

تعیین آرایش بهینه توربین‌ها برای مزرعه بادی در منطقه میل نادر

موسی شیخ‌حسینی^{*1}، روح‌الله فدائی‌نژاد²

¹ کارشناس ارشد دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

sheikhhoseini@yahoo.com

² استادیار دانشکده مهندسی برق و کامپیوتر، دانشگاه تحصیلات تکمیلی و فناوری پیشرفته، کرمان، ایران

rfadaeind@ieee.org

چکیده: امروزه تعیین مکان بهینه توربین‌ها در مزرعه بادی، یکی از دغدغه‌های بزرگ طراحان مزارع بادی است. در این مقاله، هدف تعیین مکان بهینه توربین‌ها در مزرعه است. این کار با بیشتر کردن انرژی خروجی و کمتر کردن هزینه اتصال توربین‌ها به جاده، هزینه کابل کشی برای اتصال به کلکتور و هزینه خرید و نصب توربین‌ها انجام شده است؛ بدین صورت که ابتدا توربین‌ها در مزرعه به گونه‌ای کنار یکدیگر قرار داده شده‌اند که کمترین اثر منفی را روی یکدیگر داشته باشند. در این حالت مشخص شده با تغییر جهت وزش باد توان خروجی چگونه تغییر می‌کند که این کار با ترکیب معادلات ویک (wake) و جهت وزش باد انجام شده است. سپس با ارائه یک مدل ریاضی، هزینه‌های اتصال به جاده و کلکتور بیان شده است. اطلاعات باد مربوط به منطقه میل نادر زابل است که پتانسیل وزش باد زیادی دارد. این اطلاعات به مدت یک سال هر ده دقیقه یک بار اندازه‌گیری شده است. بهینه‌سازی به وسیله الگوریتم جست‌وجوی هارمونی با استفاده از نرم افزار متلب (MATLAB) انجام شده است و برای اثبات صحت بهینه‌سازی نتایج شبیه‌سازی با نتایج حاصله از الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تجمع ذرات و روش مونت کارلو مقایسه شده‌اند.

واژه‌های کلیدی: اثر ویک، مزرعه بادی، انرژی خروجی، هزینه کابل و جاده، الگوریتم جست‌وجوی هارمونی.

1. مقدمه

افزایش نگرانی جهانی از آلودگی سوخت‌های فسیلی و تمام‌شدن آن‌ها باعث توجه بیشتر بشر به تولید انرژی الکتریکی با استفاده از منابع تجدیدپذیر شده است. در میان این منابع، باد به‌علت در دسترس و ارزان‌بودن، بیشترین میزان رشد را دارد.

پس از انتخاب مکان مناسب برای ایجاد مزرعه بادی، نوبت به طراحی مزرعه می‌رسد. نحوه چیدمان و نصب توربین‌ها در مزرعه با توجه به محدودیت زمین و سرمایه، نیاز به محاسبات دقیقی دارد تا بتوان بیشترین انرژی را از نیروگاه به‌دست آورد؛ از این‌رو، تعیین مکان بهینه توربین‌ها در مزرعه یک موضوع مهم است. این کار را اولین بار مستی و همکاران در سال 1994 انجام دادند [1]. آن‌ها با استفاده از الگوریتم ژنتیک دودویی¹ مقدار تابع هدف (هزینه بر واحد انرژی) را کمینه کردند. مدل هزینه‌ای بیان‌شده برای مزرعه یک مدل ساده و تجربی بود. در سال 2005، گریدی و همکاران با بهبود الگوریتم بهینه‌سازی و در نظر گرفتن همان تابع مستی نتایج او را بهبود دادند [2]. در مرجع [3] از همان تابع هدف مستی و گریدی استفاده شده، با این تفاوت که به‌جای الگوریتم ژنتیک، روش ریاضی مونت‌کارلو به‌کار برده شده است. مراجع [4-5] با استفاده از پارامترهای اقتصاد مهندسی، سعی کردند آرایشی برای توربین‌ها بیابند که سود برآمده از ایجاد مزرعه بیشینه شود. در مرجع [6] برخلاف کارهای گذشته، از فضای جست‌وجوی پیوسته برای تعیین آرایش بهینه مزرعه استفاده شد. این بهینه‌سازی به‌وسیله الگوریتم تجمع ذرات با هدف بیشینه‌کردن انرژی خروجی مزرعه صورت گرفته است. در مرجع [7] با انجام یک مطالعه، مدل بهینه و قطر توربین برای یک مزرعه مشخص شد. اکونومو و همکاران با استفاده از شبکه عصبی، تعداد بهینه توربین‌های یک مزرعه را پیدا کردند [8]. چادری و همکاران مکان توربین‌ها در مزرعه را با بهینه‌کردن مدل هزینه‌ای مزرعه، براساس قطر رتور مشخص نمودند [9]. در مرجع [10] با استفاده از الگوریتم کلونی مورچه مکان بهینه توربین‌ها در یک مزرعه دایره‌ای شکل محاسبه شده است. سرانو و همکارانش مکان بهینه توربین‌ها را برای یک مزرعه در دریا² به‌گونه‌ای پیدا کردند که سود برآمده از فروش انرژی، بیشینه شود [11]. هر مزرعه بادی از کنار هم قرار گرفتن تعدادی توربین تشکیل شده است که این توربین‌ها می‌توانند روی یکدیگر اثر منفی بگذارند و باعث کاهش توان خروجی مزرعه شوند. وقتی باد به یک توربین برخورد می‌کند سرعت باد پشت توربین کاهش می‌یابد و یک جریان چرخشی پشت توربین ایجاد

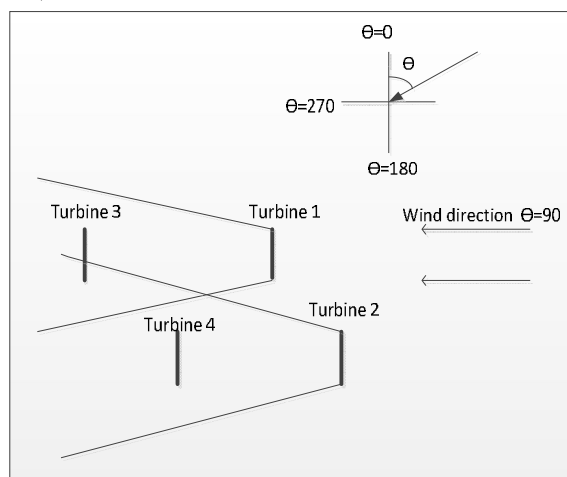
می‌شود، اگر توربین‌های دیگر در مسیر این جریان هوا باشند سرعت در محل این توربین‌ها کاهش می‌یابد، به این پدیده اثر ویک³ می‌گویند می‌گویند [12]. بیش‌تر مقالات منتشرشده در این زمینه، به‌طور کامل، به بررسی ساختار دقیق اثر ویک در مزرعه نپرداخته‌اند و کمتر مقاله‌ای در این زمینه مشخص کرده کدام توربین و چه مقدار در ویک توربین بالادست خود قرار دارد و اینکه با تغییر جهت وزش باد، این ساختار چگونه تغییر می‌کند. در این مقاله، با ارائه یک روش جدید برای هر جهت وزش باد، مقدار قرارگیری توربین‌های پایین‌دست در ویک توربین بالادست خود مشخص شده است. با این کار می‌توان سرعت باد را در هر محل که امکان قرارگیری توربین در مزرعه وجود دارد، محاسبه کرد و آرایش توربین‌ها را به‌گونه‌ای تعیین کرد که انرژی خروجی مزرعه بیشینه شود. بیشتر پژوهش‌های انجام‌شده در این زمینه، مکان بهینه توربین‌ها در مزرعه را با بیشینه‌کردن انرژی خروجی یافته‌اند؛ درحالی‌که هزینه‌های سرمایه‌گذاری مزرعه نقش مهمی در تعیین مکان بهینه توربین‌ها دارند؛ از این‌رو در این مقاله، هزینه‌های سرمایه‌گذاری از جمله خرید و نصب توربین، دسترسی توربین‌ها به جاده اصلی و اتصال توربین‌ها به شبکه الکتریکی در نظر گرفته شده است. هزینه خرید و نصب توربین وابسته به تعداد توربین‌ها، هزینه کابل‌کشی و دسترسی به جاده وابسته به تعداد و مکان توربین‌ها در نظر گرفته شده است. برای کمینه‌کردن این هزینه‌ها از نظریه گراف در ریاضیات کمک گرفته شده است.

با توجه به اینکه در این مقاله، دو مبحث انرژی و هزینه در نظر گرفته شده است، تابع هدف طوری تعریف شده که هم‌زمان با بیشینه‌شدن انرژی خروجی، هزینه‌های مزرعه در کمترین مقدار خود قرار گیرند. در این مقاله، ابتدا در بخش 2 یک مدل کامل از مزرعه بادی ارائه شده که در آن، با ترکیب معادلات ویک و جهت وزش باد، سرعت باد در هر محلی که امکان نصب توربین وجود دارد، محاسبه شده است. سپس در بخش‌های 3 و 4 به بررسی مدل‌های هزینه‌ای اتصال به کلکتور و جاده پرداخته شده است. در بخش 5، تابع هدف تعریف شده است. بخش 6 به بررسی الگوریتم بهینه‌سازی پرداخته است و در انتها نتایج شبیه‌سازی در بخش 7 ارائه شده است.

2. طراحی مزرعه

برای توصیف اثر ویک در مزارع بادی، معمولاً از مدل جنسن⁴ استفاده می‌شود. براساس این مدل که در شکل (2) نشان داده شده است، سرعت کاهش‌یافته با استفاده از رابطه زیر محاسبه می‌شود [13].

مقدار در ویک یک توربین قرار می گیرند، باید مراحل زیر انجام شود:



شکل (2): مدل یک مزرعه بادی

1. با توجه به جدول (1)، دسته بندی توربین ها انجام می شود اگر هر دو شرط موجود در هر سطر جدول با هم برقرار باشد؛ آنگاه توربین j ام می تواند در ویک توربین i ام قرار گیرد.
2. معادله خط عبوری از هر توربین، با توجه به جهت وزش باد و مختصات آن توربین، به صورت زیر محاسبه می شود:

$$y = m(x - X_i) + Y_i \quad (4)$$

به طوری که X_i و Y_i مختصات توربین و m شیب خط است که با توجه به جهت وزش باد محاسبه می گردد.

3. با توجه به شکل (3)، فاصله عمود توربین هایی که شرایط مرحله اول را دارند تا خط گذرنده از توربین i ام (BT_2) محاسبه کرده، سپس طبق قضیه فیثاغورث و با توجه به فاصله بین دو توربین (D_{TIT2})، فاصله توربین اول تا نقطه B (BT_1) محاسبه می شود. حال با توجه به رابطه زیر، شعاع ویک توربین T_1 در نقطه B محاسبه می شود [15].

$$R_w = r + x \tan(\alpha) \quad (5)$$

به طوری که α ضریب زاویه نوک مخروط و همان فاصله توربین اول تا نقطه B است. مقدار $\tan(\alpha)$ برابر با 0/04 در نظر گرفته می شود [11].

4. مقدار K_{TIT2} بنا بر رابطه های زیر محاسبه می گردد:

$$\text{if } (BT_2) > R_w + r_0 \quad \text{then} \quad K_{TIT2} = 0 \quad (6)$$

$$\text{if } (R_w - r_0 < BT_2 < R_w + r_0) \quad \text{then} \quad 0 < K_{TIT2} < 1 \quad (7)$$

$$\text{if } (BT_2 < R_w - r_0) \quad \text{then} \quad K_{TIT2} = 1 \quad (8)$$

که r_0 شعاع رتور توربین و R_w شعاع ویک است.

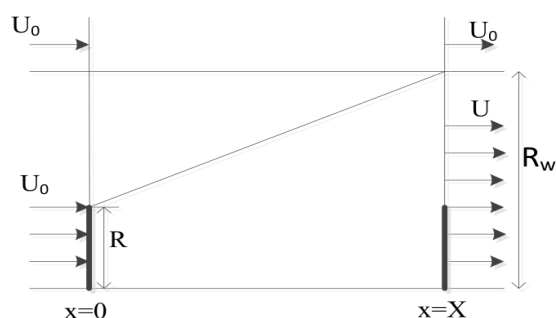
$$U = U_0 \left[1 - \left(1 - \sqrt{1 - C_t} \right) \left(\frac{r}{r + kx} \right)^2 \right] \quad (1)$$

که در آن، U_0 سرعت اولیه، x فاصله بین دو توربین، r شعاع رتور توربین بالادست، C_t ضریب گشتاور و k ثابت گسترش ویک می باشد. گاهی اوقات ممکن است یک توربین در ویک چندین توربین دیگر قرار گیرد. بر طبق نظریه تعادل انرژی جنبشی، سرعت در محل این توربین از رابطه زیر محاسبه می شود [14].

$$U_i = U_0 \left[1 - \sqrt{\sum_{j=1}^N \left(1 - \frac{U_{ij}}{U_0} \right)^2} \right] \quad (2)$$

به طوری که N تعداد توربین ها و U_{ij} سرعت در محل توربین i ام ناشی از ویک توربین j ام است. شکل (2) چهار توربین موجود در یک مزرعه را نشان می دهد. وقتی باد در جهت مشخص می وزد، توربین های 3 و 4 به ترتیب و به طور کامل، در ویک توربین های 1 و 2 قرار دارند. قسمتی از توربین 3 در ویک توربین 4 قرار دارد و توربین های 1 و 2 در ویک یکدیگر قرار ندارند. با تغییر جهت وزش باد در یک مزرعه، توربین های متفاوتی در ویک یک توربین قرار می گیرند. با تعمیم رابطه (2) به صورت زیر، سرعت در محل هر توربین برای هر جهت خاص محاسبه می شود:

$$U_{i\theta} = U_0 \left[1 - \sqrt{\sum_{j=1}^N K_{ij\theta} \left(1 - \frac{U_{ij}}{U_0} \right)^2} \right] \quad (3)$$



شکل (1): شماتیک جنسن

به طوری که θ بیان کننده جهت وزش باد، $U_{i\theta}$ سرعت باد در محل توربین i ام در جهت θ است. $K_{ij\theta}$ نشان دهنده تأثیر توربین j ام در کاهش سرعت توربین i ام در جهت θ است که مقادیر صفر و یک یا عددی بین این دو به خود می گیرد. اگر صفر باشد، یعنی توربین i ام در جهت θ در ویک توربین j ام قرار ندارد. اگر یک باشد، یعنی توربین i ام در جهت θ به طور کامل، در ویک توربین j ام قرار دارد و اگر بین صفر و یک باشد، قسمتی از توربین i ام در جهت θ در ویک توربین j ام قرار دارد. برای تعیین اینکه کدام توربین ها و چه

3. مدل ریاضی برای بهینه‌کردن هزینه کابل بین توربین‌ها

برای اتصال به کلکتور

اتصال مزرعه بادی به سیستم قدرت، به وسیله کلکتور 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 به وسیله یک کابل به کلکتور وصل می‌شود. گروه‌بندی توربین‌ها براساس ظرفیت کابل انجام می‌شود، سپس با پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر بین هر گروه توربین‌ها و کلکتور، طول کابل به دست می‌آید و هزینه آن محاسبه می‌شود. برای این کار، ابتدا باید شیب خط بین توربین‌ها و کلکتور را مانند زیر محاسبه کرد:

$$m_{ic} = \frac{y_i - y_c}{x_i - x_c} \quad (11)$$

$$i = 1, 2, \dots, N$$

y_c و x_c مختصات محل قرارگیری کلکتور، y_i و x_i مختصات توربین i ام و m_{ic} شیب خط بین توربین i ام و کلکتور است. با توجه به ظرفیت کابل به کاررفته، اگر تعداد توربین‌های هر گروه n باشد، تعداد کل دسته‌ها به صورت زیر نتیجه می‌شود:

$$d = \text{ceil}(N / n) \quad (12)$$

که N تعداد کل توربین‌ها، d تعداد دسته‌ها می‌باشد. ceil تابعی می‌باشد که نتیجه را به سمت عدد صحیح بزرگتر از خود گرد می‌کند. برای پیدا کردن مسیر کمینه بین هر دسته از توربین‌ها و کلکتور، از کمینه درخت پوشا استفاده می‌شود. کمینه درخت پوشا به درختی گفته می‌شود که از همه رأس‌ها بگذرد و مجموع ضرایب وزنی شاخه‌ها (هزینه کابل) کمینه باشد. برای پیدا کردن درخت بهینه از روش‌های مختلفی استفاده می‌شود که در این مقاله، از الگوریتم کراسکال¹ استفاده شده است [17].

مراحل الگوریتم کراسکال به صورت زیر است:

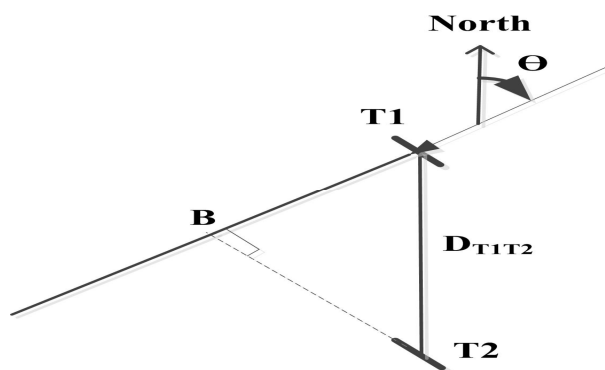
1. در نظر گرفتن تمام رئوس (همه توربین‌های یک گروه و کلکتور)
 2. مرتب کردن شاخه‌ها (هزینه کابل بین رئوس) به صورت صعودی
 3. اضافه کردن شاخه‌ها با هزینه کمتر به بالا به شرط حذف کردن شاخه‌ای که باعث تشکیل حلقه می‌شود.
 4. ادامه این روند تا وقتی که تمام رئوس به هم راه داشته باشند.
- حال با توجه به این الگوریتم کمترین طول کابل برای هر گروه از توربین‌ها پیدا می‌شود.

4. مدل ریاضی برای بهینه‌کردن هزینه جاده بین توربین‌ها

در هر مزرعه بادی، می‌بایست توربین‌ها از طریق جاده به یکدیگر متصل

جدول (1): تقسیم‌بندی جهت باد و مختصات توربین‌ها

$\pi / 4 \leq \theta < 3\pi / 4$	$X_j < X_i$
$3\pi / 4 \leq \theta < 5\pi / 4$	$Y_j < Y_i$
$5\pi / 4 \leq \theta < 7\pi / 4$	$X_j > X_i$
$7\pi / 4 \leq \theta < 9\pi / 4$	$Y_j > Y_i$



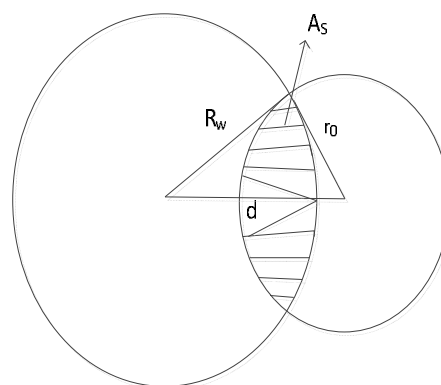
شکل (3): تعیین شعاع و یک در نقطه B

در حالتی که K_{T1T2} بین صفر و یک باشد، بین دو توربین هم‌پوشانی ایجاد می‌شود؛ به عبارتی دیگر، یک توربین اول مقداری از مساحتی را که پره‌های توربین دوم جارو می‌کند، در بر می‌گیرد. در شکل (4)، مساحت ناحیه هاشورخورده، ناحیه هم‌پوشانی بین یک یک توربین و توربین دیگر را نشان می‌دهد که به صورت زیر محاسبه می‌شود [16].

$$A_s = \cos^{-1} \left(\frac{R_w^2 + d^2 - r_0^2}{2R_w d} \right) R_w^2 + \cos^{-1} \left(\frac{d^2 + r_0^2 - R_w^2}{2r_0 d} \right) r_0^2 - \sin \left(\cos^{-1} \left(\frac{R_w^2 + d^2 - r_0^2}{2R_w d} \right) \right) R_w d \quad (9)$$

از رابطه زیر نتیجه می‌شود:

$$K_{T1T2} = \frac{A_s}{\pi \cdot r_0^2} \quad (10)$$



شکل (4): ناحیه هم‌پوشانی بین یک یک توربین و توربین دیگر

6. الگوریتم جست و جوی هارمونی

الگوریتم جست و جوی هارمونی (HSA) الگوریتم فوق ابتکاری جدیدی است که گیم آن را کشف کرد [18]. این الگوریتم بر پایه نت‌های موسیقی ابداع شده و سعی می‌کند با تنظیم پارامترها به هارمونی بهتری دست یابد. این الگوریتم روشی ساده با تعداد پارامتر کم و قابلیت پیاده‌سازی راحت است که پایه آن برای مسئله‌های گسسته می‌باشد. پله‌های اصلی این الگوریتم به صورت زیر هستند [19].

- مقداردهی اولیه مسئله و تعیین پارامترهای الگوریتم
- مقداردهی اولیه حافظه
- ایجاد هارمونی جدید
- بهروزرسانی حافظه
- چک کردن شرط توقف

که این مراحل در قسمت‌های زیر شرح داده شده‌اند:

1.6. مقداردهی اولیه مسئله و تعیین پارامترهای الگوریتم

به طور کلی، هر مسئله بهینه‌سازی شامل یک تابع هدف و تعدادی متغیر و پارامتر می‌باشد و هدف بهینه‌سازی این است که متغیرها را به گونه‌ای بیابد که مقدار تابع هدف در بهینه‌ترین حالت خود قرار گیرد. برای این کار ابتدا باید مقدار پارامترهای بهینه‌سازی را مشخص کرد. از جمله پارامترهای HS که در این مرحله تنظیم می‌شوند، ابعاد حافظه هارمونی¹ (HMS)، نرخ در نظرگیری حافظه هارمونی² (HMCR)، نرخ تنظیم گام³ (PAR)، پهنای باند⁴ (BW) و تعداد تکرار الگوریتم هستند. حافظه هارمونی (HM) محلی برای ذخیره همه جواب‌ها می‌باشد. از پارامترهای HMCR و PAR برای بهبودبخشیدن به پاسخ استفاده می‌شود.

2.6. مقداردهی اولیه حافظه هارمونی

در این مرحله، ماتریس هارمونی با تعدادی هارمونی که به صورت تصادفی تولید شده‌اند، پر می‌شود. هر سطر این ماتریس یک هارمونی و تعداد کل هارمونی‌ها HMS خوانده می‌شود و نحوه پر شدن ماتریس هارمونی به صورت زیر است:

باشند. در این مقاله، یک جاده اصلی در یک طرف مزرعه بادی در نظر گرفته شده است. برای پیدا کردن کوتاه‌ترین مسیر اتصال توربین‌ها به جاده، ابتدا فاصله توربین‌ها با یکدیگر و با جاده اصلی به دست آورده و سپس برای هر توربین، کوتاه‌ترین مسیر اتصال به جاده اصلی، مطابق شکل (5) محاسبه می‌شود. در شکل (5)، یک مزرعه با یک راه اصلی نشان داده شده است که در آن، توربین T_4 کمترین فاصله را تا جاده اصلی دارد؛ بنابراین، این توربین به طور مستقیم به جاده وصل می‌شود. سپس برای توربین بعدی که کمترین فاصله را تا جاده اصلی دارد (T_1) باید بررسی شود از میان دو مسیر T_1 به جاده اصلی و T_1 به T_4 کدام یک کوتاه‌تر است. به همین ترتیب، برای T_2 سه مسیر وجود دارد که باید کوتاه‌ترین انتخاب شود. این روند را باید تا جایی ادامه داد که تمام توربین‌ها به جاده اصلی متصل شوند.

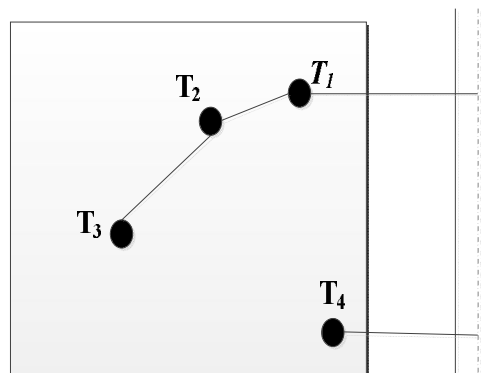
5. تابع هدف

هدف این مقاله ماکزیم کردن انرژی مزرعه بادی و کمینه کردن هزینه خرید و نصب توربین، هزینه اتصال توربین‌ها به جاده اصلی و هزینه ایجاد کابل کشی بین توربین‌ها و کلکتور است. با توجه به اطلاعات باد در طول سال، سرعت متوسط باد در هر جهت و درصدی را که باد در هر جهت می‌وزد، استخراج کرده، سپس با توجه به نمودار سرعت-توان، توان کل مزرعه به صورت معادله زیر محاسبه می‌شود:

$$P = \sum_{\theta=1}^{\theta=360} \sum_{i=1}^{i=N} P_{i\theta} S_{i\theta} \quad (13)$$

$P_{i\theta}$ و $S_{i\theta}$ به ترتیب توان و درصد وزش باد توربین i ام در جهت θ است. اگر هزینه‌های مزرعه شامل هزینه کابل کشی، اتصال به جاده و خرید و نصب توربین باشد، آن گاه می‌توان تابع هدف به صورت زیر تعریف کرد که با کمینه کردن آن، محل بهینه توربین‌ها در مزرعه پیدا می‌شود.

$$(انرژی خروجی سالیانه) / (مجموع هزینه‌ها) = \text{تابع هدف} \quad (14)$$



شکل (5): نحوه اتصال توربین‌ها به جاده اصلی

1. Harmony Memory Size
2. Harmony Memory Considering Rate
3. Pitch Adjusting Rate
4. Band Width

7. شبیه‌سازی نتایج

منطقه میل‌نادر به علت داشتن پتانسیل زیاد وزش باد در طول سال، مکان مناسبی برای ایجاد مزرعه است. به همین دلیل در این مقاله، این منطقه برای مطالعه انتخاب شده است. مدل ویک بیان‌شده در این مقاله، مدل خطی است و این مدل برای فاصله چهار برابر قطر رتور (D) صادق می‌باشد؛ از این رو، کمترین فاصله بین توربین‌ها 4D در نظر گرفته شده است.

بهینه‌سازی روی مزرعه مربعی شکل 4km×4km که به 100 مربع کوچک‌تر تقسیم شده، انجام شده است. هر توربین می‌تواند در مرکز هر مربع قرار گیرد و فاصله مرکز دو مربع از یکدیگر 400 متر است. مشخصات توربین استفاده‌شده در این مقاله، در جدول (2) آمده است. مقدار C_t برابر با 0/8 در نظر گرفته شده است. نمودار توان بر حسب سرعت نیز در شکل (7) نشان داده شده است. پارامترهای الگوریتم HS بدین صورت تنظیم شده‌اند ($HMS=5$, $HMCR=0/9$, $PAR_{max}=1$, $PAR_{min}=0/2$, $bw_{min}=0/003$, $bw_{max}=3$).

هزینه اتصال به جاده و کلکتور وابسته به تعداد و مکان قرارگیری توربین‌ها در نظر گرفته شده است؛ درحالی‌که هزینه خرید و نصب توربین‌ها فقط وابسته به تعداد توربین‌ها فرض شده است. برای اتصال توربین‌ها به کلکتور، با توجه به ظرفیت کابل ارتباطی، حداکثر تعداد توربین‌های موجود در هر گروه، پنج در نظر گرفته شده است ($n=5$). تعداد متغیرهای مسئله برابر با تعداد مربع‌های کوچک است که برابر با 100 می‌باشد. نتایج شبیه‌سازی تعداد 15 توربین را که به صورت شکل (8) آرایش یافته‌اند، نشان می‌دهد. شکل (9)، نحوه احداث راه بین توربین‌ها برای آرایش بهینه را نشان می‌دهد. شکل (10) نحوه اتصال توربین‌های هر دسته به کلکتور را با استفاده از درخت بهینه پوشا نشان می‌دهد. شکل (11) روند همگرایی الگوریتم بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

$$\begin{bmatrix} X_1^1 & X_2^1 & \dots & X_{N-1}^1 & X_N^1 \\ X_1^2 & X_2^2 & \dots & X_{N-1}^2 & X_N^2 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ X_1^{HMS} & X_2^{HMS} & \dots & X_{N-1}^{HMS} & X_N^{HMS} \end{bmatrix} \quad (15)$$

3.6. ایجاد هارمونی جدید

هارمونی جدید $X' = (X'_1, X'_2, \dots, X'_{N-1}, X'_N)$ براساس سه ملاک: در نظر گرفتن حافظه، تنظیم گام و انتخاب تصادفی در حافظه متغیر تولید می‌شود. HMCR که بین صفر تا یک تغییر می‌کند، نرخ انتخاب یکی از مقادیر ذخیره‌شده در حافظه را نشان می‌دهد. هارمونی جدید از مقایسه اعداد رندوم تولید شده با پارامترهای HMCR و PAR تولید می‌گردد [20].

برای افزایش کارایی الگوریتم، PAR و bw در طول هر تکرار متغیر در نظر گرفته می‌شوند.

$$PAR(t) = PAR_{min} + \frac{PAR_{max} - PAR_{min}}{it_{max}} \times it \quad (16)$$

$$bw(t) = bw_{max} \exp(c \cdot it) \quad (17)$$

$$c = \frac{\ln(bw_{max}/bw_{min})}{it_{max}} \quad (18)$$

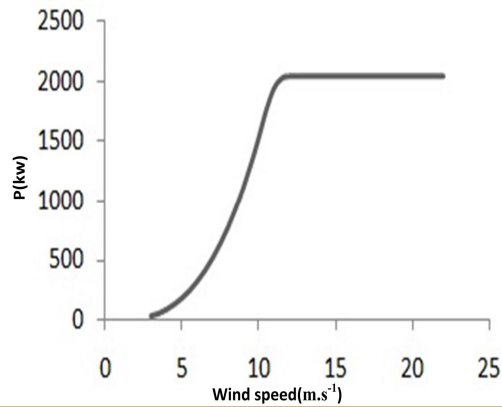
به طوری‌که PAR_{max} بیشترین و PAR_{min} کمترین مقدار نرخ تنظیم گام، bw_{max} نشان‌دهنده بیشترین و bw_{min} کمترین مقدار پهنای باند هستند. it_{max} تعداد کل تکرارها و it شماره تکرار است.

4.6. به روزرسانی حافظه

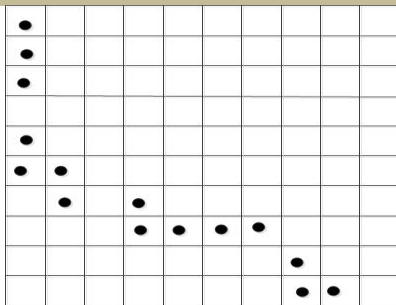
اگر هارمونی جدید تابع هدف بهتری نسبت به بدترین هارمونی موجود در حافظه داشته باشد، جایگزین آن می‌شود.

5.6. چک کردن شرط توقف

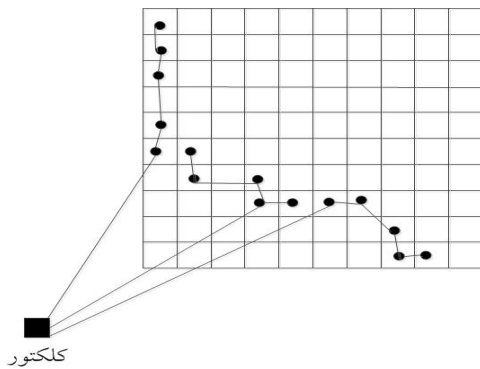
در صورت برقراری شرط توقف، الگوریتم پایان می‌یابد و در غیر این صورت، گام‌های 3 و 4 تکرار می‌شوند. مراحل این الگوریتم در شکل (6) نشان داده شده است.



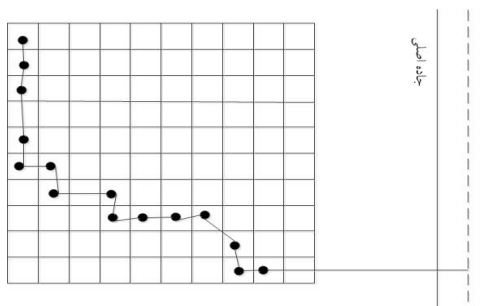
شکل (7): نمودار توان خروجی توربین بر حسب سرعت باد



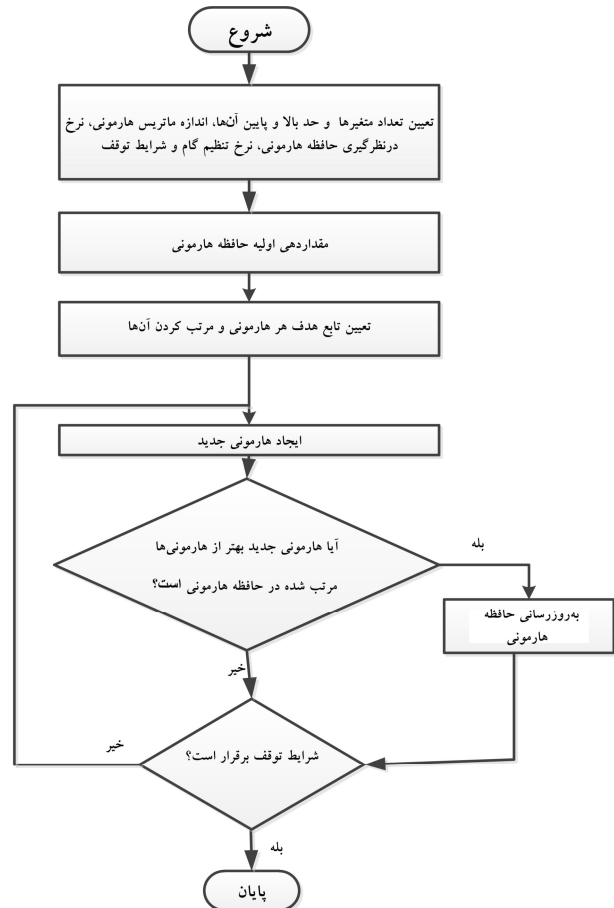
شکل (8): نحوه چیدمان توربین‌ها در مزرعه بادی



شکل (9): نحوه کابل کشی بین توربین‌ها و کلکتور



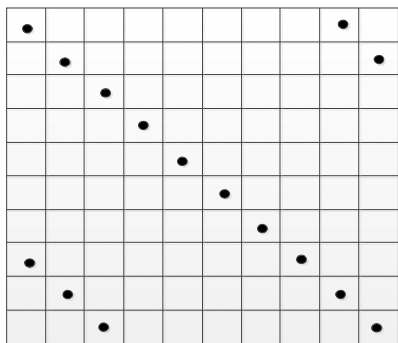
شکل (10): طریق اتصال توربین‌ها به جاده اصلی



شکل (6): فلوچارت الگوریتم HS

جدول (2): مشخصات توربین بادی

سرعت نامی (m.s^{-1})	11
سرعت قطع بالا (m.s^{-1})	22
سرعت قطع پایین (m.s^{-1})	3
توان نامی (kw)	2156
ارتفاع توربین (m)	80
قطر رتور (m)	93.4



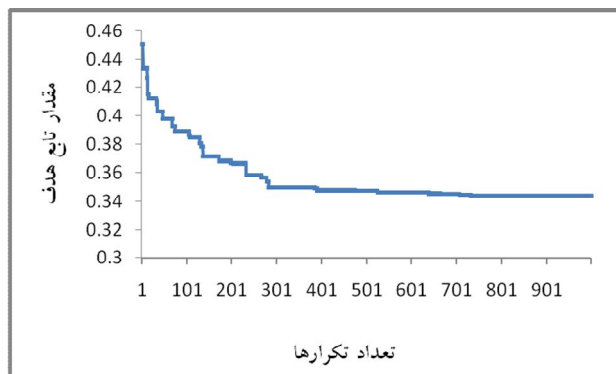
شکل (14): چیدمان سوم

در جدول (3) نتایج چیدمان‌ها، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تجمع ذرات و روش مونت کارلو با آرایش بهینه بیان شده در این مقاله، مقایسه شده‌اند.

جدول (3): مقایسه چیدمان‌های متفاوت در مزرعه

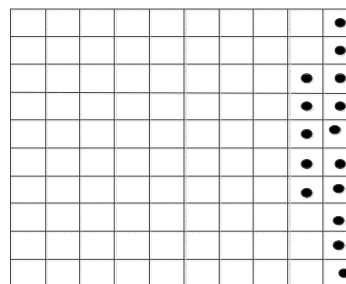
تابع هدف	هزینه جاده (دلار)	هزینه کابل (دلار)	انرژی خروجی سالانه (kwh)	
0/409	$\times 10^5$	$\times 10^6$	$\times 10^8$	چیدمان اول
0/4663	$\times 10^5$	$\times 10^6$	$\times 10^7$	چیدمان دوم
0/3709	$\times 10^5$	$\times 10^6$	$\times 10^8$	چیدمان سوم
0/3677	$\times 10^5$	$\times 10^6$	$\times 10^8$	الگوریتم ژنتیک
0/3701	$\times 10^5$	$\times 10^6$	$\times 10^8$	الگوریتم تجمع ذرات
0/3883	$\times 10^5$	$\times 10^6$	$\times 10^8$	روش مونت کارلو
0/3438	$\times 10^5$	$\times 10^6$	$\times 10^8$	الگوریتم جست‌وجوی هارمونی

برای چیدمان اول هزینه اتصال توربین‌ها به جاده نسبت به چیدمان‌های دیگر کمتر است؛ اما در عوض انرژی خروجی کم و هزینه کابل زیاد است. برای چیدمان دوم که توربین‌ها نزدیک کلکتور قرار گرفته‌اند، هزینه کابل کاهش یافته؛ اما هزینه اتصال به جاده، به علت وجود فاصله زیاد بین توربین‌ها و جاده اصلی افزایش یافته است. مقدار انرژی خروجی در این حالت، به علت وجود فاصله کم میان توربین‌ها، کاهش

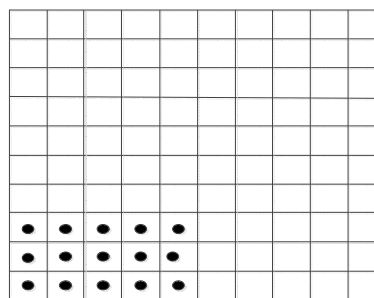


شکل (11): روند همگرایی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی

برای نشان دادن بهینه بودن آرایش توربین‌ها، نتایج برآمده از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی با چند چیدمان دیگر با همین تعداد توربین، الگوریتم ژنتیک¹ (GA)، الگوریتم تجمع ذرات² (PSO) و روش مونت کارلو³ (MCM) مقایسه شده است. در چیدمان نوع اول، مطابق شکل (12) توربین‌ها نزدیک جاده اصلی قرار داده شده‌اند. شکل (13) چیدمان نوع دوم را براساس نزدیکی به کلکتور نشان می‌دهد. در شکل (14) توربین‌ها در جهت غالب باد آرایش یافته‌اند.



شکل (12): چیدمان اول



شکل (13): چیدمان دوم

1. Genetic Algorithm
2. Practice Swarm Optimization
3. Monte Carlo Method

الگوریتم، دارای کمترین مقدار است؛ از این رو، جواب این الگوریتم بهینه‌ترین آرایش را برای توربین‌ها ارائه می‌دهد.

8. نتیجه‌گیری

تعیین چیدمان بهینه توربین‌ها در مزرعه، یک رکن اساسی برای سرمایه‌گذاران در این بخش است. در این مقاله، سعی شده است آرایشی برای توربین‌ها بیان شود که در آن، هزینه‌هایی از قبیل اتصال به جاده، کابل‌کشی کلکتور و خرید و نصب توربین، به کمترین مقدار خود برسد؛ در عین حال، مقدار توان خروجی در بیشترین مقدار خود قرار گیرد. از الگوریتم جست‌وجوی هارمونی برای بهینه‌سازی استفاده شده است. مقایسه نتایج شبیه‌سازی با چیدمان‌های دیگر، الگوریتم ژنتیک، الگوریتم تجمع ذرات و روش مونت‌کارلو صحت بهینه‌سازی را نشان می‌دهد.

یافته است. در چیدمان سوم، به علت کم شدن تلفات و یک، انرژی خروجی افزایش یافته است. برای الگوریتم ژنتیک انرژی خروجی مزرعه نسبت به چیدمان‌ها افزایش یافته است و هزینه‌های سرمایه‌گذاری در حد معقولی قرار گرفته‌اند. در این حالت، به علت استفاده از یک الگوریتم بهینه‌سازی کارا، تعادل خوبی بین هزینه و انرژی برقرار شده است. نتایج شبیه‌سازی به وسیله الگوریتم تجمع ذرات حاکی از آن است که این الگوریتم نسبت به الگوریتم ژنتیک برای تابع هدف تعریف شده دارای کارایی کمتری است؛ ولی نسبت به چیدمان‌های ارائه شده دارای تابع هدف بهتری است. با استفاده از روش مونت‌کارلو، مقدار تابع هدف در وضعیت مناسبی قرار ندارد و حتی از چیدمان سوم نیز بیشتر است. طبق نتایج شبیه‌سازی الگوریتم جست‌وجوی هارمونی دارای بیشترین انرژی خروجی است و مقدار تابع هدف برآمده از این

مراجع

- [1] Mosetti, G. Poloni, C. Diviacco, B. "Optimization of Wind Turbine Positioning In Large Windfarms by Means of a Genetic Algorithm", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Vol. 51, pp. 105-116, 1994.
- [2] Grady, S. Hussaini, M. Abdullah, M. "Placement of Wind Turbines Using Genetic Algorithms", Renewable Energy, Vol. 30, pp. 259-270, 2005.
- [3] Marmidis, G. Lazarou, S. Pyrgioti, E. "Optimal Placement of Wind Turbines in a Wind Park Using Monte Carlo Simulation", Renewable Energy, Vol. 33, pp. 1455- 1460, 2008.
- [4] Castro Mora, J. Calero Barón, M. Riquelme Santos, M. Burgos Payán, M. "An Evolutive Algorithm for Wind Farm Optimal Design", Neurocomputing, Vol. 70, pp. 2651-2658, 2007.
- [5] González, J. S., Rodríguez, A.G., Mora, J.C., Santos, J.R Payán, M. "A New Tool for Wind Farm Optimal Design", in PowerTech, 2009 IEEE Bucharest, pp.1-7, 2009.
- [6] Wan, C. Wang, J. Yang, G. Gu, H. Zhang, X. "Wind Farm Micro-Siting by Gaussian Particle Swarm Optimization With Local Search Strategy", Renewable Energy, Vol. 48, pp.276-286, 2012.
- [7] Mustakarov, I. , Borissova, D., "Wind Turbines Type and Choice Using Combinatorial Optimization ", Renewable Energy, Vol. 35, pp. 1887-1894, 2010.
- [8] Ekonomou, L., Lazarou, S., Chatzarakis, G., Vita, V., "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, pp. 21-5, 2012.
- [9] Chowdhury, S., Zhang, J., Messac, A., Castillo, L., "Unrestricted wind Farm Layout Optimization(UWFLO): Investigating Key Factors Influencing Maximum Power Generation", Renewable Energy, Vol.38, pp. 16-30, 2012.
- [10] Eroğlu, Y., Seçkiner, S.U., "Design of Wind Farm Layout Using Ant Colony Algorithm", Renewable Energy, pp. 53-62, 2012.
- [11] Serrano-González, J., Burgos-Payan M., Riquelme- Santos, J., "A New and Efficient Method for Optimal Design of Large Offshore Wind Power Plants". IEEE Transactions on Power System, pp. 75 – 84, 2013.
- [12] El-Shimy., "Optimal Site Matching of Wind Turbine Generator: Case Study of the Gulf of Suez Region in Egypt", Renewable Energy, Vol. 35, pp. 1870-1878, 2010.
- [13] Emami, A., Noghreh P., "New Approach on Optimization in Placement of Wind Turbines Within Wind Farm by Genetic Algorithm" Renewable Energy, pp. 59 –64, 2010.
- [14] Kim, H., Singh, C., Sprintson, A., "Simulation and Estimation of Reliability in a Wind Farm Considering the Wake Effect", Sustainable Energy, IEEE Transactions on, Vol. 3, pp. 274-282, 2012.
- [15] Han, X., Guo, J., Wang, P., Ji, Y., "Adequacy Study of Wind Farms Considering Reliability and Wake Effect of WTGs," In Power and Energy Society General Meeting, IEEE, pp. 1-7, 2011.
- [16] Ma, Y., Yang, H., Zhou, X., Li, J., H. Wen, "The Dynamic Modeling of Wind Farms Considering Wake Effects and Its Optimal Distribution," In World Non-Grid-Connected Wind Power and Energy Conference, WNWE, pp. 1-4, 2009.
- [17] Campos, R., Icardo, M., "A Fast Algorithm for Computing Minimum Routing Cost Spanning Tree", Computer Network, pp. 3229-3247, 2008.
- [18] Geem, Z. W., Kim, J. H., Loganathan, G., "A New Heuristic Optimization Algorithm: Harmony Search," Simulation, Vol. 76, pp. 60-68, 2001.
- [19] Srinivasa Rao, R., Narasimham, S. V. L. Ramalinga, M., Srinivasa Rao, A., "Optimal Network Reconfiguration of

Large-Scale Distribution System Using Harmony search Algorithm," IEEE Transactions on Power Systems , Vol. 26, pp. 1080-1088, 2011.

- [20] Askarzadeh, A. Rezazadeh, A., "An Innovative Global Harmony Search For Parameter Identification of a Pem

Fuel cell model," IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 59, No. 9, pp. 3473-3480, 2012.