

بهینه‌سازی آرایش مزرعه بادی با تأکید بر اثر سایه

ایوب فرجی‌پور، فرامرز فقیهی و رضا شریفی

پیاده‌سازی الگوریتم سردشدن تدریجی را برای موضوع مذکور تحلیل نموده‌اند. از ترک و نورمن [۱۱] WFLOP پیوسته و گسسته را مقایسه کرده‌اند و در تحقیق آنها استفاده از مدل مکان پیوسته بهتر از مدل گسسته ارزیابی شد. آنها ۶ آزمون مسئله را با وسعت مکان‌های مختلف و استفاده از یک الگوریتم جستجوی حریص طرح‌ریزی کرده‌اند [۱۱].

تولید انرژی سالانه به وسیله بهینه‌سازی طراحی آرایش مزارع بادی و کاهش اثر سایه، بهبود یافته است. در این مقاله روشی جدید با ترکیب الگوریتم مورچگان و الگوریتم ژنتیک برای حل WFLOP ارائه شده است. هدف اصلی از این مقاله بررسی ترکیب روش‌های جستجوی هوشمند در بهینه‌سازی طراحی آرایش مزرعه باد می‌باشد. اثربخشی طرح پیشنهادی بر روی مدل انرژی خروجی [۴] و [۵] که کاهش اثر سایه بر اساس مکان‌های توربین محاسبه می‌شود- نشان داده شده و نتایج با الگوریتم استراتژی تکاملی بهبود یافته [۵] و الگوریتم مورچگان [۴] مقایسه شده است.

چکیده: احداث مزارع بادی برای جذب انرژی باد به عنوان یکی از انرژی‌های تجدیدپذیر در سراسر دنیا در حال افزایش است و هدف از بهینه‌سازی آرایش مزارع بادی جذب حداکثر انرژی از مزارع بادی می‌باشد. در این مقاله یک الگوریتم ترکیبی جدید برای به حداکثر رساندن انرژی خروجی مورد انتظار، ارائه شده است. هدف الگوریتم کاهش اثر سایه بر اساس مکان‌های توربین باد و جهت باد می‌باشد. مدل پیشنهادی با سناریویی از سرعت باد و جهت توزیع آن از سایت بادی نشان داده شده و با الگوریتم استراتژی تکاملی و الگوریتم مورچگان در شش مرحله جانمایی مقایسه شده است. نتایج نشان می‌دهد که ترکیب الگوریتم مورچگان و الگوریتم ژنتیک اجرای بهتری را از استراتژی‌های موجود بر حسب حداکثر مقادیر انرژی خروجی مورد انتظار و کاهش اثر سایه دربردارد.

کلید واژه: الگوریتم‌های بهینه‌سازی، انرژی‌های نو، توربین بادی، مزرعه بادی، طراحی جانمایی.

۱- مقدمه

ظرفیت نصب‌شده انرژی باد در سراسر جهان به ۱۹۶۶۳۰ مگاوات رسیده [۱] که سهم ایران ۹۱ مگاوات می‌باشد [۲]. مطالعات در مورد برآورد پتانسیل انرژی باد در بیش از ۴۵ مکان مناسب، نشان می‌دهد که حداقل پتانسیل انرژی باد ایران ۶۵۰۰ مگاوات است [۳]. هدف از بهینه‌سازی آرایش مزارع بادی (WFLOP) به حداقل رساندن کاهش اثرات توربین‌ها بر روی یکدیگر و افزایش توان خروجی می‌باشد. تحقیقات بسیاری با استفاده از الگوریتم‌های هوشمند به حل مسئله WFLOP پرداخته‌اند. اروگلو و سکینر [۴] از یک الگوریتم مورچگان برای WFLOP با سه سناریوی مختلف از سرعت و جهت باد استفاده کرده‌اند. کوسیک و سانگ [۵] از یک الگوریتم استراتژی تکاملی برای WFLOP با متغیر پیوسته برای مکان‌های توربین بهره برده‌اند. وانگر و همکارانش [۶] استفاده از الگوریتم جدید جستجوی محلی مسایل خاص را برای کاهش اثر سایه و بهینه‌سازی آرایش توربین‌ها تحلیل و بررسی نموده‌اند. سون و همکارانش [۷] با استفاده از الگوریتم ژنتیک به پیش‌بینی فاصله بهینه بین توربین‌ها برای افزایش راندمان مزارع بادی پرداخته‌اند. مورا و همکارانش [۸] چگونگی کارایی الگوریتم ژنتیک برای به حداکثر رساندن تابع اقتصادی را مطالعه کرده‌اند. همچنین مورا و همکارانش [۸] و گنزالس و همکارانش [۹] از الگوریتم تکامل استفاده کرده‌اند. بیلباتو و آلبا [۱۰] بر روی همان مسئله و شرایط آن مشغول به کار بوده‌اند و همچنین

۲- تعریف مسئله و روش

مسئله بهینه‌سازی آرایش مزارع بادی فرضیاتی به شرح زیر دارد:

(۱) تعداد توربین‌ها در مزرعه به خاطر ظرفیت توان مزرعه- که به طور کلی در آغاز سرمایه‌گذاری برنامه‌ریزی شده است- ثابت هستند. بنابراین در این مدل، تعداد توربین‌ها (Nt) متغیر نیست.

(۲) معرفی جانمایی توربین‌ها با مختصات دکارتی (x, y) 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 $(x_i, y_i), i = 1, 2, \dots, Nt$.

(۳) همه توربین‌های بادی دارای مشخصات مشابه (به عنوان مثال توان اسمی، منحنی توان، نام تجاری، مدل و ارتفاع هاب) در مزرعه هستند به طوری که مزرعه همگن است.

(۴) برای یک مکان، ارتفاع و جهت خاص، سرعت باد V مطابق توزیع وایبل $p_v(v, k, c) = (k/c)(v/c)^{k-1} e^{-(v/c)^k}$ است که در آن K پارامتر شکل، C پارامتر مقیاس و $p_v(v, k, c)$ تابع چگالی احتمال است. این فرض برای بسیاری از سایت‌های بادخیز در درازمدت، لحاظ می‌شود [۱۲].

(۵) سرعت باد به عنوان یک پارامتر از تابع توزیع وایبل داده شده و آن تابع پیوسته‌ای از جهت باد θ است $(k = k(\theta), c = c(\theta), 0^\circ \leq \theta \leq 360^\circ)$. در یک مزرعه بادی،

سرعت‌های باد در نقاط مختلف با جهت‌های مشابه، پارامترهای وایبل یکسان دارند. جهت باد یکی از متغیرهای مهم برای WFLOP است و تصویری از جهت باد در شکل ۱ برای مدل حاضر نشان داده شده که در آن به طور دلخواه صفر درجه شرق و ۹۰ درجه به طور دلخواه شمال است.

(۶) باید فضای کافی بین هر دو توربین به منظور کاهش برخی از بارهای خطرناک بر روی توربین مانند تلاطم باد وجود داشته باشد.

این مقاله در تاریخ ۱۴ آبان ماه ۱۳۹۲ دریافت و در تاریخ ۱۱ تیر ماه ۱۳۹۳ بازنگری شد.

ایوب فرجی‌پور، دانشکده مهندسی برق، دانشگاه آزاد اسلامی پردیس علوم و تحقیقات هرمزگان، گلشهر بندرعباس، (email: a.farajipur@srbiau.ac.ir).

فرامرز فقیهی، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات تهران، تهران، (email: faramarz_faghihi@hotmail.com).

رضا شریفی، گروه برق، دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب، تهران، (email: sharifi@iust.ac.ir).

1. Wind Farm Layout Optimization Problem

که در آن $Velocitydeficit_{ij}$ کسری سرعت در توربین i به دنبال توربین j ، v_{up} سرعت باد اصلی، v_{down} سرعت باد بعد از تضعیف، c_i ضریب نیروی پیش‌ران، k ثابت انتشار سایه، d فاصله بین توربین i و j طرح‌شده در جهت وزش باد θ و شعاع توربین است. اگر یک توربین تحت تأثیر بیش از یک توربین دیگر باشد، کل اثر سایه بر روی توربین i توسط معادله زیر محاسبه می‌شود

$$Velocitydeficit_i = \sqrt{\sum_{j=1, j \neq i}^{N_t} Velocitydeficit_{ij}^2} \quad (2)$$

همان طور که می‌توان در (۱) و (۲) دید، سرعت باد توسط اثر سایه در جهت وزش باد پیش‌بینی شده کاهش می‌یابد و می‌توان بیان کرد که کسری سرعت تابعی از θ و مکان‌های توربین (x, y) است. همان طور که سرعت باد به عنوان یک پارامتر از تابع توزیع وایبل داده می‌شود، تنها پارامتر مقیاس C تحت تأثیر اثر سایه قرار خواهد گرفت که توسط معادله زیر محاسبه می‌شود

$$c_i(\theta) = c(\theta) \times Velocitydeficit_i, \quad i = 1, 2, \dots, N_t \quad (3)$$

۲-۲ مدل توان

بر اساس مدل انرژی خروجی [۵]، کل توان تولیدی از توربین i واقع در (x, y) و جهت باد θ توسط (۴) محاسبه می‌شود که P_i توان خروجی از توربین i ام، λ پارامتر ناهمواری زمین، I_{pt} پارامتر حایل شدن، v سرعت باد در توربین i ام با توجه به جهت باد در زاویه a ، V_{cutin} سرعت باد شروع در توربین (که به نام سرعت راه‌اندازی تولید انرژی نیز نامیده شده است) و V_{rated} حد مجاز سرعت باد است. به عبارت دیگر تولید توان پایدار (P_{rated}) توربین بین V_{rated} و سرعت قطع (V_{cutout}) می‌باشد. در این مطالعه، جهت باد θ از ۰ تا ۳۶۰ درجه در نظر گرفته شده و سرعت باد V از ۳/۵ m/s تا ۱۴ m/s (V_{rated}) است. زاویه جهت باد به ۲۳ قسمت با فواصل ۱۵ درجه و همچنین سرعت باد به ۲۰ قسمت با فواصل ۰/۵ m/s تقسیم شده و N_θ تعداد فواصل جهت باد، N_v تعداد فواصل سرعت باد و W_{i-1} احتمال وزش باد در فاصله $l-1$ جهت باد است.

کل توان خروجی مزرعه P_f توسط (۵) محاسبه می‌شود

$$P_f = \sum_{i=1}^{N_t} P_i \quad (5)$$

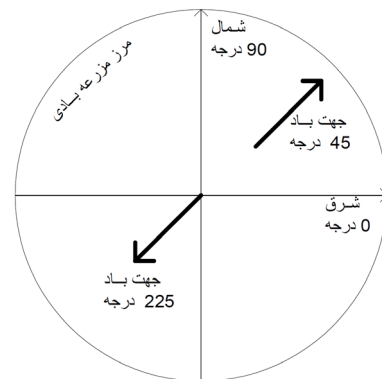
هدف، پیش‌بینی نمودن توان خروجی مزرعه باد با توجه به پیش‌فرض‌های ششم و هشتم است و این توسط مدل ریاضی (معادله (۶)) نشان داده شده است

$$\max \sum_{i=1}^{N_t} P_i$$

s.t. $(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \leq 64R^2, \quad i, j = 1, 2, \dots, N_t, i \neq j$ (6)

$$P_i = \lambda \sum_{j=1}^{N_t+1} \frac{v_{j-1} + v_j}{2} \sum_{l=1}^{N_{\theta+1}} \{ (\theta_l - \theta_{l-1}) \omega_{l-1} \left\{ e^{-\frac{v_{j-1}}{c_i} \frac{k(\theta_l + \theta_{l-1})}{2}} - e^{-\frac{v_j}{c_i} \frac{k(\theta_l + \theta_{l-1})}{2}} \right\} + \frac{V_{rated}}{c_i} \frac{k(\theta_l + \theta_{l-1})}{2} \left\{ e^{-\frac{V_{rated}}{c_i} \frac{k(\theta_l + \theta_{l-1})}{2}} - e^{-\frac{V_{cutin}}{c_i} \frac{k(\theta_l + \theta_{l-1})}{2}} \right\} \}$$

$$P_{rated} \sum_{j=1}^{N_{\theta+1}} (\theta_l - \theta_{l-1}) \omega_{l-1} \left\{ e^{-\frac{V_{rated}}{c_i} \frac{k(\theta_l + \theta_{l-1})}{2}} - e^{-\frac{V_{cutin}}{c_i} \frac{k(\theta_l + \theta_{l-1})}{2}} \right\} + \eta \sum_{l=1}^{N_{\theta+1}} \{ (\theta_l - \theta_{l-1}) \omega_{l-1} \left\{ e^{-\frac{V_{rated}}{c_i} \frac{k(\theta_l + \theta_{l-1})}{2}} - e^{-\frac{V_{cutin}}{c_i} \frac{k(\theta_l + \theta_{l-1})}{2}} \right\} \}$$
(4)



شکل ۱: مرکز مزرعه بادی و جهت‌های سرعت باد (مرجع [۲]).

از آنجا که این موضوع می‌تواند یکی از محدودیت‌های پیچیده مسئله تلقی شود، در این مطالعه حداقل فاصله بین دو توربین چهار برابر قطر روتور لحاظ می‌شود. اگر شعاع روتور توربین R باشد، هر دو توربین که در (x_i, y_i) و (x_j, y_j) مکان‌یابی شده‌اند باید نامساوی $(x_i - x_j)^2 + (y_i - y_j)^2 \leq 64R^2$ را ارضا کنند.

(۷) در مسایل بهینه‌سازی جانمایی، باید تصویری از مرکز جانمایی مزرعه شرح داده شود و بنابراین یک شکل مزرعه باد دایره‌ای به عنوان یک مرکز در مدل انتخاب شده است (شکل ۱).

(۸) توربین باید در مزرعه باشد و این فرض از روی هندسه مسئله با معادله $x_i^2 + y_i^2 \leq r^2$ تضمین می‌شود که r شعاع دایره مزرعه و برابر ۵۰۰ متر و مختصات دکارتی برای توربین i ام است. مرکز مزرعه بر روی سیستم مختصات $(0, 0)$ می‌باشد.

(۹) فضای جستجوی مسئله، متغیرهای مختصات پیوسته دارد و آن را با شکل مزرعه باد محدود کرده است.

(۱۰) مدل ریاضی مسئله در دو بخش ساخته شده است. بخش اول، اثر سایه که ممکن است باعث تولید توان کمتر از توربین‌های پایین‌دست شود و بخش دوم، مدل توان خروجی است.

(۱۱) هدف به حداکثر رساندن توان خروجی است به طوری که اثر سایه را می‌توان با توجه به مفروضات ششم و هشتم حداقل کرد.

۲-۱ مدل اثر سایه (The Wake Effect Model)

مزارع بادی برای جذب توان بیشتر در یک سایت بادی، توسعه یافته‌اند اما ممکن است باعث تولید توان کمتر از توربین‌های پایین‌دست - به خاطر قرارگرفتن در پشت یک یا چند توربین - شود. این پدیده تحت عنوان اثر سایه شناخته شده است [۱۲]. اثر سایه عامل مهمی در توجه به طراحی آرایش مزرعه بادی می‌باشد [۱۳]. مدل اثر سایه جنسن [۱۴] و [۱۵] برای محاسبه کسری سرعت توربین‌های بادی توسط معادله زیر بیان می‌شود

$$Velocitydeficit_{ij} = 1 - \frac{v_{down}}{v_{up}} = \frac{1 - \sqrt{1 - c_i}}{(1 + \frac{kd}{R})^2} \quad (1)$$

جدول ۱: سناریوی باد.

$l-1$	θ_{l-1}	θ_l	k	c	W_{l-1}
۰	۰	۱۵	۲	۱۳	۰
۱	۱۵	۳۰	۲	۱۳	۰/۰۱
۲	۳۰	۴۵	۲	۱۳	۰/۰۱
۳	۴۵	۶۰	۲	۱۳	۰/۰۱
۴	۶۰	۷۵	۲	۱۳	۰/۰۱
۵	۷۵	۹۰	۲	۱۳	۰/۰۲
۶	۹۰	۱۰۵	۲	۱۳	۰/۰۶
۷	۱۰۵	۱۲۰	۲	۱۳	۰/۰۱
۸	۱۲۰	۱۳۵	۲	۱۳	۰/۰۱
۹	۱۳۵	۱۵۰	۲	۱۳	۰/۰۱
۱۰	۱۵۰	۱۶۵	۲	۱۳	۰/۰۱
۱۱	۱۶۵	۱۸۰	۲	۱۳	۰/۰۱
۱۲	۱۸۰	۱۹۵	۲	۱۳	۰/۰۱
۱۳	۱۹۵	۲۱۰	۲	۱۳	۰/۰۱
۱۴	۲۱۰	۲۲۵	۲	۱۳	۰/۰۱
۱۵	۲۲۵	۲۴۰	۲	۱۳	۰/۰۱
۱۶	۲۴۰	۲۵۵	۲	۱۳	۰/۰۱
۱۷	۲۵۵	۲۷۰	۲	۱۳	۰/۰۱
۱۸	۲۷۰	۲۸۵	۲	۱۳	۰/۰۱
۱۹	۲۸۵	۳۰۰	۲	۱۳	۰/۰۱
۲۰	۳۰۰	۳۱۵	۲	۱۳	۰/۰۱
۲۱	۳۱۵	۳۳۰	۲	۱۳	۰/۰۱
۲۲	۳۳۰	۳۴۵	۲	۱۳	۰/۰۱
۲۳	۳۴۵	۳۶۰	۲	۱۳	۰

بر روی مسئله صورت می‌گیرد و الگوریتم ترکیبی ارائه شده مطابق شکل ۲ می‌باشد.

۶- نتایج شبیه‌سازی

توربین‌های بادی استفاده شده در مطالعه حاضر، دارای پارامترهای زیر می‌باشند: شعاع روتور 31.5 m، سرعت شروع 3.5 m/s، سرعت اسمی 14 m/s، توان اسمی 1500 kW، $\lambda = 14.086$ ، $I_{pt} = 500$ ، $C_t = 0.75$ و $K = 0.75$.

با دانستن سرعت اولیه باد و سرعت اسمی باد، سرعت باد به 20 قسمت با فواصل 0.5 m/s تقسیم شده و به طور مشابه، جهت باد به 23 قسمت با فواصل 15 درجه در محیط طراحی آرایش مزرعه باد تقسیم شده است.

ویژگی‌های باد به شرح ذیل می‌باشد:

اگر جهت باد بین 0 و 15 درجه باشد سرعت باد مطابق جدول ۱ با یک پارامتر شکل ($k = 2$) و یک پارامتر مقیاس ($c = 13$) و احتمال وزش باد در آن فاصله زاویه، صفر است. پارامترهای ACO و GA در مطالعه حاضر در طول همه آزمایش‌ها پس از ارزیابی‌های مختلف تنظیم شده است. حداکثر تعداد تکرار برای ACO، 1000 و تعداد مورچه‌ها 200 است. در GA تعداد تکرار 100 نسل، ضریب آمیزش عددی بین 0.1 تا 1 و ضریب جهش عددی بین 0.001 تا 0.1 می‌باشد. برای نشان دادن عملکرد جداگانه الگوریتم‌های پیشنهادی و ترکیب آنها تعداد متفاوتی از توربین‌ها (2 تا 6 توربین) نسبت به سناریوی باد مطرح شده است. ترکیب الگوریتم‌ها در این مقاله روشی برای تعیین جمعیت اولیه GA می‌باشد. جمعیت اولیه

۳- بهینه‌سازی جامعه مورچگان

بهینه‌سازی جامعه مورچگان^۱ (ACO) الگوریتمی است که برای کاربرد در مسایل بهینه‌سازی گسسته در اوایل ۱۹۹۰ توسط دوریگو توسعه یافته بود [۱۶]. الگوریتم رفتار واقعی مورچه‌ها را در حالی که آنها به دنبال غذا هستند تقلید می‌کند [۱۷] که مشکل از مراحل زیر می‌باشد:

- جستجوی تصادفی مورچه‌ها در منطقه برای پیدا کردن غذا
- در حالی که آنها در حال جابه‌جا کردن غذا به لانه هستند ماده شیمیایی فرمون را به دنبال حرکتشان رها می‌کنند.
- مقدار فرمون با توجه به مقدار مواد غذایی افزایش می‌یابد.
- مورچه‌های دیگر با توجه به مسیرهای فرمون به منبع غذایی می‌روند.

الگوریتم ACO متعارف در گام اول شامل ارزش‌دهی اولیه به اثر فرمون است. سپس، هر مورچه یک راه حل کامل برای مسئله با توجه به قاعده وضعیت احتمالاتی- که وابستگی اساسی به وضعیت فرمون دارد- می‌سازد. در نهایت، مقدار فرمون در دو مرحله به روز می‌شود: مرحله تبخیر که در آن بخشی از فرمون‌ها تبخیر می‌شود و یک فاز تقویت که در آن هر یک از مورچه‌ها مقداری فرمون- که متناسب با برازندگی آن راه حل می‌باشد- ودیعه می‌گذارند. این فرایند تا معیار توقف تکرار می‌شود.

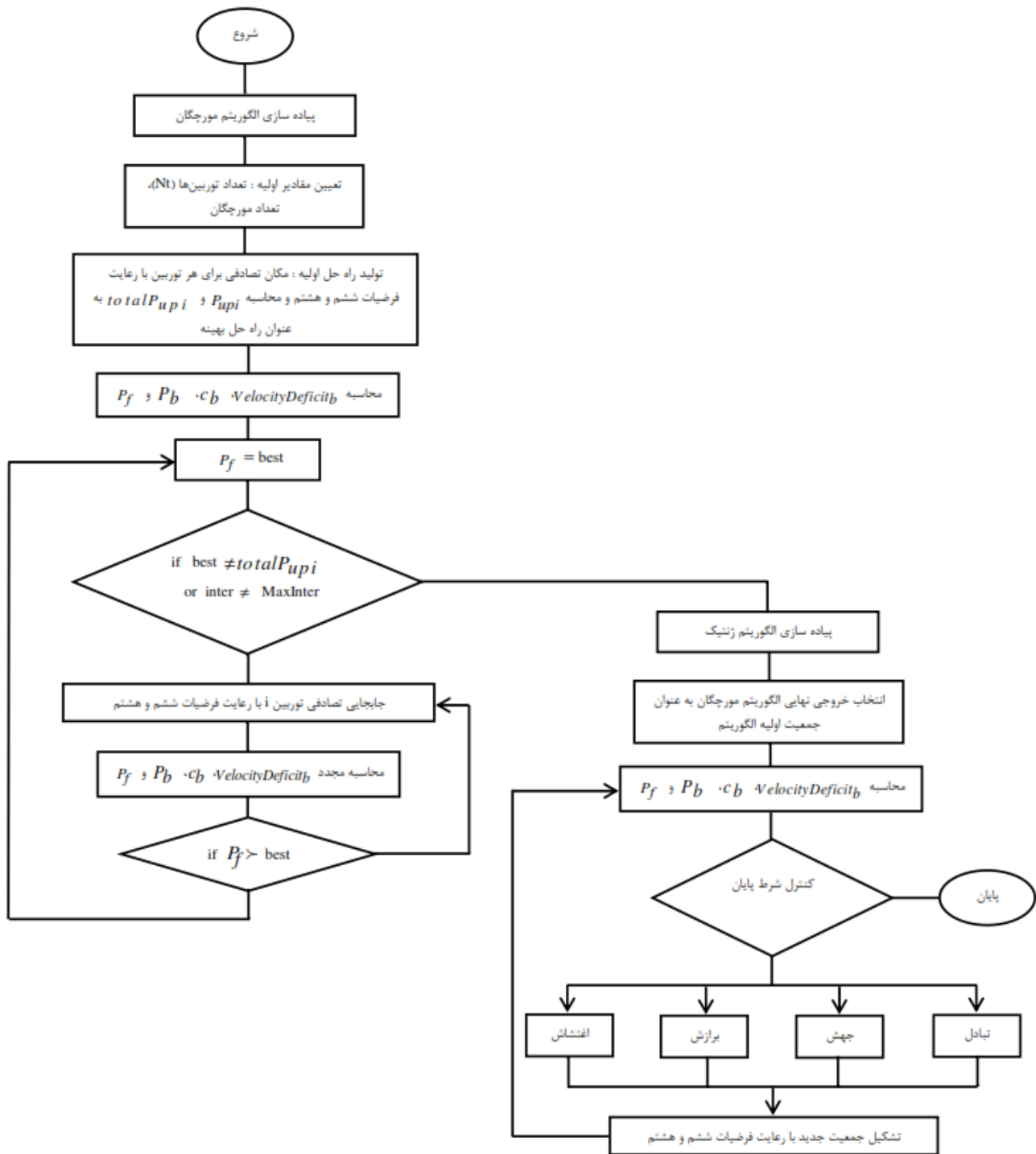
۴- الگوریتم بهینه‌سازی ژنتیک

الگوریتم‌های ژنتیک^۲ (GA) در یافتن یک راه حل بهینه مؤثر برای مسایل پیچیده توانا هستند و فقط نیازمند اطلاعات از تابع هدف می‌باشند. الگوریتم ژنتیک یک روش آماری برای بهینه‌سازی و جستجو بوده و کارکرد الگوریتم بر اساس ژنتیک طبیعی استوار می‌باشد. در این روش ابتدا یک جمعیت اولیه- که به طور معمول به صورت تصادفی است- تشکیل می‌شود و چندین رشته را شامل می‌شود. هر رشته جواب‌های متفاوتی از مسئله را دربردارد. 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 جابه‌جایی و جهش، جمعیت جدیدی که در حکم فرزندان جمعیت قبلی هستند تشکیل می‌شود. این روند تا رسیدن به نقطه بهینه ادامه می‌یابد. شرط توقف مسئله می‌تواند طی کردن تعداد معینی تکرار یا عدم تغییر در برازندگی بهترین رشته بعد از چند تکرار و یا شرایط خاص دیگری باشد.

۵- ارائه الگوریتم ترکیبی

در این مقاله برای حل مسئله بهینه‌سازی پیوسته آرایش مزرعه باد در زمین از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. هدف از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان و الگوریتم ژنتیک، تشکیل جمعیت اولیه مناسب برای الگوریتم ژنتیک می‌باشد. جمعیت اولیه در GA نقش بسزایی در رسیدن به بهینه مطلق و سرعت همگرایی دارد. با انتخاب جمعیت اولیه مناسب برای GA، جواب مسئله به جواب بهینه مطلق نزدیک‌تر می‌شود. روند کار به شرح زیر است: الف) پیاده‌سازی الگوریتم مورچگان بر روی مسئله مورد نظر. ب) جواب بهینه مسئله در مرحله قبل به عنوان جمعیت اولیه الگوریتم ژنتیک در نظر گرفته می‌شود، پیاده‌سازی الگوریتم ژنتیک

1. Ant Colony Optimization
2. Genetic Algorithm



شکل ۲: اساس روش ترکیب الگوریتم جامعه مورچگان و الگوریتم ژنتیک.

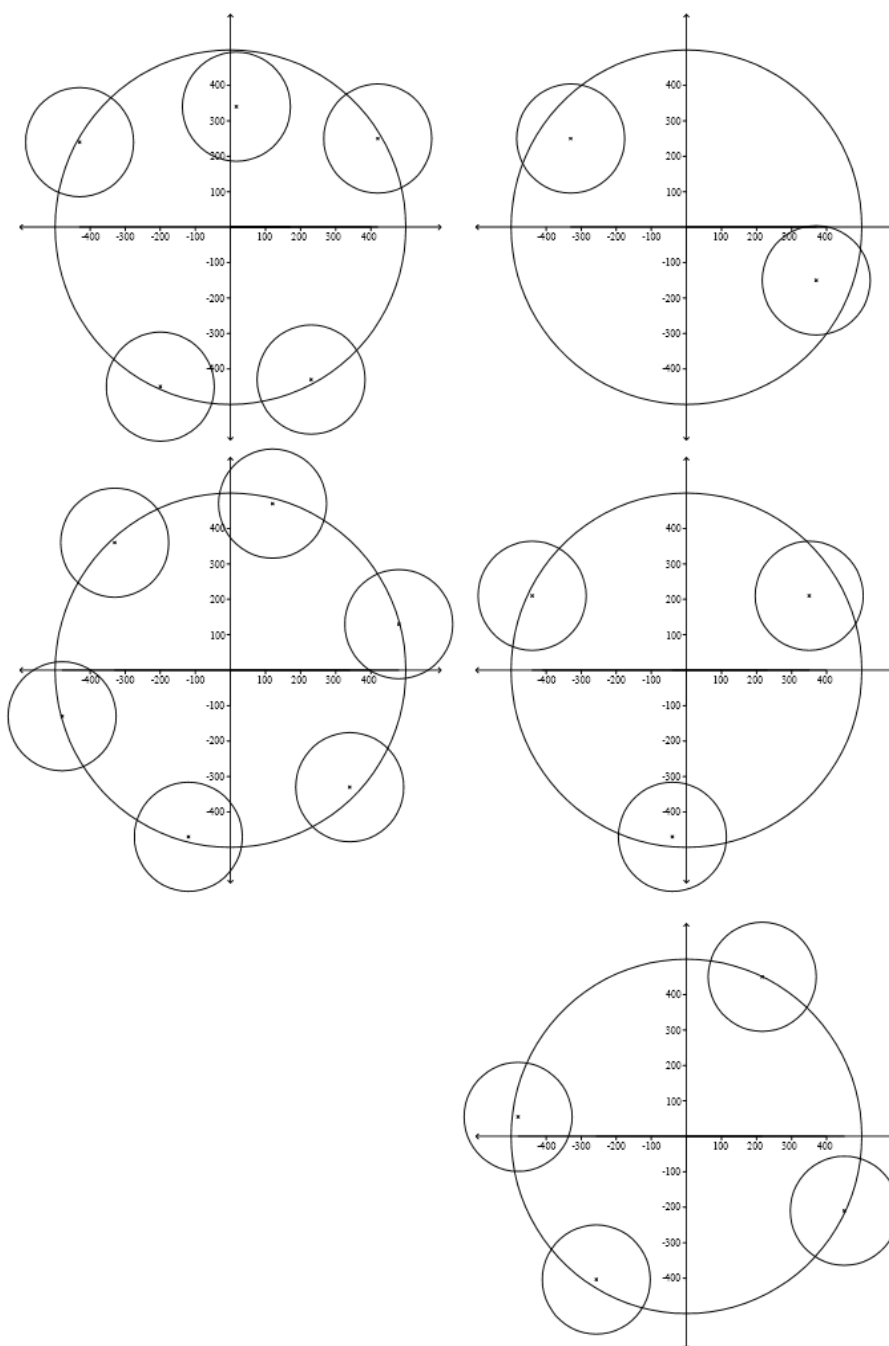
جمعیت اولیه مناسب آن، جواب بهینه مطلق را دربردارد. ضمن این که جمعیت اولیه GA، جواب بهینه‌ای از الگوریتم ACO می‌باشد. جدول ۲ مقایسه بین ACO، GA و ترکیب این الگوریتم‌ها را از طریق تولید انرژی ایده‌آل برای سناریوی باد نشان می‌دهد. جدول ۳ مقایسه ترکیب {GA & ACO} با روش‌های موجود در مطالعات پیشین- از طریق تولید انرژی ایده‌آل و کاهش اثر سایه برای سناریوی باد مطرح شده در [۵]- را نشان می‌دهد. در جدول ۳ مقادیر ایتالیک (کج) اشاره به خروجی انرژی ایده‌آل و تنها مقادیر بولد اشاره به مقادیر بهتر از [۴] و [۵] دارد.

جابه‌جایی یک توربین برای یک فرایند تصادفی با توجه به پیش‌فرض‌های شش و هشت خیلی مشکل است. نتایج محاسباتی در مطالعه حاضر، انطباق زیادی با کاربردهای عملی مکان‌یابی بهینه

جدول ۲: مقایسه نتایج الگوریتم‌ها.

تعداد توربین	ACO	GA	ACO & GA
۲	۲۸۰۹۱٫۴۷	۲۸۰۹۱٫۴۷	۲۸۰۹۱٫۴۷
۳	۴۲۱۳۷٫۲۱	۴۲۱۳۷٫۲۱	۴۲۱۳۷٫۲۱
۴	۵۶۱۸۲٫۹۵	۵۶۰۹۲	۵۶۱۸۲٫۹۵
۵	۷۰۰۰۵٫۰۸	۶۹۷۲۶٫۷۷	۷۰۱۲۱٫۱۸
۶	۸۳۶۹۱٫۸۳	۸۳۶۸۲٫۵۶	۸۴۰۵۱٫۰۴

در GA نقش بسزایی در رسیدن به بهینه مطلق و سرعت همگرایی دارد. برای رسیدن به جواب بهینه مطلق باید جمعیت اولیه به گونه‌ای مناسب و نزدیک جواب بهینه مطلق انتخاب شود. نتیجه اجرای مکرر GA و انتخاب



شکل ۳: طراحی جانمایی مزرعه بادی برای سناریوی باد.

جدول ۳: مقایسه نتایج.

تعداد توربین	توان ایده‌آل (KW)	Kusiak and Song (۲۰۱۰)			Eroglu and Seckiner (۲۰۱۲)			ACO & GA		
		بهینه (KW)	تلفات سایه (KW)	راندمان (%)	بهینه (KW)	تلفات سایه (KW)	راندمان (%)	بهینه (KW)	تلفات سایه (KW)	راندمان (%)
۲	۲۸۰۹۱,۴۷	۲۸۰۸۳,۴۲	۸,۰۵	۹۹,۹۷۱۳	۲۸۰۹۱,۴۷	۰	۱۰۰	۲۸۰۹۱,۴۷	۰	۱۰۰
۳	۴۲۱۳۷,۲۱	۴۲۱۰۱,۰۶	۳۶,۱۵	۹۹,۹۱۴۲	۴۲۱۳۷,۲۱	۰	۱۰۰	۴۲۱۳۷,۲۱	۰	۱۰۰
۴	۵۶۱۸۲,۹۵	۵۶۰۵۷,۷۷	۱۲۵,۱۸	۹۹,۷۷۷۲	۵۶۱۵۰,۱۳	۳۲,۸۲	۹۹,۹۴۱۶	۵۶۱۸۲,۹۵	۰	۱۰۰
۵	۷۰۲۲۸,۶۹	۶۹۹۲۲,۹۷	۳۰۵,۷۲	۹۹,۵۶۴۷	۷۰۱۱۳,۴۸	۱۱۵,۲	۹۹,۸۳۶	۷۰۱۲۱,۱۸	۱۰۷,۵۱	۹۹,۸۴۷
۶	۸۴۲۷۴,۴۲	۸۳۷۵۸,۷۹	۵۱۵,۶۳	۹۹,۳۸۸۱	۸۴۰۴۲,۳۴	۲۳۲,۰۹	۹۹,۷۲۴۶	۸۴۰۵۱,۰۴	۲۲۳,۳۷	۹۹,۷۳۴۹

دایره بزرگ نشان‌دهنده منطقه مزرعه باد با توجه به فرض هشتم، دایره کوچک منطقه ممنوعه برای قراردادن توربین دیگر نزدیک به آن توربین (فرض ششم) و ستاره‌ها نشان‌دهنده توربین‌ها در مزرعه می‌باشند (شکل ۳). همان طور که در شکل ۳ آمده الگوریتم {GA & ACO}

توربین‌های بادی در مزارع باد دارد. روش پیشنهادی برای دو الی چهار توربین در مزرعه باد مورد نظر، راه حل ایده‌آل می‌دهد. علاوه بر این برای پنج توربین و بیشتر، ترکیب {GA & ACO}، راه حل‌های بهتر از مطالعات پیشین می‌دهد.

- [6] M. Wagner, J. Day, and F. Neumann, "A fast and effective local search algorithm for optimizing the placement of wind turbines," *Renew Energy*, vol. 51, pp. 64-70, Mar. 2013.
- [7] E. Son, S. Lee, B. Hwang, and S. Lee, "Characteristics of turbine spacing in a wind farm using an optimal design process," *Renew Energy*, vol. 65, pp. 245-249, May 2014.
- [8] J. C. Mora, J. M. C. Baron, J. M. R. Santos, and M. Burgos, "An evolutive algorithm for wind farm optimal design," *Neurocomputing*, vol. 70, no. 16-18, pp. 2651-2658, Oct. 2007.
- [9] J. S. Gonzales, A. G. G. Rodriguez, J. C. Mora, J. R. Santos, and M. B. Payan, "Optimization of wind farm turbines layout using an evolutive algorithm," *Renew. Energy*, vol. 35, pp. 1671-1681, Aug. 2010.
- [10] M. Bilbao and E. Alba, "Simulated annealing for optimization of wind farm annual profit," in *Proc. 2nd Int. Symp. on Logistics and Industrial Informatics*, 5 pp., Linz, Austria, 10-12 Sep. 2009.
- [11] U. A. Ozturk and A. B. Norman, "Heuristic methods for wind energy conversion system positioning," *Electric Power Syst. Res.*, vol. 70, no. 3?, pp. 179-185, Aug. 2004.
- [12] J. F. Manwell, J. G. McGowan, and A. L. Rogers, *Wind Energy Explained: Theory, Design, and Application*, 1st Ed. London, John Wiley & Sons, 2002.
- [13] H. E. Neustadter, "Method for evaluating wind turbine wake effects on wind farm performance," *J. Solar Energy Eng.*, vol. 107, pp. 240-243, 1985.
- [14] N. O. Jensen, *A Note on Wind Generator Interaction*, Roskilde, Denmark, RisøM-2411: Risø National Laboratory, 1983.
- [15] I. Katic, J. Hojstrub, and O. N. Jensen, "A simple model for cluster efficiency," in *Proc. European Wind Energy Association Conf. and Exhibition*, vol. 1, pp. 407-410, Rome, Italy, Oct. 1986.
- [16] M. Dorigo, M. Birattari, and T. Stutzle, "Ant colony optimization," *IEEE Computational Intelligence Magazine*, vol. 1, no. 4, pp. 28-39, Nov. 2006.
- [17] K. Socha and C. Blum, "An ant colony optimization algorithm for continuous optimization: application to feed-forward neural network training," *Neural Comput Appl.*, vol. 16, no. 3, pp. 235-247, May 2007.
- [18] J. Zhang, S. Chowdhury, A. Messac, and L. Castillo, "A response surface - based cost model for wind farm design," *Energy Policy*, vol. 42, issue C, pp. 538-550, 2012.

ایوب فرجی پور در سال ۱۳۸۹ مدرک کارشناسی مهندسی برق خود را از دانشگاه شهیدرجایی و در سال ۱۳۹۳ مدرک کارشناسی ارشد مهندسی برق خود را از دانشگاه علوم و تحقیقات هرمزگان دریافت نمود. از سال ۱۳۸۹ نام برده به عنوان مدرس در دانشگاه فنی و حرفه‌ای و آموزش و پرورش در بندرعباس مشغول به فعالیت گردید و اینک نیز معاون فنی این سازمان می‌باشد. زمینه‌های علمی مورد علاقه ایشان متنوع بوده و شامل موضوعاتی مانند بهینه‌سازی، کاهش تلفات در شبکه‌های توزیع، جانمایی و حداکثر سازی توان خروجی مزارع بادی می‌باشد.

فرامرز فقیهی تحصیلات خود را در مقاطع کارشناسی و کارشناسی ارشد مهندسی برق قدرت و مخابرات بترتیب در سالهای ۱۳۷۹ و ۱۳۸۱ از دانشگاه تهران و دانشگاه امام حسین (ع) و در مقطع دکتری مهندسی برق قدرت در سال ۱۳۸۷ از دانشگاه علم و صنعت ایران به پایان رسانده است و هم‌اکنون استادیار دانشکده فنی و مهندسی گروه مهندسی برق قدرت دانشگاه آزاد اسلامی واحد علوم و تحقیقات می‌باشد. زمینه‌های تحقیقاتی مورد علاقه ایشان عبارتند از: انرژی‌های تجدیدپذیر، کیفیت توان، کاربرد ابررسانا در سیستم‌های قدرت، سازگاری الکترومغناطیسی و فشارقوی الکتریکی.

رضا شریفی مدرک کارشناسی خود را در رشته مهندسی برق- الکترونیک در سال ۱۳۷۴ از دانشگاه گیلان دریافت نمود و سپس به ترتیب در سالهای ۱۳۷۸ و ۱۳۸۹ موفق به اتمام تحصیلات کارشناسی ارشد و دکتری در رشته مهندسی برق- قدرت در دانشگاه علم و صنعت ایران شد. وی از سال ۱۳۸۰ تا ۱۳۸۳ با شرکت خدمات مهندسی برق (مشانیر) همکاری داشته و از سال ۱۳۹۰ به عنوان مشاور و مدرس ایمنی برق با مرکز تحقیقات و تعلیمات حفاظت فنی و بهداشت کار همکاری می‌کند. دکتر شریفی از سال ۱۳۹۲ به عنوان عضو هیأت علمی دانشگاه آزاد اسلامی واحد تهران غرب مشغول به کار شده است. زمینه‌های علمی مورد علاقه نام برده شامل حفاظت سیستم‌های قدرت و محدودسازی جریان خطا، کاربرد ابرسانایی در سیستم‌های الکتریکی، به کارگیری روش‌های تصمیم‌گیری و بهینه‌سازی در مهندسی برق و مدیریت ایمنی در شبکه‌های توزیع و انتقال نیرو می‌باشد.

توربین‌ها را تقریباً عمود با جهت باد اصلی مکان‌یابی می‌کند و به این ترتیب تلفات سایه را می‌توان کاهش داد و تولید توان در مزرعه باد بیشتر خواهد شد.

به عنوان یک محک عملی برای اثبات کارایی کلی روش پیشنهادی، پیاده‌سازی بر روی مدل واقعی [۱۸] انجام شد. در این مدل، مکان‌یابی توربین‌ها با استفاده از بهینه‌سازی ازدحام ذرات انجام شده است. نتایج روش پیشنهادی حاضر به طور متوسط با تیرانس $6/3\%$ اختلاف نسبت به نتایج آن مقاله به دست آمد که این تیرانس به دلیل مفروضات مسئله مکانیابی توربین‌ها بوده است.

برنامه‌نویسی الگوریتم‌های پیشنهادی در نرم‌افزار Matlab R2012a انجام شده و از یک کامپیوتر که دارای پردازنده پنتیوم دو هسته‌ای @2/66 P8800 گیگاهرتز با ۴ گیگابایت RAM می‌باشد استفاده شده است. زمان حل با افزایش تعداد توربین‌ها افزایش می‌یابد و تعداد توربین‌ها، یکی از مهم‌ترین پارامترهای مسئله است که بر زمان خاتمه الگوریتم تأثیر دارد.

۷- نتیجه‌گیری

در مطالعه حاضر برای حل مسئله بهینه‌سازی پیوسته آرایش مزرعه باد در زمین از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان و الگوریتم ژنتیک استفاده شده است. هدف از ترکیب الگوریتم بهینه‌سازی جامعه مورچگان و الگوریتم ژنتیک، تشکیل جمعیت اولیه مناسب برای الگوریتم ژنتیک می‌باشد. جمعیت اولیه در GA نقش بسزایی در رسیدن به بهینه مطلق و سرعت همگرایی دارد. با انتخاب جمعیت اولیه مناسب برای GA، جواب مسئله به جواب بهینه مطلق نزدیک‌تر می‌شود و محدودیت‌های مسئله در الگوریتم ادغام شده‌اند. بنابراین، پروسه بهینه‌سازی تنها به عنوان یک مسئله بهینه‌سازی غیر خطی کار می‌کند. راه حل‌های بهینه از طریق طراحی دقیق‌تر آرایش مزرعه بادی برای جذب حداکثر توان خروجی با کاهش اثر سایه نشان داده شده و عملکرد الگوریتم پیشنهادی بر روی محک مسئله مورد تأیید قرار گرفت. مدل پیشنهادی در این مطالعه توسط الگوریتم استراتژی تکاملی و الگوریتم مورچگان در مطالعات پیشین نیز حل شده است.

نتیجه این تحقیق حاکی از آن است که استفاده از ترکیب الگوریتم‌های {GA & ACO}، آرایش بهتر مزرعه بادی نسبت به مطالعات پیشین- بدون گیرافتادن انتخاب‌های مسئله در نقاط ماکسیمم محلی در یک زمان حل قابل قبول- را نتیجه می‌دهد. به طور کلی عملکرد روش پیشنهادی نسبت به الگوریتم‌های موجود در مطالعات پیشین برای مسایل پیوسته- به لحاظ جذب حداکثر توان و کاهش اثر سایه- بهتر می‌باشد.

مراجع

- [1] Y. Eroglu and S. Seckiner, "Wind farm layout optimization using particle filtering approach," *Renew Energy*, vol. 58, pp. 95-107, Oct. 2013.
- [2] A. Mostafaeipour, et al., "Evaluation of wind energy potential as a power generation source for electricity production in Binalood, Iran," *Renew Energy*, vol. 52, pp. 222-229, Apr. 2013.
- [3] K. Mohammadi, A. Mostafaeipour, and M. Sabzpooshani, "Assessment of solar and wind energy potentials for three free economic and industrial zones of Iran," *Energy*, vol. 67, pp. 117-128, Apr. 2014.
- [4] Y. Eroglu and S. Seckiner, "Design of wind farm layout using ant colony algorithm," *Renew. Energy*, vol. 44, pp. 53-62, Aug. 2012.
- [5] A. Kusiak and Z. Song, "Design of wind farm layout for maximum wind energy capture," *Renew. Energy*, vol. 35, no. 3, pp. 685-694, Mar. 2010.