیشتر از این انرژی واداشته اسـت. امـروزه تـوان بـادی (تبدیل انرژی باد به نوعی مفید از انرژی مانند انرژی الکتریکی با استفاده از توربین‌های بـادی، انـرژی مکـانیکی مـثلاً در آسـیاب‌هـای بـادی یـا پمپ‌های بادی و یا پیش‌رانش قایق‌هـا و کشـتی‌هـا مـثلاً در قـایق‌هـای بادبـانی) در دنیـا ظرفیـت تولیـد سـالانه ۴۳۰ تـراوات سـاعت انـرژی الکتریکی را دارد که این میزان ۲/۵ درصد مصرف برق دنیاسـت کـه بـا گسترش مزرعهٔ بادی می‌توان ظرفیت تولید سـالانهٔ بـرق را افـزایش داد [۲]. در این مقاله به تعیین مکان استقرار چیدمان توربین‌ها در یک مزرعهٔ بادی با هدف دستیابی هم‌زمان به توان حداکثری مزرعه و حداقل نمودن هزینه کابل‌کشی بین توربین‌ها پرداخته شده است و منطقه‌ای کوهسـتانی در ایالت کالیفرنیای آمریکا به‌عنوان مطالعهٔ موردی انتخاب گردیده است. پس از بررسی اطلاعات جغرافیایی و آب‌وهوایی منطقـهٔ مـورد نظـر بـه تعیین چیدمان بهینهٔ توربین‌ها در این مکان می‌پردازیم. به ایـن منظـور از یک الگوریتم ژنتیک جدید به نام الگـوریتم ژنتیـک اجتمـاعی کـه دارای چند جمعیت است، برای حل مسئله استفاده شده است. نحوهٔ چیدمان و نصب توربین‌ها در مزرعه با توجه به محدودیت زمین و سرمایه نیـاز بـه محاسبات دقیقی دارد تا بتوان بیشترین انرژی را از نیروگاه به‌دست آورد. نوآوری مقاله به شرح زیر می‌باشد:

- بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها در مزرعهٔ بادی با تابع هدف ترکیبـی از حداکثر توان خروجی و حداقل هزینه اتصال توربین‌ها
- ارائهٔ الگوریتم ژنتیک اجتماعی به‌منظور بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها

در ادامه این مقاله ، در بخش ۲ به مرور ادبیات موضوع و در بخـش ۳ به تعریف مسئله پرداخته می‌شود. مطالعهٔ مـوردی در بخـش ۴ مـورد بررسی قرار می‌گیرد و در بخش ۵ روش حل مسئله ارائه مـی‌گـردد. در بخش ۶ به تفسیر نتایج و اعتبارسنجی مسئله پرداخته می‌شود و بخـش ۷ نیز به نتیجه‌گیری اختصاص داده شده است.

۲. مرور ادبیات موضوع

طی دهه‌های گذشته هزینه تولید انرژی به کمک توربین‌های بادی به طور قابل‌ملاحظه‌ای کاهش یافته است. به علت اینکه انرژی باد می‌تواند سهم مهمی در تأمین برق مصرفی جهان داشته باشد، در مباحث مربوط به انرژی باد توجه زیادی روی توربین‌های بادی مولد برق جهت اتصال به شبکه شده است. یکی از مسائل پراهمیت و پیچیده در احداث مزارع بادی، بحث چیدمان و موقعیت مناسب توربین‌ها نسبت به یکدیگر است. ازاین‌رو اهداف و قیود متفاوتی برای بررسی این موضوع در مقالات مختلف مد نظر بوده است.

نحوهٔ چیدمان و نصب توربین‌ها در مزرعه با توجه به محـدودیت زمین و سرمایه، به محاسبات دقیقی نیاز دارد تا بتوان بیشترین انرژی را از نیروگاه به‌دست آورد. این کار اولین بار به‌وسـیلهٔ مسـتی و همکـاران [۳] انجام شده است. آن‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک دودویی[1] مقدار تابع هدف (هزینه بر واحد انرژی) را کمینه کـرده‌انـد. مـدل هزینـه‌ای بیان‌شده برای مزرعه، یک مدل ساده و تجربـی بـوده اسـت. گریـدی و همکاران [۴] با بهبود الگوریتم بهینه‌سـازی و در نظرگیـری همـان تـابع مستی و همکاران [۳] نتایج او را بهبود داده‌اند. مارمدیس و همکاران [۵] از همان تابع هدف مستی و همکاران [۳] استفاده کرده‌اند، با این تفاوت که به‌جای الگوریتم ژنتیک، روش ریاضی مونت کارلو به کار برده شده است. کاستروموا و همکاران [۶] و گنزالس و همکاران [۷] با استفاده از پارامترهای اقتصاد مهندسی، سعی کرده‌اند آرایشی برای توربین‌هـا بیابنـد که سود برآمده از ایجاد مزرعه بیشینه شود. آقاجـانی و همکـاران [۸] بـا رویکردی متفاوت به مکان‌یـابی تـوربین‌هـا از دیـدگاه ایمنـی و امـن از سروصدا و تأثیرات زیست‌محیطی با اهداف فازی محیطی پرداختـه‌انـد. وان و همکاران [۹] برخلاف کارهای گذشته، از فضـای جسـت‌وجـوی پیوسته برای تعیین آرایش بهینهٔ مزرعه استفاده کرده‌اند. این بهینـه‌سـازی به‌وسیلهٔ الگوریتم تجمع ذرات با هـدف بیشـینه‌کـردن انـرژی خروجـی مزرعه صورت گرفته است. اکونومو و همکاران [۱۰] با استفاده از شبکهٔ عصبی، تعداد بهینهٔ توربین‌های یـک مزرعـه را پیـدا کـرده‌انـد. ارگلـو و همکاران [۱۱] با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه مکان بهینهٔ توربین‌هـا را در یک مزرعهٔ دایره‌ای‌شکل محاسبه کرده‌اند. شیخ‌حسینی و همکـاران [۱۲] به تعیین آرایش بهینهٔ توربین‌ها بـا اسـتفاده از الگـوریتم ژنتیـک در منطقهٔ میل‌نادر پرداخته‌اند و با تغییـر جهـت وزش بـاد، تـوان خروجـی

1. Binary Genetic Algorithm

مزرعهٔ بادی را ارزیابی کرده‌اند. گونزالس و همکاران [۱۳] مکان بهینهٔ توربین‌ها را برای یک مزرعه در دریا[1] به گونه‌ای پیدا کرده‌اند که سود برآمده از فروش انرژی بیشینه شود. شکور و همکاران [۱۴] به بهینه‌سازی چیدمان مزرعهٔ بادی با انتخاب نقاط قطعی (برای جاگیری توربین‌ها) با الگوریتم ژنتیک پرداخته‌اند. نتایج نشان داد که قدرت خروجی مزرعه با درنظرگیری ابعاد مختلف برای جاگیری توربین‌ها در مساحت یکسان مزرعه افزایش می‌یابد. سانگ و همکاران [۱۵] برای زمین‌های با ابعاد پیچیده و مبهم، چیدمان مزرعهٔ بادی با استفاده از الگوریتم حریصانه را مورد بررسی قرار داده‌اند. طبق بررسی‌های صورت‌گرفته توسط راهبری و همکاران [۱۶] برای زمین‌های با مساحت مبهم، مشخص شده است که ترکیب یکنواخت از توربین‌های بادی برای مزرعه باعث می‌شود که قدرت خروجی مزرعه در نوسان باشد. همچنین سانگ و همکاران [۱۷] برای مزارع احداث‌شده، یک ترکیب قابل‌اجرا با در نظرگیری الگوریتم ژنتیک درجه دوم برای چیدمان توربین‌ها در مزرعه به کار گرفته‌اند. بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در زمینهٔ چیدمان بهینهٔ توربین‌ها در مزرعهٔ بادی، مکان بهینهٔ توربین‌ها در مزرعه را با هدف بیشینه نمودن انرژی خروجی بررسی نموده‌اند، درحالی‌که هزینه‌های سرمایه‌گذاری اولیه مزرعهٔ بادی نیز نقش مهمی در تعیین مکان بهینهٔ توربین‌ها دارند. ازاین‌رو در این مقاله، هزینه‌های سرمایه‌گذاری ازجمله اتصال توربین‌ها به شبکهٔ الکتریکی نیز در مکان‌یابی توربین‌های بادی در نظر گرفته شده است. به عبارت دیگر تابع هدف طوری تعریف شده است که همزمان با بیشینه‌شدن انرژی خروجی، هزینهٔ اتصال توربین‌ها در مزرعه‌ی بادی در کمترین مقدار خود قرار گیرند. همچنین در این پژوهش، از یک الگوریتم با چند جمعیت به نام الگوریتم ژنتیک اجتماعی برای یافتن چیدمان بهینهٔ توربین‌ها استفاده شده است.

۳. تعریف مسئله

۱.۳. پدیدهٔ ویک

یکی از مسائل پراهمیت و پیچیده در احداث مزارع بادی بحث چیدمان و موقعیت مناسب توربین‌ها نسبت به یکدیگر است که نقش مهمی در توان خروجی، سرمایه‌گذاری اولیه و سود سالیانه دارد.

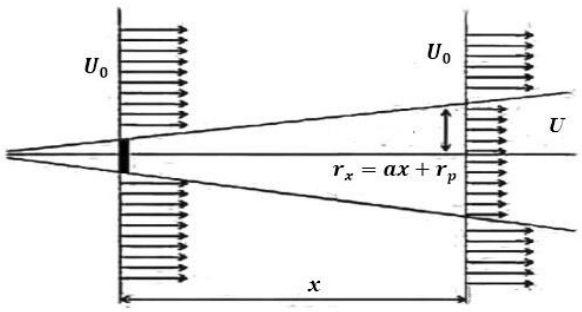
در صورت داشتن محدودیت در وسعت زمینی که برای مزرعه در نظر گرفته شده، بهتر است از توربین‌های با ظرفیت بالا استفاده شود و فواصل آن‌ها مناسب باشد. در یک مزرعهٔ بادی فاصلهٔ بین توربین‌ها باید به نحوی انتخاب شود که حداکثر بهره‌برداری از آن‌ها در اقتصادی‌ترین حالت آن انجام شود. توان موجود در باد یا توان گرفته شده از یک توربین بادی از رابطهٔ (۱) به‌دست می‌آید [۱۸]:

$$P = \frac{1}{2}\rho A V^3 \qquad (۱)$$

که در آن P توان خروجی توربین برحسب وات، ρ چگالی هوا برحسب کیلوگرم بر مترمکعب، پارامتر A نیز ناحیه‌ای که در معرض باد قرار می‌گیرد (برحسب مترمربع) که به شعاع پره‌های توربین وابسته است. همچنین V سرعت نسبی باد برحسب متر بر ثانیه می‌باشد. بدیهی است هر گونه کاهش در سرعت باد، توان تولیدی را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. سرعت باد خروجی از توربین پس از عبور از آن کاهش و قسمتی از انرژی آن کاهش می‌یابد. به این پدیده ویک[2] گفته می‌شود.

همان‌گونه که رابطهٔ (۱) نشان می‌دهد، توان تولیدی یک توربین بادی تابعی از مکعب سرعت باد اعمال شده به توربین است و بالطبع هر گونه کاهش در سرعت باد، توان تولیدی را به میزان قابل ملاحظه‌ای کاهش می‌دهد. سرعت باد در هنگام عبور از توربین بادی جذب و قسمتی از انرژی آن کاهش می‌یابد.

این کاهش در سرعت باد در پشت توربین، تابعی از عوامل مختلف نظیر فاصله، ابعاد توربین و سرعت باد ورودی به توربین است. البته این تأثیر با فاصله گرفتن یک توربین از توربین جلوتر از خود نسبت به جریان غالب وزش باد تضعیف شده و به اصطلاح، سرعت وزش باد بهبود می‌یابد که ناشی از اثر جریانات عمومی هوا در منطقه است.



شکل (۱): شمای کلی مدل جنسن

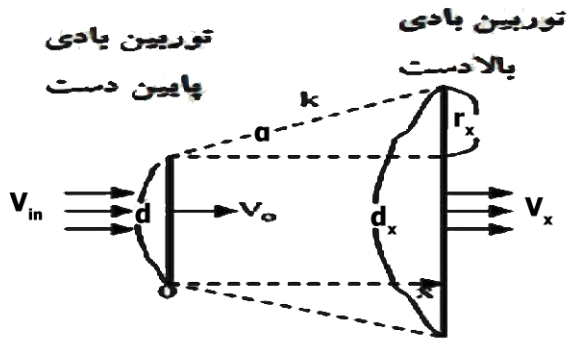
۲.۳. معادلات ویک و توان مزرعهٔ بادی

در مراجع مختلف برای مدل‌سازی اثر ویک از سه مدل گوناگون استفاده شده که عبارت‌اند از : مدل جنسن[3] [۱۹]، مدل انسلی[4] [۲۰] و مدل لارسن[5] [۵]. در این تحقیق، از مدل جنسن که یک مدل تحلیلی ساده است، برای محاسبهٔ کاهش سرعت باد ناشی از اثر ویک در توربین‌های

1. Offshore Wind Farm

2. Wake
3. Jensen
4. Ainslie
5. Larsen

بادی بالادست مورد استفاده می‌شود. این مدل ابتدا توسط لارسن در سال ۱۹۸۳ ارائه شده است. شکل زیر مدل جنسن پایه را نشان می‌دهد.



شکل (۲): شمای کلی اثر ویک

براساس مدل جنسن، سرعت باد برای توربین‌های بالادست بعد از عبور باد آزاد از توربین‌های پایین‌دست، از رابطهٔ (۲) محاسبه می‌شود [۱۹]:

$$V_x = V_{in}\left[1-\left(1-\sqrt{1-C_t}\right)\left(\frac{d}{d_x}\right)^2\right] \quad (۲)$$

که در آن V_{in} سرعت باد آزاد[1] که همان سرعت باد در هنگام عبور از توربین پایین‌دست و V_x سرعت باد به هنگام ورود به توربین بالادست برحسب متر بر ثانیه ($m.s^{-1}$) است. سایر پارامترهای مشخص‌شده در رابطهٔ (۲) عبارت‌اند از: d قطر صفحهٔ چرخش توربین پایین‌دست و d_x قطر توربین بالادست. و از رابطهٔ (۳) محاسبه می‌شود:

$$d_x = d + 2\,r_x = d + 2\,KX \quad (۳)$$

که در آن r_x، K و X در شکل (۲) مشخص شده‌اند. K ضریبی است که میزان تأثیر ویک بر کاهش سرعت باد را نشان می‌دهد. عموماً مقدار K برای توربین‌های نصب شده بر روی خشکی برابر ۰/۰۷۵ و برای توربین‌های واقع در دریا ۰/۰۵ در نظر گرفته می‌شود که در این مقاله، با توجه به محل مورد مطالعه، مقدار آن ۰/۰۷۵ در نظر گرفته شده است.

C_t، ضریب نیروی پیشران[2] نام دارد و برای هر توربین بادی از رابطهٔ زیر محاسبه می‌گردد [۲۱]:

$$C_T = -A + B\,C_P + C{C_P}^2 + D{C_P}^3 \quad (۴)$$

که در آن A، B، C و D ضرایب ثابت و برابر زیر هستند:

A = - 0.01453989
B = 1.473506
C = - 2.330823
D = 3.885123

C_p ضریب قدرت نامیده می‌شود و طبق تعریف، درصدی از انرژی باد است که به انرژی مکانیکی تبدیل می‌شود. در حالت ایده‌آل و ماکزیمم این ضریب برابر ۰/۵۹۳ است.

هرچه توربین‌های موجود در یک مزرعهٔ بادی متراکم‌تر باشند، اغتشاشات باد در توربین بالادست افزایش یافته و باد فرصت کافی برای بهبود پیدا نمی‌کند و در نتیجه توان خروجی توربین بالادست بیشتر کاهش می‌یابد.

پس از محاسبهٔ سرعت باد ورودی به هر توربین، توان توربین از رابطهٔ (۱) قابل محاسبه است.

با توجه به نوع زمین مورد مطالعه (منطقهٔ کوهستانی) و متفاوت بودن سرعت باد ورودی در ارتفاع هاب توربین، در اینصورت اگر سرعت باد ورودی به هر توربین را بخواهیم در ارتفاع هاب[3] توربین در نظر بگیریم، از معادلهٔ (۵) برای محاسبهٔ سرعت استفاده می‌گردد [۲۲].

$$V_{h,j} = V_{0,j} * \left(\frac{h}{h_0}\right)^{\alpha} \quad (۵)$$

که در این فرمول، $V_{h,j}$ سرعت باد در ارتفاع هاب هر توربین و $V_{0,j}$ سرعت باد که پس از اثر ویک هر توربین محاسبه می‌شود، h ارتفاع هاب توربین و h_0 ارتفاعی که در آن $V_{0,j}$ به‌دست آمده (نزدیک‌ترین فاصله به ارتفاع هاب) است. α نیز ضریب شکل نامیده می‌شود که برای زمین‌های صاف ۰/۱ و برای نواحی کوهستانی و تپه‌ها برابر ۰/۳ در نظر گرفته می‌شود [۲۱]. این ضریب با توجه به منطقهٔ مورد مطالعه برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است.

ویژگی دیگر مورد استفاده در این تحقیق این است که با توجه به تفاوت چگالی هوا در طول شبانه‌روز، به‌منظور افزایش دقت محاسبات توان هر توربین با در نظرگیری ارتفاع هاب و چگالی هوا از فرمول زیر محاسبه می‌شود:

$$P_j = P\left(V_{h,j}\right) * \frac{\rho_j}{\rho_0} \quad (۶)$$

که در آن، $P\ (V_{h,j})$ توان هر توربین برحسب سرعت باد در ارتفاع هاب ، ρ_j چگالی هوای متغیر[4] در محل قرارگیری توربین (رابطهٔ ۷) و ρ_0 نیز چگالی هوا در سطح دریا و برابر ۱/۲۲۵ کیلوگرم بر مترمکعب ($\mathrm{kg}.m^{-3}$) در دمای ۱۵ درجهٔ سانتی‌گراد است.

چگالی هوای متغیر در محل قرارگیری توربین‌ها از رابطهٔ (۷) قابل محاسبه است:

$$\rho_j = \frac{p_j}{R_{sp} * T_j} \quad (۷)$$

که در آن، ρ_j چگالی هوا در محل قرارگیری توربین برحسب کیلوگرم بر مترمکعب ($\mathrm{kg}.m^{-3}$) و p_j، فشار اتمسفریک[5] در محل قرارگیری

1. Velocity of Free Stream
2. Thrust Coefficient
3. Hub Height
4. Variable Air Density
5. Atmospheric

توربین برحسب پاسکال (pa) و R_{sp} ثابت جهانی گاز که مقدار آن برابر ۲۸۷/۰۵۸ ژول بر کیلوگرم کلوین $(\mathrm{j}.kg^{-1}k^{-1})$ و T_j، دمای هوا برحسب کلوین است.

پس از محاسبهٔ توان هر توربین با در نظرگیری اثر ویک، ارتفاع هاب و چگالی هوا، توان کل مزرعه با جمع کردن توان تک‌تک توربین‌ها به‌دست می‌آید:

$$P_{total} = \sum_{n=1}^{N}(P_t) \qquad (۸)$$

در این مقاله یکی از توابع هدف، به‌دست‌آوردن توان ماکزیمم مزرعه با توجه به چیدمان بهینهٔ توربین‌ها در مزرعهٔ بادی است.

۳.۳. هزینهٔ کابل‌کشی بین توربین‌ها برای اتصال به کلکتور

اتصال مزرعهٔ بادی به سیستم قدرت، به‌وسیلهٔ کلکتور[1] انجام می‌شود. برای اتصال توربین‌ها به یکدیگر و به کلکتور از کابل استفاده می‌شود. برای این کار، توربین‌ها را به چند گروه تقسیم کرده و هر گروه از توربین‌ها به‌وسیلهٔ یک کابل به کلکتور وصل می‌گردد. گروه‌بندی توربین‌ها براساس ظرفیت کابل انجام می‌شود، سپس با پیداکردن کوتاه‌ترین مسیر بین هر گروه توربین‌ها و کلکتور، طول کابل به‌دست می‌آید و هزینهٔ آن محاسبه می‌شود. ظرفیت کابل به گونه‌ای است که حداکثر پنج توربین به همدیگر اتصال می‌یابند. برای این کار دو نوع اتصال می‌تواند در نظر گرفته شود. اتصال نوع اول، اتصال بین توربین‌هاست و اتصال نوع دوم، اتصال توربین‌ها به یک کلکتور می‌باشد که موقعیت قرارگیری کلکتور در ضلع جنوب غربی مزرعه است.

تابع هدف دیگر این مسئله کمینه‌نمودن هزینهٔ کابل‌کشی برای اتصال تمام توربین‌ها به کلکتور است. به هر حال مکان توربین‌ها، تأثیر زیادی روی میزان مصرف کابل‌های مورد نیاز برای اتصال توربین‌ها دارد.

۴.۳. ترکیب توان مزرعهٔ بادی و هزینهٔ کابل‌کشی توربین‌ها

از آنجایی که برای احداث مزرعهٔ بادی هم دستیابی به توان ماکزیمم و هم دستیابی به مینیمم هزینهٔ کابل‌کشی همواره مورد نظر کارشناسان و طراحان بوده است، به این ترتیب در حالتی دیگر تابع هدف را براساس مینیمم کردن هزینهٔ کابل‌کشی بین توربین‌ها و کلتور، در عین حال دستیابی به توان ماکزیمم با توجه به چیدمان بهینهٔ توربین‌ها در نظر می‌گیریم. در واقع تابع هدف دومنظوره در نظر گرفته می‌شود که در فصل بعد نتایج حاصل از شبیه‌سازی شرح داده می‌شود.

هرچه توربین‌ها به هم نزدیک‌تر باشند، طول کابل مورد نیاز برای اتصال آن‌ها و درنتیجه هزینهٔ کابل‌کشی کمتر خواهد بود. از سوی دیگر این امر موجب کاهش توان خروجی مزرعهٔ بادی خواهد شد. این اثرات وقتی توربین‌ها فاصله‌شان از یکدیگر بیشتر باشد، معکوس خواهند شد. از سوی دیگر، محدودیت فضای مزرعهٔ بادی نیز وجود دارد.

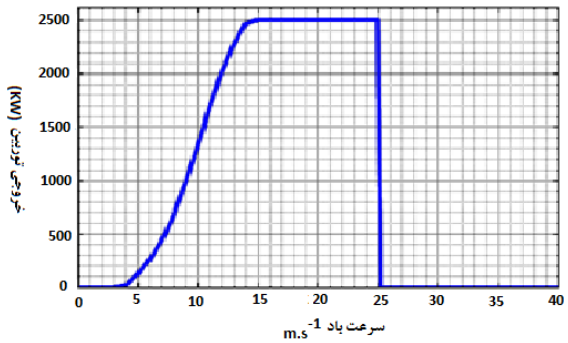
1. Collector

۴. مطالعه موردی

در این قسمت، به بررسی مطالعهٔ موردی ایجاد یک مزرعهٔ بادی و تعیین جانمایی توربین‌های بادی در یک منطقهٔ کوهستانی در ایالت کالیفرنیای آمریکا به نام ساکرامنتو[2] پرداخته می‌شود. به‌منظور حل مسئله، ابتدا داده‌های ورودی به مسئله باید تعیین شوند. این داده‌ها در دو دسته قرار می‌گیرند: اطلاعات دستهٔ اول شامل اطلاعات توربین‌ها و اطلاعات دستهٔ دوم شامل اطلاعات جغرافیایی و شرایط آب‌وهوایی منطقهٔ مورد بررسی است.

۱.۴. اطلاعات توربین‌های بادی

در این قسمت به تشریح مشخصات توربین‌های مورد استفاده در این تحقیق پرداخته می‌شود. هدف، تعیین مکان ۲۵ عدد توربین بادی در مزرعه مورد نظر است. توربین‌های بادی از نوع Nordex N80-2500 با ظرفیت[3] ۲۵۰۰ کیلووات (شکل ۳) استفاده شده است که حداقل سرعت باد ورودی مورد نیاز برای کارکرد[4] آن ۳ متر بر ثانیه، حداکثر سرعت مورد نیاز برای کارکرد[5] آن ۱۹ متر بر ثانیه و قطر مرکز گردان توربین ۸۰ ۸۰ متر است. حداکثر سرعت نوک پره[6] ۳۸ متر بر ثانیه و میزان حداکثر حداکثر سرعت نوک پره به سرعت باد[7] برابر ۵ است.



شکل (۳): منحنی سرعت‌ـ توان توربین

مسئله مهمی که دربارهٔ نیروگاه‌های بادی وجود دارد، این است که باید بین توربین‌های بادی که در یک ردیف قرار دارند فاصله‌ای در

2. Sacramento
3. Rated Output
4. Cut-in Wind Speed
5. Cut-out Wind Speed
6. Max Tip Speed
7. Max Tip Speed Ratio

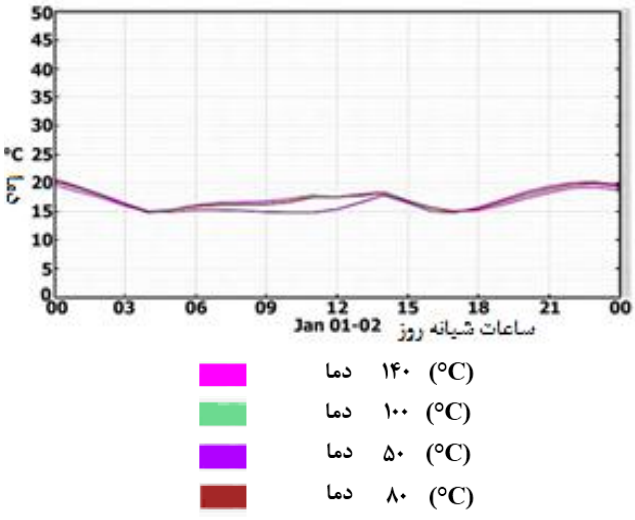
حدود ۲ تا ۴ برابر قطر قسمت چرخان وجود داشته باشد. همچنین فاصلهٔ بین ردیف‌ها، اگر پشت‌سرهم قرار گیرند، باید در حدود ۶ تا ۸ برابر قطر قسمت چرخان باشد. تعداد توربین ۲۵ عدد و حداقل فاصلهٔ ایمن هر توربین از هم برابر ۴ برابر قطر روتور توربین (۸۰ متر) است. یعنی x حداقل برابر $4d$ (۳۲۰ متر) می‌باشد. مساحت زمین مورد نظر ۳۰۰۰ × ۳۰۰۰ متر است. جهت غالب باد از ناحیهٔ غرب به شرق می‌باشد و سرعت باد ورودی برابر ۹/۳۷ متر بر ثانیه است.

مقدار C_p برابر ۰/۵۹ در نظر گرفته شده است. به این ترتیب مقدار C_t که فرمول ۴ موجود می‌باشد، برابر ۰/۸۵۹ است. در رابطهٔ (۵) مقدار h برابر ۱۰۰ متر است. در همین فرمول، h_0 بسیار نزدیک به h می‌باشد و به‌صورت تقریبی ۹۸ متر در نظر گرفته می‌شود. ضریب شکل (α) نیز برابر ۰/۳ در نظر گرفته شده است، زیرا منطقه مورد مطالعه کوهستانی می‌باشد.

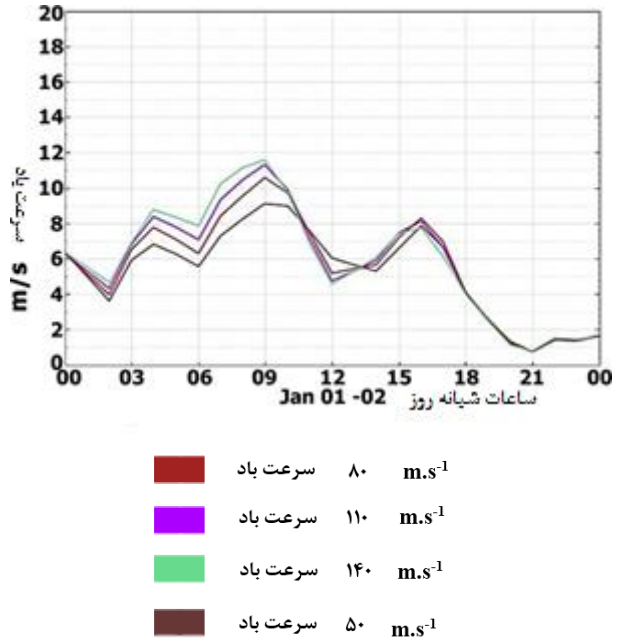
۲.۴. اطلاعات جغرافیایی و شرایط آب‌وهوایی

منطقه‌ای کوهستانی ساکرامنتو (ارتفاع از سطح دریاهای آزاد ۴۵۲ متر) در ایالت کالیفرنیا آمریکا، منطقه‌ای مستعد به‌دلیل وزش و تداوم باد است. در این مقاله یک منطقهٔ مربع‌شکل به ابعاد ۳×۳ کیلومتر از این مکان به‌عنوان مزرعهٔ بادی در نظر گرفته شده است.

با توجه به نوآوری‌های ذکرشده در مسئله (درنظرگرفتن همزمان ارتفاع‌های متفاوت برای هاب و چگالی هوا)، چیدمان بهینهٔ توربین‌ها در مزرعهٔ بادی را برای روز اول ژانویه به‌دست می‌آوریم. برای این موضوع به اطلاعاتی نظیر دما، فشار، سرعت و مسیر باد در این روز نیاز می‌باشد که این موارد در شکل‌های (۴) و (۵) آمده است.



شکل (۴): دمای هوا در روز اول ژانویه براساس ساعت‌های مختلف در روز- در ارتفاع های مختلف برحسب متر



شکل (۵): سرعت باد در روز اول ژانویه براساس ساعت‌های مختلف در روز- در ارتفاع های مختلف برحسب متر

با توجه به شکل (۴)، دمای هوا در روز اول ژانویه در ارتفاع ۱۰۰ متری، از ساعت صفر بامداد تا ساعت ۲۴ که در گسترهٔ دمایی بین ۱۷/۳۳ تا ۱۹/۶۷ درجهٔ سانتی‌گراد است که به‌عنوان متغیر دمایی در نظر گرفته می‌شود. شکل (۵) نیز نشان می‌دهد که میانگین سرعت باد ورودی در ارتفاع ۱۰۰ متری برابر ۹/۳۷ متر بر ثانیه است. همچنین با توجه به ارتفاع‌های مختلف، فشار هوا برابر ۹۷۲۷۲ پاسکال است.

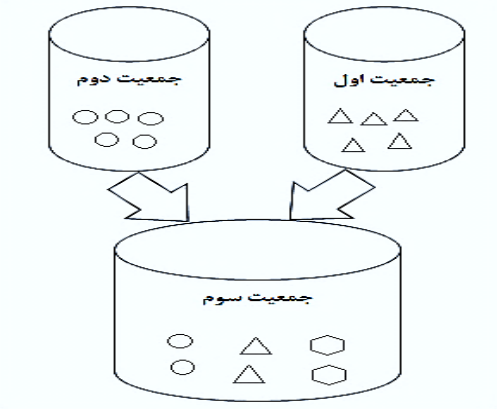
بنابراین اطلاعات ذکرشده را به‌عنوان ورودی در نظر گرفته و در گام بعدی به بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک پرداخته می‌شود.

۵. الگوریتم ژنتیک اجتماعی

برای تعیین چیدمان بهینهٔ توربین‌های بادی، از یک الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. الگوریتم ژنتیک یکی از پرکاربردترین روش‌های حل مسائل بهینه‌سازی است که با الهام از ساختار ژنتیکی موجودات زنده، به حل مسائل بهینه‌سازی می‌پردازد. در این الگوریتم، هر جواب به‌صورت یک کروموزوم نشان داده می‌شود. این الگوریتم در ابتدا تعدادی کروموزوم تصادفی ایجاد می‌کند. سپس با استفاده از دو عملگر تلفیق و جهش جمعیت کروموزوم‌ها را می‌دهد. به‌منظور برگرداندن اندازهٔ جمعیت به اندازهٔ قبل، تعدادی از کروموزوم‌ها که مقدار تابع هدف بهتری دارند، برای رفتن به نسل بعد انتخاب می‌شوند. این عمل آنقدر تکرار می‌شود تا شرط خاتمهٔ الگوریتم محقق شود.

در این مقاله، یک الگوریتم ژنتیک به نام الگوریتم ژنتیک اجتماعی

که دارای ۳ جمعیت اولیه است برای حل این مسئلهٔ دومعیاره پیشنهاد شده است. هریک از این سه جمعیت به‌طور مستقل اعمال تلفیق و جهش و انتخاب را انجام می‌دهند. با این تفاوت که تابع شایستگی هر جمعیت با جمعیت دیگر فرق دارد. با توجه به اینکه تابع هدف مسئله متشکل از دو معیار است، جمعیت اول سعی در بهبود توان خروجی، جمعیت دوم سعی در بهبود هزینهٔ کابل کشی جهت اتصال توربین‌ها و جمعیت سوم سعی در بهبود مجموع وزنی این سه مؤلفه دارد. به عبارت دیگر، در جمعیت اول کروموزوم‌هایی برتر شناخته می‌شوند که مجموع توان در آن بیشتر باشد. به همین ترتیب در جمعیت دوم کروموزوم‌هایی برترند که مجموع هزینهٔ اتصال توربین‌ها در آن‌ها کمتر باشد. اما در جمعیت سوم، کروموزوم‌هایی برترند که مجموع وزنی دو تابع هدف در آن‌ها کمتر باشد. تنها ارتباط این جمعیت‌ها به این صورت است که در عملگر انتخاب جمعیت سوم K_1 درصد از بهترین کروموزوم‌های جمعیت اول و K_2 درصد از بهترین کروموزوم‌های نسل دوم به نسل بعدی جمعیت سوم منتقل شده و سایر کروموزوم‌ها نیز از خود جمعیت سوم انتخاب می‌شوند. استفاده از چند جمعیت در الگوریتم ژنتیک پیشنهادی که هریک از آن‌ها دارای تابع شایستگی متفاوتی هستند، از یک سو موجب می‌شود که تنوع جواب‌ها در جامعهٔ سوم افزایش یافته و از سوی دیگر موجب کاهش احتمال افتادن در دام نقاط بهینه محلی می‌شود. سایر عملگرهای الگوریتم پیشنهادی به‌صورت زیر هستند:



شکل (۶): الگوریتم ژنتیک اجتماعی

ساختار کروموزوم: برای این کار منطقهٔ مربع‌شکل به مساحت ۳×۳ کیلومتر مربع را به ۸۱ قسمت مساوی تقسیم کرده که هر قسمت یک مربع به ضلع ۳۳۳/۳۳ متر می‌شود. در واقع فضای جواب مسئله به یک فضای گسسته تبدیل می‌شود. هر مربع کوچک را یک سلول می‌نامیم. طول هر کروموزوم در الگوریتم ژنتیک برابر ۲۵ در نظر گرفته شده است. هر ژن (درایه) بیانگر مکان یکی از توربین‌های مورد بررسی است که مقدار هریک ژن می‌تواند بین ۱ تا ۸۱ انتخاب شود.

معیارشایستگی: همان‌گونه که ذکر شد، الگوریتم پیشنهادی سه جمعیت دارد. معیار شایستگی جمعیت اول، بیشتر بودن مجموع توان خروجی توربین‌هاست. معیار شایستگی جمعیت دوم، کمتر بودن هزینهٔ کابل‌کشی جهت اتصال توربین‌هاست. به این منظور ابتدا طول کابل مورد نیاز جهت اتصال توربین‌ها محاسبه می‌شود. سپس هزینهٔ اتصال برای کابل‌کشی به ازای هر متر ۷ دلار در نظر گرفته می‌شود. در انتها با ضرب ۷ در طول کابل مورد نیاز، هزینهٔ کابل‌کشی به‌دست می‌آید.

معیار شایستگی برای جمعیت سوم نیز کمتر بودن عبارت زیر در نظر گرفته شده است.

$$Cost_Power = \alpha \left(\frac{1}{\frac{P}{P_{MAX}}}\right) + \beta \left(\frac{C}{C_{MIN}}\right) \qquad (۹)$$

$$[\alpha+\beta=1]$$

که P توان خروجی استقرار و C هزینهٔ کابل‌کشی مربوط به استقرار کروموزوم است. P_{MAX} و C_{MIN} نیز به‌ترتیب مقادیر مرزی برای توان خروجی و هزینهٔ کابل‌کشی هستند که برای بی‌بعد نمودن دو بخش رابطهٔ (۹) استفاده شده‌اند. بی‌بعد نمودن این دو بخش امکان جمع نمودن آن‌ها را فراهم می‌آورد. ضرایب α و β که اعدادی بین ۰ و ۱ هستند، به‌ترتیب اهمیت تابع هدف توان و هزینهٔ کابل‌کشی را نشان می‌دهند. هرچه ضریب α به ۱ نزدیک‌تر باشد به معنای اهمیت بالاتر توان خروجی نسبت به هزینهٔ کابل‌کشی است و بالعکس. در این مقاله به‌منظور محاسبهٔ P_{MAX} تابع هدف مسئله را تنها بیشینه‌سازی توان خروجی قرار داده و آن را توسط الگوریتم ژنتیک حل کرده و خروجی الگوریتم به‌عنوان P_{MAX} در نظر گرفته می‌شود. به‌منظور به‌دست‌آوردن C_{MIN} نیز تابع هدف مسئله را تنها کمینه‌سازی هزینه کابل‌کشی قرار داده و خروجی الگوریتم به‌عنوان C_{MIN} در نظر گرفته می‌شود.

عملگر تلفیق: هریک از سه جامعه برای خود به‌طور جداگانه عمل تلفیق را انجام می‌دهند. در عمل تلفیق در هر جامعه، دو کروموزوم از جمعیت فعلی آن جامعه به‌صورت تصادفی انتخاب می‌شوند و سپس با استفاده از روش تلفیق یکنواخت پارامتری‌شده[1] عمل تلفیق روی آن‌ها صورت می‌گیرد. بعد از هر عمل تلفیق به زمان‌بندی کروموزوم حاصل پرداخته می‌شود و مقدار تابع شایستگی آن براساس نوع جمعیت محاسبه می‌گردد. تعداد عملیات تلفیق در هر تکرار، ثابت و توسط ضریبی از اندازهٔ جمعیت هریک از جامعه‌هاست که مانند قبل در نظر گرفته می‌شود.

عملگر جهش: هریک از سه جامعه برای خود به‌طور جداگانه عمل جهش را انجام می‌دهند. به‌منظور انجام عمل جهش، در این الگوریتم از دو روش وارونگی[2] و تعویض[3] استفاده شده است. بعد از هر عمل

1. Parmetrized Unifom Crossover
2. Reverse
3. Swap

جهش، به زمان‌بندی کروموزوم حاصل پرداخته می‌شود و مقدار تابع شایستگی آن براساس نوع جمعیت محاسبه می‌گردد. تعداد تکرار عملگر جهش در هر تکرار، ثابت و توسط ضریبی از اندازهٔ جمعیت هریک از جامعه‌هاست که مانند قبل در نظر گرفته می‌شود.

انتخاب جمعیت بعدی: در این الگوریتم از روش انتخاب نخبه‌گرایی به‌منظور انتخاب جمعیت نسل بعد در سه جمعیت استفاده شده است. با این تفاوت که معیار برتری در هر جمعیت براساس تابع هدف آن جمعیت است. (تابع هدف جمعیت اول و دوم به‌ترتیب حداکثرسازی توان خروجی و کمینه نمودن هزینهٔ کابل‌کشی جهت اتصال توربین‌ها و تابع هدف جامعهٔ سوم نیز ترکیب دو تابع هدف مذکور است.)

به‌علاوه در هر تکرار، جمعیت سوم بخشی از بهترین کروموزوم‌های دو نسل دیگر را نیز به نسل بعدی خود منتقل می‌کند.

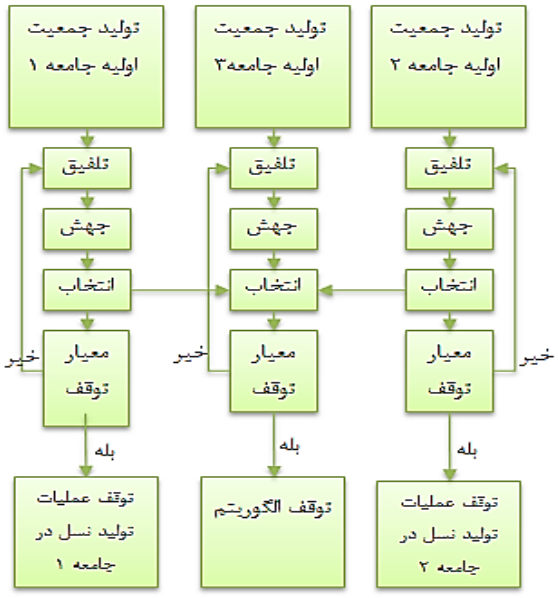
شرایط توقف براساس سه ترکیب زیر هستند:

– اگر پس از ۱۰۰ ثانیه بهبودی ایجاد نشد، پاسخ بهترین نخبه به‌دست آمده است.

– اگر بهبود نسل جدید با نسل قبل کمتر از عدد 10^{-200} تعیین شده در الگوریتم باشد، عملیات متوقف شود.

– اگر برای ۵۰ تا نسل عملیات ذکر شده ثابت بماند، عملیات متوقف گردد.

پس از اجراهای متعدد و به‌صورت تجربی مقادیر ۲۵ برای اندازه جمعیت اولیه، ۱/۲ برای نرخ تلفیق، ۰/۰۳ برای نرخ جهش، ۰/۶ برای پارامتر K_1 و ۰/۴ برای پارامتر K_2 در نظر گرفته شد.



شکل (۷): فلوچارت الگوریتم ژنتیک اجتماعی

۶. ارائهٔ نتایج و اعتبارسنجی روش حل

پس از تعیین پارامترهای ورودی، مسئله توسط الگوریتم ژنتیک اجتماعی حل شده است. به‌منظور ارزیابی عملکرد این الگوریتم، نتیجهٔ آن با یک الگوریتم ژنتیک که جمعیت آن سه برابر اندازهٔ جمعیت هریک از سه جمعیت الگوریتم ژنتیک اجتماعی است، مقایسه شده است. در این مقایسه، سایر پارامترهای هر دو الگوریتم یکسان در نظر گرفته شده است. تابع هدف در الگوریتم ژنتیک معمولی همان مجموع وزنی دو تابع هدف قبلی است. به‌علاوه خروجی الگوریتم اجتماعی با شش استقرار پایه مقایسه شده است. در زیر ابتدا به معرفی شش استقرار پایه پرداخته و سپس مقادیر هریک از توابع هدف برای آن‌ها محاسبه شده است.

۱.۶. معرفی استقرارهای پایه

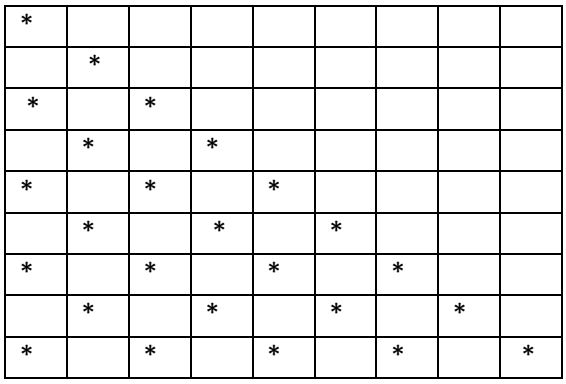
در این مقاله، شش استقرار پایه برای مسئله در نظر گرفته می‌شود و نتیجهٔ آن با استقرار نهایی الگوریتم‌ها مقایسه می‌گردد.

استقرار نوع اول: به‌علت اینکه جهت وزش باد از غرب به شرق در نظر گرفته شده، سعی شده است استقرار ۲۳ توربین به‌صورت پیکان‌هایی در جهت باد در نظر گرفته شود. تعداد ۲ توربین باقی‌مانده که در استقرار فوق نمی‌گنجند نیز در قسمت‌های گوشه‌ای در ستون اول قرار داده شده‌اند (شکل ۸). در این آرایش، مقدار توان خروجی مزرعهٔ بادی برابر ۱۱۲۲۲۶۶۴۳۳ وات و مقدار هزینهٔ کابل‌کشی برابر ۱۶۳۹۴۲ دلار است.

*				*			*	
			*			*		
		*			*			*
	*			*			*	
*			*			*		
	*			*			*	
		*			*			*
			*			*		
*				*			*	

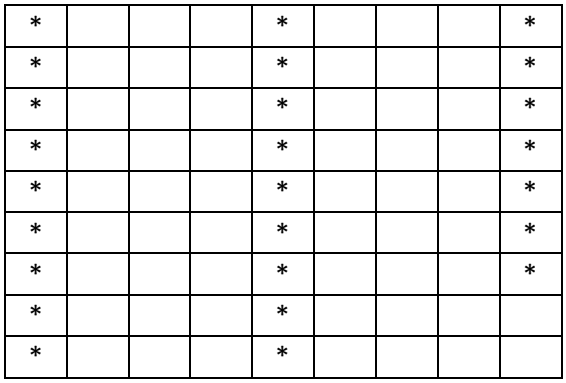
شکل (۸): استقرار نوع اول

استقرار نوع دوم: در این نوع استقرار سعی شده است توربین‌ها به‌صورت اریب قرار گیرند. با توجه با اینکه کلکتور در قسمت جنوب غرب مزرعهٔ بادی قرار دارند، این خطوط اریب نزدیک این نقطه باید قرار گیرند (شکل ۹). در این آرایش، مقدار توان خروجی مزرعهٔ بادی برابر ۹۲۷۰۶۴۵۰۷ وات و مقدار هزینهٔ کابل‌کشی برابر ۱۲۸۵۰۰ دلار است.



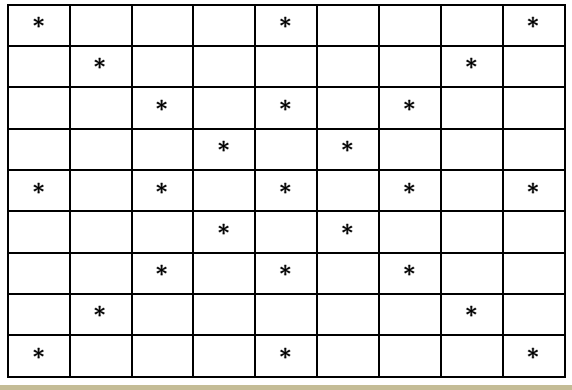
شکل (۹): استقرار نوع دوم

استقرار نوع سوم: در این استقرار سعی شده است توربین‌ها به‌صورت موازی و در حداکثر فاصله از هم قرار گیرند تا پدیدهٔ ویک در آن‌ها کمتر اثر بگذارد (شکل ۱۰). در این آرایش، مقدار توان خروجی مزرعهٔ بادی برابر ۱۱۴۰۴۵۵۶۹۹ وات و مقدار هزینهٔ کابل‌کشی برابر ۱۳۶۷۶۷ دلار است.



شکل (۱۰): استقرار نوع سوم

استقرار نوع چهارم: در این استقرار سعی شده است توربین‌ها به‌صورت پراکنده و در تمامی نقاط مزرعهٔ بادی پخش شوند (شکل ۱۱). در این آرایش مقدار توان خروجی مزرعهٔ بادی برابر ۱۰۴۳۱۵۲۳۷۴ وات و مقدار هزینهٔ کابل‌کشی برابر ۱۵۵۵۳۹ دلار است.

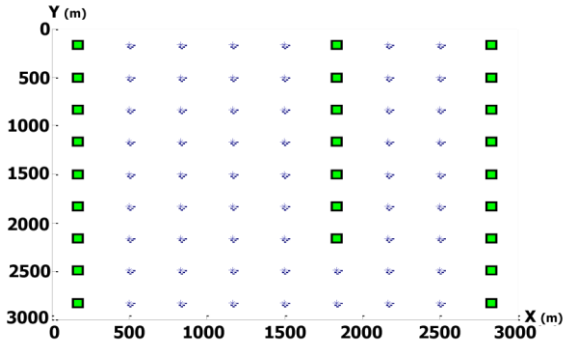


شکل (۱۱): استقرار نوع چهارم

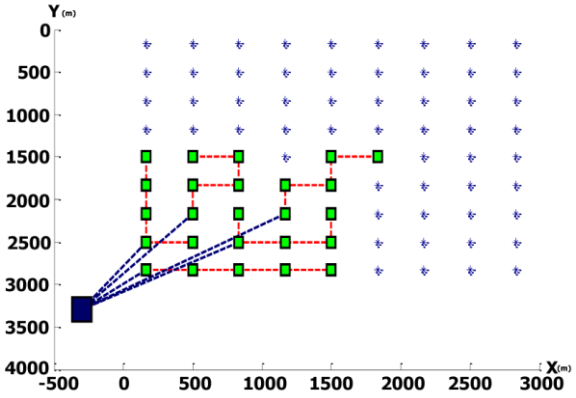
علاوه بر چهار استقرار فوق، دو استقرار آرمانی دیگر نیز در نظر گرفته شده است.

استقرار نوع پنجم: در این استقرار، تنها تابع هدف بیشینه‌سازی توان خروجی توربین‌ها مورد نظر قرار گرفته و خروجی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به‌عنوان استقرار مذکور در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱۲) خروجی الگوریتم در این حالت را نشان می‌دهد. در این آرایش مقدار توان خروجی مزرعهٔ بادی برابر ۱۱۹۷۴۴۳۶۷۲ وات است که همان P_{MAX} در رابطهٔ (۹) است.

استقرار نوع ششم: در این استقرار، تنها تابع هدف کمینه‌نمودن هزینهٔ کابل‌کشی مورد نظر قرار گرفته و خروجی الگوریتم ژنتیک پیشنهادی به‌عنوان استقرار مذکور در نظر گرفته می‌شود. شکل (۱۳) خروجی الگوریتم در این حالت را نشان می‌دهد. در این آرایش، مقدار هزینهٔ کابل‌کشی برابر ۹۱۱۳۲ دلار است که همان C_{MIN} در رابطهٔ (۹) است.



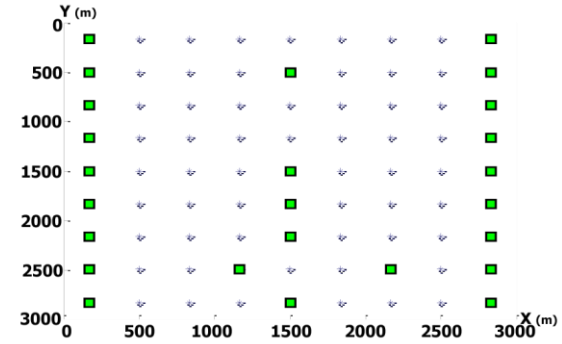
شکل (۱۲): استقرار نوع پنجم



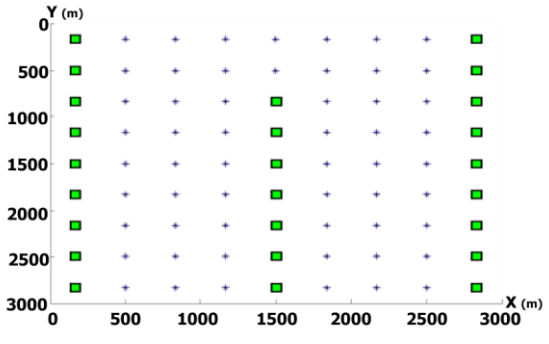
شکل (۱۳): استقرار نوع ششم

۲.۶. ارزیابی عملکرد الگوریتم ژنتیک پیشنهادی

در این بخش به مقایسهٔ خروجی الگوریتم ژنتیک اجتماعی با خروجی الگوریتم ژنتیک معمولی و ۶ استقرار پایه پرداخته می‌شود. معمولاً اهمیت توان خروجی مهم‌تر از هزینهٔ کابل‌کشی است. ازاین‌رو شکل‌های (۱۴) و (۱۵) به‌ترتیب استقرار نهایی توربین‌ها توسط الگوریتم ژنتیک معمولی و الگوریتم ژنتیک اجتماعی را نشان می‌دهد (β=0.3 و α=0.7).



شکل (۱۴): موقعیت قرارگیری توربین‌ها در مزرعه برای دستیابی به مینیمم هزینه و ماکزیمم توان براساس الگوریتم ژنتیک با ضرایب α برابر ۰/۷ و β برابر ۰/۳



شکل (۱۵): موقعیت قرارگیری توربین‌ها در مزرعه برای دستیابی به مینیمم هزینه و ماکزیمم توان براساس الگوریتم ژنتیک اجتماعی با ضرایب α برابر ۰/۷ و β برابر ۰/۳

جدول (۱): مقایسهٔ چیدمان‌های متفاوت در مزرعهٔ بادی

	توان (وات)	هزینه (دلار)	حالت ترکیبی (α =0.7 و β=0.3)	حالت ترکیبی (α =0.5 و β=0.5)	حالت ترکیبی (α =0.3 و β=0.7)
استقرار نوع اول	۱۱۲۲۲۶۶۴۳۳	۱۶۳۹۴۲	۱/۲۸۶۵	۱/۴۳۲۹	۱/۵۷۹۳
استقرار نوع دوم	۹۲۷۰۶۴۵۰۷	۱۲۸۵۰۰	۱/۳۲۷۱	۱/۳۵۰۸	۱/۳۷۴۵
استقرار نوع سوم	۱۱۴۰۴۵۵۶۹۹	۱۳۶۷۶۷	۱/۱۸۵۲	۱/۲۷۵۳	۱/۳۶۵۵
استقرار نوع چهارم	۱۰۴۳۱۵۲۳۷۴	۱۵۵۵۳۹	۱/۳۱۵۵	۱/۴۲۷۳	۱/۵۳۹۰
استقرار نوع پنجم	۱۱۹۷۴۴۳۶۷۲	۱۴۲۱۵۷	۱/۱۶۷۹	۱/۲۷۹۹	۱/۳۹۱۹
استقرار نوع ششم	۴۸۳۲۵۶۳۸۰	۹۱۱۳۲	۲/۰۳۴	۱/۷۳۹۱	۱/۴۴۳۴
الگوریتم ژنتیک	--------	--------	۱/۱۳۸۲	۱/۲۰۳۶	۱/۲۴۲۵
الگوریتم ژنتیک اجتماعی	--------	--------	۱/۰۶۲۴	۱/۱۲۲۶	۱/۱۸۴۶

همچنین در جدول (۱) به ارائهٔ نتایج مقایسات در استقرارهای مختلف و ضرایب مختلف پرداخته شده است. نتایج نشان از کارایی بهتر الگـوریتم ژنتیک اجتماعی نسبت به الگوریتم ژنتیک معمولی و سایر حالات دارد. بـا توجه به بی‌بعد بودن تابع هدف در حالت ترکیبی (رابطهٔ ۹)، در استقرارهای متفاوت با ضرایب α و β یکسان هرچه به عدد کوچکتری دست یـابیم بـه نتیجهٔ بهتری دست یافته‌ایم. با توجه به جدول (۱)، در اسـتقرار نـوع سـوم بیشترین توان را نسبت به استقرارهای دیگر داریم. در استقرار نوع دوم نیـز کمترین هزینه را نسبت به استقرارهای دیگر داریم. در حالـت تـابع هـدف ترکیبی هزینه و توان نیز، استقرار نوع سوم بهترین مقدار را دارد.

اما در استقرار نوع پنجم و ششم که هرکدام به‌ترتیب دارای تابع حالت منفرد ماکزیمم توان و مینیمم هزینه هستند، نتایج بهتر و بهینه‌تر در هر دو حالت نسبت به استقرارهای ذکر شده دارند، به این ترتیب که در استقرار نوع پنجم، بیشترین توان را نسبت به استقرار اول تا چهارم و در استقرار نوع ششم، کمترین هزینه را نسبت به استقرار اول تا چهارم داریم. این حالت برای تابع ترکیبی نیز صدق می‌کند و نتایج حاصل از الگوریتم ژنتیک نسبت به استقرارهای نوع اول تا نوع چهارم مناسب‌تر و بهینه‌تر است.

به همین ترتیب با توجه به اهمیت تابع توان و هزینهٔ هم‌زمان باهم (تابع ترکیبی) و مقایسهٔ الگوریتم ژنتیک و الگوریتم ژنتیک اجتماعی مشخص می‌گردد که نتایج حاصل از شبیه‌سازی الگوریتم ژنتیک اجتماعی تعادل خوبی بین هزینه و انرژی برقرار شده و کارایی بیشتر و تابع هدف بهتری نسبت به الگوریتم ژنتیک دارد. ازاین‌رو، جواب این الگوریتم آرایش بهتری را برای توربین‌ها در مزرعه ارائه می‌دهد. با توجه به نتایج به‌دست‌آمده مشخص می‌گردد که چیدمان بهینهٔ توربین‌ها در مزرعه، سهم بسزایی در توان خروجی مزرعه و کاهش اثر ویک و همچنین کاهش هزینهٔ کابل‌کشی دارد. علاوه‌براین کاهش قیمت خرید توربین بادی و بهبود ظرفیت آن‌ها علاوه بر افزایش توان مزرعهٔ بادی، باعث می‌شود تا هزینهٔ سرمایه‌گذاری احداث مزرعه بادی کاهش یابد و همچنین زمان بازگشت سرمایه کمتری[1] را هم در پی داشته باشد. همچنین انتخاب محل مناسب

1. Payback Period

برای احداث مزرعهٔ بادی (پتانسیل‌سنجی و شناخت دقیق منطقه مورد نظر) و دسترسی آسان آن به شبکهٔ توزیع محلی یا شبکه انتقال باعث افزایش توان خروجی مزرعه و کاهش هزینهٔ کابل‌کشی و تعادل مناسب تابع حالت ترکیبی خواهد شد.

۷. نتیجه‌گیری

تعیین چیدمان بهینهٔ توربین‌ها در مزرعه، تأثیری اساسی برای سرمایه‌گذاری در این بخش دارد. در این مقاله به تعیین آرایش توربین‌ها با هدف بیشینه‌سازی توان خروجی و کمینه‌سازی هزینهٔ اتصال توربین‌ها به یکدیگر پرداخته شده است. علاوه بر این ویژگی‌ها، متفاوت بودن ارتفاع هاب در توربین‌ها و چگالی هوای متغیر نیز در تعیین چیدمان توربین‌ها در نظر گرفته شد. برای حل مسئلهٔ تعیین چیدمان توربین‌ها در مزرعهٔ بادی، از یک الگوریتم به نام الگوریتم ژنتیک اجتماعی برای بهینه‌سازی استفاده شد که دارای سه جمعیت با توابع شایستگی متفاوت است. نتیجهٔ این الگوریتم با چند استقرار پایه و استقرار به‌دست‌آمده از یک الگوریتم ژنتیک مشابه که یک جمعیت دارد و اندازهٔ جمعیت آن سه برابر اندازهٔ جمعیت الگوریتم ژنتیک اجتماعی است، مقایسه گردید. نتایج نشان از برتری الگوریتم ژنتیک اجتماعی در تمام مقایسات دارد. همچنین مقایسهٔ نتایج الگوریتم ژنتیک اجتماعی با چند استقرار پایه نشان از برتری الگوریتم ژنتیک اجتماعی دارد. از سوی دیگر، مقایسهٔ استقرار پایهٔ پنجم و ششم نشان می‌دهد که تمرکز بر روی توان خروجی نسبت به هزینه کابل‌کشی تأثیر بیشتری روی کاهش هزینهٔ کل دارد.

در این مقاله، استقرار توربین‌ها در یک مزرعهٔ مربع‌شکل بررسی شد. اما تعمیم روش این مقاله برای زمین‌های با ابعاد پیچیده و مبهم می‌تواند زمینهٔ تحقیقات دانشمندان در آینده گردد. درنظرگرفتن بخش درآمد حاصل از فروش برق ایجادشده و افزودن تحلیل اقتصادی به مسئله می‌تواند به‌عنوان یک زمینهٔ تحقیقاتی مطرح شود. اضافه‌کردن توابع هدف یا ویژگی‌های دیگر به مسئله، نظیر متفاوت بودن نوع توربین‌ها در مزرعهٔ بادی و همچنین در نظرگیری تابع هدف هزینهٔ متفاوت که در آن علاوه بر هزینهٔ اتصال توربین‌ها به یکدیگر، هزینهٔ توربین‌ها و هزینهٔ ساخت‌وساز و احداث زمین نیز لحاظ گردد، می‌تواند زمینه‌ای دیگر برای تحقیقات آتی محققان و پژوهشگران در زمینهٔ انرژی باشد.

مراجع

[1] Dent, C.M., "*Wind Energy Development In East Asia And Europe*", Asia Europe Journal, Vol. 11, No. 3, pp. 211-230, 2013.

[2] Fokaides, P.A., I.-C. Miltiadous, M.K.-A. Neophytou,L.-P. Spyridou, "*Promotion of wind Energy in Isolated Energy Systems: The Case of the Orites wind farm*", Clean Technologies and Environmental Policy, Vol. 16, No. 3, pp. 477-488, 2013.

[3] Mosetti, G., C. Poloni,B. Diviacco, "*Optimization of Wind Turbine positioning in large windfarms by means of a genetic algorithm*", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 51, No. 1, pp. 105-116, 1994.

[4] Grady, S.A., M.Y. Hussaini,M.M. Abdullah, "*Placement of Wind Turbines Using Genetic Algorithms*", Renewable Energy, Vol. 30, No. 2, pp. 259-270, 2005.

[5] Marmidis, G., S .Lazarou,E. Pyrgioti, "*Optimal Placement of Wind turbines in aWind park Using Monte Carlo simulation*", Renewable Energy, Vol. 33, No. 7, pp. 1455-1460, 2008.

[6] Castro Mora, J., J.M. Calero Barón, J.M. Riquelme Santos,M. Burgos Payán, "*An Evolutive Algorithm for Wind Farm Optimal Design*", Neurocomputing, Vol. 70, No. 16–18, pp. 2651-2658, 2007.

[7] Gonzalez, J.S., A.G.G. Rodriguez, J.C. Mora, J.R. Santos,M.B. Payan. A New Tool For Wind Farm Optimal Design. In PowerTech, 2009 IEEE Bucharest. 2009.

[8] Aghajani, H., M. Fattahi Moghaddam, H. Akbari,M. Tattahi, "*Site Selection of Wind Turbines Based on Space Environmental Assessment (Case Study: Khorasan Razavi)*", *2*, Vol. 18, No. 1, pp. 85-99, 2015.

[9] Wan, C., J. Wang, G. Yang, H. Gu,X. Zhang, "*Wind farm Micro-Siting by Gaussian Particle Swarm Optimization with local Search Strategy*", Renewable Energy, Vol. 48, No. 1, pp. 276-286, 2012.

[10] Ekonomou, L., S. Lazarou, G.E. Chatzarakis,V. Vita, "*Estimation of Wind Turbines Optimal Number And Produced Power in a Wind Farm Using an Artificial Neural Network Model*", Simulation Modelling Practice and Theory, Vol. 21, No. 1, pp. 21-25, 2012.

[11] Eroğlu, Y.,S.U. Seçkiner, "*Design of Wind Farm Layout Using ant colony Algorithm*", Renewable Energy, Vol. 44, No. 1 ,pp. 53-62, 2012.

[12] Sheikhhoseini, m.,R. fadaeinedjad2, "*Optimal Wind Turbines Placement for a Wind Farm in Milnader Region*", *Energy: Engineering & Managment*, Vol. 3, No. 4, pp. 14-23, 2014.

[13] Serrano Gonzalez, J., M. Burgos Payan,J. Riquelme Santos, "*A New and Efficient Method for Optimal Design of Large Offshore Wind Power Plants*", *Power Systems, IEEE* Transactions on, Vol. 28, No. 3, pp. 3075-3084, 2013.

[14] Shakoor, R., M.Y. Hassan, A. Raheem, N. Rasheed,M.N. Mohd Nasir. Wind Farm Layout Optimization By Using Definite Point Selection And Genetic Algorithm. In Power And Energy (PECon), 2014 IEEE International Conference On. 2014.

[15] Song, M.X., K. Chen, X. Zhang,J. Wang, "*The lazy Greedy Algorithm for Power Optimization of Wind Turbine Positioning on Complex Terrain*", Energy, Vol. 80, No. 1, pp. 567-574, 2015.

[16] Rahbari, O., M. Vafaeipour, F. Fazelpour, M. Feidt,M.A. Rosen, "*Towards Realistic Designs of Wind Farm layouts: Application of a Novel Placement Selector Approach*", Energy Conversion And Management, Vol. 81, No. 1, pp.

242-254, 2014.

[17] Song, M., K. Chen, X. Zhang,J. Wang, "*Optimization of Wind Turbine Micro-Siting for Reducing the Sensitivity of Power Generation to Wind Direction*", Renewable Energy, Vol. 85, No. 1, pp. 57-65, 2016.

[18] Hall, J.F., C.A. Mecklenborg, D. Chen,S.B. Pratap, "*Wind Energy Conversion with a Variable-Ratio Gearbox: Design and Analysis*", Renewable Energy, Vol. 36, No. 3, pp. 1075-1080, 2011.

[19] Jensen, N.O., A Note On Wind Generator Interaction. 1983.

[20] Katic, I., J. Højstrup,N.O. Jensen. *A simple model* For Cluster Efficiency. In European Wind Energy Association Conference and Exhibition. 1986.

[21] "Advanced Modeling Topics: Libraries." SAM Help System. Version 2013.9.20.

[22] Wiser, R., 2012 Wind Technologies Market Report. 2014.