



## ارائه یک مدل خطی گسسته جهت بهینه‌سازی مزرعه بادی بر مبنای مدل برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط با لحاظ قید صدا

عادل اسماعیلی<sup>1</sup>، مصطفی ورمزیار<sup>2\*</sup>، محسن ورمزیار<sup>3</sup>

1- دانشجوی کارشناسی ارشد، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

2- استادیار، مهندسی مکانیک، دانشگاه تربیت دبیر شهید رجایی، تهران

3- دانشجوی دکتری، مهندسی صنایع، دانشگاه صنعتی شریف، تهران

\* تهران، صندوق پستی 15811-16788، varmazyar.mostafa@srttu.edu

### اطلاعات مقاله

مقاله پژوهشی کامل

دریافت: 05 آبان 1396

پذیرش: 21 آذر 1396

ارائه در سایت: 15 دی 1396

کلید واژگان:

بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها

برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی

محدودیت شدت صدا

فاصله اقلیدسی

### چکیده

بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها با هدف تولید بیشترین توان در یک مزرعه بادی ذاتاً جزو مسایل پیوسته و غیرخطی محسوب می‌شود. در پژوهش حاضر، برای خطی‌سازی قید اثر ویک و رابطه توان توربین از مدل ویک منفرد و فضای گسسته استفاده شده است. همچنین معیار قرارگیری یک توربین در ویک توربین دیگر نیز به صورت غیرمستقیم و خطی اعمال گردیده است. مدل ریاضی پیشنهادی در قیاس با مدل‌های ریاضی پیوسته غیرخطی، ضمن حفظ مزیت رسیدن به بهینه مطلق، دارای حجم محاسبات و زمان اجرای به مراتب کم‌تر و پایداری بالاتر است. قیاس نتایج پژوهش حاضر با نتایج مطالعات گذشته نشان می‌دهد که ممکن است الگوریتم‌های فراابتکاری به جواب بهینه مطلق نرسند. علاوه بر توان خروجی، مسایل زیست محیطی نیز می‌تواند بر چیدمان توربین‌ها، تأثیرگذار باشد که از آن جمله می‌توان به محدودیت در بیشینه صدای تولید شده در نقاط مشخصی از مزرعه یا اطراف آن اشاره نمود. به عنوان نمونه قید بیشینه شدت صدا نیز در مدل حاضر اعمال گردیده است. برای محاسبه شدت صدا از فاصله اقلیدسی بر مبنای گسترش نیم‌کره‌ای و با لحاظ اثرات جذب اتمسفر استفاده شده است. با توجه به نتایج موجود می‌توان گفت که تحت شرایط مورد بررسی، قید سطح صدا می‌تواند کاهش نسبتاً قابل توجهی در توان خروجی مزرعه بادی ایجاد نماید، لذا در انتخاب مزرعه می‌بایست به فاصله تا مناطق مسکونی توجه ویژه نمود. به علاوه میزان تأثیرگذاری تعداد سلول‌ها بر دقت نتایج مورد بررسی قرار گرفت. نتایج نشان می‌دهد که ارتباط مشخصی میان توان بهینه و تعداد سلول‌ها وجود ندارد.

## Introduce a linear discrete model to optimization of wind farm layout using mixed integer programming considering of sound constraint

Adel Esmaili<sup>1</sup>, Mostafa Varmazyar<sup>1\*</sup>, Mohsen Varmazyar<sup>2</sup>

1- Department of Mechanical Engineering, Shahid Rajaei Teacher Training University, Tehran, Iran.

2- Department of Industrial Engineering, Sharif University of Technology, Tehran, Iran.

\* P.O.B. 15811-16788, Tehran, Iran, varmazyar.mostafa@srttu.edu

### ARTICLE INFORMATION

Original Research Paper

Received 27 October 2017

Accepted 12 December 2017

Available Online 05 January 2018

#### Keywords:

Optimization of wind turbine layout

Mixed integer linear programming

Sound level constraint

Euclidean distance

### ABSTRACT

Optimization of the arrangement of turbines with the aim of producing the maximum power in a wind farm is inherently part of continuous and nonlinear problems. In the present study, for the linearization of the Wake constraint and the connection between turbine power are used single Wake and discrete models. Also, the criterion of placing a turbine in another turbine has been applied indirectly and linearly. The proposed mathematical model compares to continuous nonlinear mathematical models, while maintaining the advantage of achieving exact optimum, has a lower runtime and higher stability. Comparison of the results of the present study with the results of previous studies suggests that metaheuristics algorithms may not be obtained in absolute optimal answer. In addition to the power output, environmental issues can also affect the arrangement of turbines. As an example, the maximum noise level is applied in the present model. In order to calculate the intensity of sound, Euclidean distance based on the spread of the hemisphere and the effects of atmospheric absorption has been used. According to the results, it can be said that under the conditions under consideration, the noise level can cause a significant reduction in the output power of the wind farm. Therefore, in selecting the field, attention should be paid to the distance to residential areas. In addition, the effect of cell count on the accuracy of the results was investigated. The results show that there is no clear relationship between optimal power and number of cells.

Please cite this article using:

A. Esmaili, M. Varmazyar, M. Varmazyar, Introduce a linear discrete model to optimization of wind farm layout using mixed integer programming considering of sound constraint, Modares Mechanical Engineering, Vol. 18, No. 01, pp. 247-257, 2018 (in Persian)

برای ارجاع به این مقاله از عبارت ذیل استفاده نمایید:

## 1- مقدمه

برنامه‌ریزی برای استحصال انرژی از باد در دهه‌های گذشته افزایش چشم‌گیری داشته است. برای نمونه کانادا قصد دارد تا سال 2025، 55 گیگا وات از انرژی مصرفی خود را از این روش تأمین نماید، این انرژی معادل 20 درصد از انرژی کل مورد نیاز این کشور است. هم چنین از سال 2007 تا کنون در آمریکا، تولید توان از انرژی باد سالانه حدود 5 تا 10 گیگا وات رشد داشته است. از طرف دیگر در ایران نیز نصب پنج هزار مگاوات نیروگاه تجدیدپذیر در قانون پنجم توسعه هدف‌گذاری شده که از این میزان 4500 مگاوات آن برای توسعه باد در نظر گرفته شده است، لازم به ذکر است که میزان انرژی قابل استحصال بادی در ایران حدود 18000 مگاوات تخمین زده می‌شود. بر این اساس تمایل چشم‌گیری جهت بهبود عملکرد سیستم‌های موجود و ارتقا دانش تولید توان از انرژی باد در بین محققین این حوزه وجود دارد. مناطق بادخیز در دنیا به ندرت یافت می‌شوند، لذا یکی از دغدغه‌های محققین ارایه روش‌هایی جهت چیدمان بهینه و تولید بیشترین توان از باد این مناطق می‌باشد. این طراحی عمدتاً بر مبنای رژیم باد منطقه و شرایط وزش باد تنظیم می‌گردد.

مدل‌های ارایه شده در این حوزه غالباً بر اساس الگوریتم‌های فراابتکاری می‌باشد. این الگوریتم‌ها اگرچه برای رفع ضعف الگوریتم‌های ابتکاری، که افتادن به دام بهینه محلی است، پایه‌گذاری شدند ولی کماکان به الگوریتم‌های غیر دقیق مشهور هستند. یعنی احتمال نرسیدن به بهینه مطلق در این الگوریتم‌ها وجود دارد. در واقع زمانی پای الگوریتم‌های فراابتکاری به حل مسئله بهینه‌سازی باز می‌شود که ابعاد مساله مانع استفاده از مدل‌های دقیق گردد (یا به اصطلاح مساله NP-سخت<sup>1</sup> باشد). اولین مطالعه‌ها در این حوزه به کمک الگوریتم ژنتیک صورت پذیرفته است که از آن جمله می‌توان به پژوهش موزتی و همکاران [1] و گریدی [2] اشاره نمود. موزتی و همکاران [1] زمین مزرعه را به مربع‌های ده در ده تقسیم کردند که اندازه‌ی هر ضلع پنج برابر قطر روتور بود و توربین‌ها فقط می‌توانستند در مرکز این سلول‌ها قرار بگیرند. گریدی [2] با اصلاح مدل موزتی توانست به جواب‌های بهتری دست پیدا کند. وی به بهبود روش بهینه‌سازی الگوریتم ژنتیک با افزایش جمعیت و تعداد نسل‌ها پرداخت. بعدها امامی و همکاران [3] و گونزالز و همکاران [4] نیز روش موزتی را به مراتب بهبود بخشیدند. با استفاده از همان مدل اولیه موزتی، مارمیدیسی [5] الگوریتم مونت کارلو<sup>2</sup> را جایگزین الگوریتم ژنتیک نمود. از دیگر روش‌های بهینه‌سازی که برای این منظور استفاده شده می‌توان به شبکه عصبی اشاره نمود که در کار اکونومو و همکاران [6] به کار گرفته شده است. در ادامه میتال [7]، تعداد سلول‌ها را به شدت افزایش داد و ابعاد آن‌ها را به اندازه یک چهلیم قطر روتور در نظر گرفت.

افزایش قدرت پردازش‌گرها منجر به آن شد که در تحلیل مسایل تا ابعاد متوسط، بتوان از روش‌های دقیق مبتنی بر مدل‌سازی پیوسته غیرخطی و گسسته خطی استفاده کرد. مطالعه کوزیاک و سانگ [8] مسئله طراحی بهینه مکان توربین‌های بادی را بر اساس یک مدل غیر خطی بدون شبکه بندی مزرعه انجام دادند. در این مدل توربین‌ها با دو قید محدوده زمین و حداقل فاصله نزدیکی دو توربین، می‌توانند در هر نقطه‌ای از زمین مزرعه بادی قرار گیرند. مطالعه‌های آیتون اوزتارک [9] و چادوری و همکاران [10] نیز بر مبنای همان مدل‌سازی کوزیاک و سانگ انجام شد. ایشان نیز زمین پروژه را شبکه بندی نکردند و به این نتیجه رسیدند که استفاده از این روش

نسبت به روش‌های فراابتکاری، منجر به تغییر نقطه بهینه و افزایش توان خروجی مزرعه می‌شود. در ادامه، موستاکروف و بوریساوا [11] هم‌زمان نوع و تعداد توربین‌های بادی را متغیر در نظر گرفتند. نتایج حاکی از آن است که استفاده از یک توربین بزرگ نسبت به مدل کوچک‌تر (از منظر نرخ قدرت، قطر، ارتفاع و سرعت اسمی) از بعد اقتصادی بهینه‌تر است. چادوری و همکاران در مطالعه ای دیگر [12] تأثیر سه پارامتر قطر روتور، تعداد توربین‌ها و اندازه‌ی مزرعه بادی را بر توان تولیدی و هزینه بررسی کردند و به این نتیجه رسیدند که تنوع در انتخاب توربین‌ها، عمل‌کرد بهتری برای مزرعه ایجاد می‌کند.

یکی از معایب روش‌های پیوسته غیرخطی افزایش چشم‌گیر هزینه محاسباتی می‌باشد. در این میان روش‌های گسسته خطی، که علاوه بر حفظ مزیت یافتن بهینه مطلق، حجم و زمان محاسبه کم‌تری را نسبت به روش‌های پیوسته غیرخطی لازم دارند، مورد توجه محققین قرار گرفتند. داناوان [13] و آرچر [14] با استفاده از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی مختلط<sup>3</sup> و حل‌گر شاخه‌وکران<sup>4</sup> طرح چیدمان توربین در یک مزرعه بادی را بهینه کردند. ایشان همان مدل شبکه‌بندی موزتی و همکاران را مبنا قرار دادند و زمین مزرعه را به صد سلول با اندازه پنج برابر قطر روتور تقسیم کردند.

ترنر و همکاران [15] با استفاده از دو روش برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی مختلط و عدد صحیح درجه دوم و ایجاد یک مدل ریاضی جدید، کاهش انرژی جنبشی توربین‌ها، که تحت اثر ویک<sup>5</sup> به وجود می‌آیند را کمینه کردند. ایشان با مقایسه نتیجه مطالعه خود با نتایج پژوهش‌های انجام شده با روش‌های فراابتکاری نشان دادند که در بیشتر موارد جواب‌ها بهبود یافته‌اند.

کو و همکاران [16] برخلاف مطالعه‌های پیشین، اثر توپوگرافی منطقه را در محاسبات لحاظ نمودند. ایشان با استفاده از روش دینامیک سیالات محاسباتی، اثر ویک را بر توان توربین‌ها در یک زمین ناهموار شبیه‌سازی نمودند. سپس داده‌های حاصل از این شبیه‌سازی را به منظور چیدمان بهینه توربین‌ها در مزرعه، در یک مدل ریاضی با استفاده از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح مختلط وارد کردند. نتایج ایشان در قیاس با مدل واقعی از دقت بهتری نسبت به کارهای پیشین برخوردار بود.

با توجه به مزیت روش‌های گسسته خطی، در مطالعه حاضر نیز از روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط جهت بهینه‌سازی چیدمان توربین‌ها استفاده شده است. این روش مبتنی بر مدل‌سازی دقیق ریاضی است و می‌تواند بهینه مطلق مسئله را معرفی نماید. هم‌چنین برای مدل‌سازی اثر ویک روش جنسن [17] به کار گرفته شد. لازم به ذکر است که در مطالعه حاضر به جای بهره‌گیری مستقیم از رابطه غیرخطی مربوط به یافتن توربین‌های واقع در ویک یک توربین مشخص، از یک معیار خطی جایگزین استفاده گردید. به علاوه رابطه توان توربین نیز به کمک گسسته سازی محل قرارگیری توربین‌ها و محاسبه توزیع سرعت قبل از اعمال قیود، خطی شد. از طرف دیگر، سطح صدا نیز به عنوان قیدی در مدل‌سازی مساله اعمال گردید. در بخش دوم مدل ریاضی و در بخش سوم داده‌های ورودی معادله‌ها، که در واقع مشخصه‌های مزرعه مورد نظر می‌باشند، معرفی شده است. در بخش چهارم، نتایج پژوهش با مطالعه‌های قبلی مقایسه، تأثیر تعداد سلول‌ها بر توان مزرعه و نحوه اثرگذاری قید صدا در چیدمان مزرعه مورد بررسی قرار گرفته است.

<sup>3</sup> Mixed Integer Linear Programming<sup>4</sup> Branch and Bound<sup>5</sup> Wake effect<sup>1</sup> NP-hard<sup>2</sup> Monte Carlo

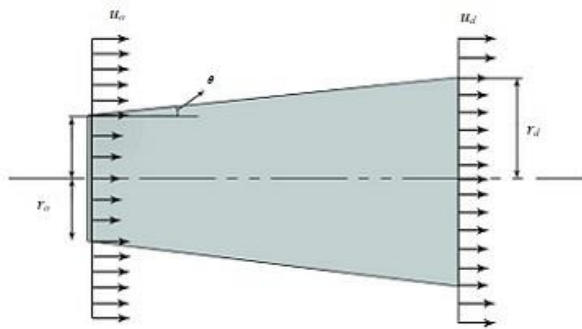


Fig. 1 Jensen wake model

شکل 1 مدل ویک جنسن

z ارتفاع هاب توربین تولید کننده ویک و  $z_0$  ثابت نشان‌دهنده زبری سطح می‌باشد که از مشخصات فیزیکی زمین به‌دست می‌آید. چون گسترش ویک به‌صورت خطی است، شعاع ویک در فاصله مشخصی بعد از توربین از رابطه (3) قابل محاسبه است [17].

$$r(x) = r_o + \alpha x \quad (3)$$

که در آن  $\alpha$  پارامتر کاهش در راستای محوری است که از رابطه (4) قابل دست‌یابی است [17].

$$\alpha = 0.5(1 - \sqrt{1 - c_t}) \quad (4)$$

شعاع پایین دست روتور از رابطه (5) به‌دست می‌آید [17].

$$r_d = r_o \sqrt{\frac{1 - \alpha}{1 - 2\alpha}} \quad (5)$$

که  $r_o$  شعاع روتور می‌باشد. از این شعاع برای نوشتن معادله‌های پایین-دست ناحیه ویک در معادله بقای مومنتم استفاده می‌شود. در نهایت سرعت باد با توجه به اثر ویک در فاصله  $x$  از توربین بادی از معادله (6) قابل استخراج است [17].

$$u = u_o \left( 1 - \frac{2\alpha}{\left(1 + \alpha \frac{x}{r_d}\right)^2} \right) \quad (6)$$

با مشخص شدن سرعت باد، توان خروجی از هر توربین بادی با توجه به رابطه (7) تعیین می‌گردد.

$$P = \frac{1}{2} \eta \rho A u^3 \quad (7)$$

صورت ساده شده رابطه (7) به‌صورت رابطه (8) قابل ارایه است که در حل مسئله بهینه‌سازی از آن استفاده می‌شود.

$$P = 0.3u^3 \quad (8)$$

برای تعیین این که چه توربین‌هایی در مسیر ویک توربین بالادست خود قرار می‌گیرند از روش ارائه شده در مقاله کوزیاک و سانگ [8] استفاده شده است. در شکل 2 محل توربین بالادست  $i$  با  $T_1$ ، محل توربین پایین دست  $j$  با  $T_2$ ، راس مخروط ویک ایجاد شده توسط توربین  $i$  با  $A$  و زاویه راس مخروط با  $\gamma$  مشخص گردیده است که از رابطه  $\gamma = \tan^{-1} k$  به‌دست می‌آید.  $k$  ضریب گسترش اثر ویک است که مقداری ثابت دارد. همچنین  $o$  بیان‌گر مبدا مختصات است.  $\beta_{i,j}$  زاویه ایجاد شده بین نیم‌ساز مخروط ویک فرضی و مکان توربین پایین‌دست را نشان می‌دهد که از رابطه (9) محاسبه می‌شود.

$$\beta_{i,j} = \cos^{-1} \left\{ \frac{(X_i - X_j) \cos \theta + (Y_i - Y_j) \sin \theta + r_o/k}{\sqrt{(X_i - X_j + r_o/k \cos \theta)^2 + (Y_i - Y_j + r_o/k \sin \theta)^2}} \right\} \quad (9)$$

## 2- مدل سازی ریاضی

در این بخش مدل ریاضی برای بهینه‌سازی مکان توربین‌های بادی در یک مزرعه بادی تعریف می‌شود. هدف یافتن چیدمان بهینه توربین‌ها به منظور دست‌یابی به بیش‌ترین توان ممکن از مزرعه بادی است. یک مدل خطی برای بهینه‌سازی به روش برنامه‌ریزی خطی عدد صحیح مختلط ایجاد شده است. در این مطالعه قیدهایی هم‌چون فاصله توربین‌ها و تأثیر ویک توربین‌ها بر یک‌دیگر به صورت خطی بیان گردیده‌اند. لذا مدل حاضر شامل یک تابع هدف خطی و مجموعه قیدهایی خطی است. مجموعه قیدهایی در برگزیده قیدهایی فیزیکی، قیدهایی مرتبط با اثر ویک و قید اثر صوت بر نقاط حساس اطراف منطقه می‌باشد.

برای ایجاد مدل‌سازی ریاضی فرضیه‌های زیر در نظر گرفته شده است.

- 1- از جزئیات توپوگرافی منطقه صرف نظر شده، زمین صاف و پارامتر زبری سطح در مدل ویک اعمال گردیده است.
- 2- تمام توربین‌ها از یک نوع می‌باشند و توان خروجی برابر دارند. این فرض با مدل واقعی در اکثر مزرعه‌های بادی هم‌خوانی دارد.
- 3- تعداد توربین‌ها ثابت است. در واقع قبل از چیدمان و ایجاد یک مزرعه بادی، با توجه به مقررات دولتی و همچنین مقدار نیروی وارد به شبکه توزیع، تعداد و نوع توربین‌ها مشخص می‌شود.

### 1-2- سلول‌بندی زمین پروژه

در پژوهش حاضر اندازه سلول‌ها به اندازه قطر روتور در نظر گرفته شده است. در عمل با افزایش تعداد سلول‌ها مدل گسسته به مدل پیوسته نزدیک‌تر می‌شود و پاسخ مساله دقیق‌تر خواهد بود. توربین‌ها فقط می‌توانند در وسط این سلول‌ها قرار بگیرند. دیگر قید مرتبط با قرارگیری توربین‌ها محدود بودن آن‌ها به مرزهای مزرعه بادی است.

### 2-2- اثر ویک و رابطه توان توربین

سرعت باد با عبور از بین پره توربین بادی کاهش می‌یابد. پس توربین‌هایی که در نزدیکی هم قرار گرفته‌اند بر روی توان تولیدی یک‌دیگر اثر می‌گذارند، که به اثر ویک معروف است. مدل‌سازی اثر ویک بر مبنای مدل ارائه شده توسط جنسن [17]، که در مطالعه‌های گذشته نیز از آن استفاده شده، صورت گرفته است. مدل جنسن بر اساس قانون بقای مومنتم و در پایین دست ناحیه ویک یک توربین بادی به دست آمده است. مدل ارائه شده توسط جنسن در دسته مدل‌های سینماتیکی اثر ویک قرار می‌گیرد، این معادله‌ها از گسترش اثر آشفستگی در ناحیه ویک چشم‌پوشی می‌کنند و عملاً معادله بقای مومنتم، برای بالادست و پایین‌دست توربین بادی نوشته می‌شود. شماتیک این اثر در شکل 1 آورده شده است.

همان‌طور که در شکل 1 مشخص است، باد پس از عبور از توربین بالادست، دچار افت انرژی و آشفستگی شده که سبب کاهش سرعت باد می‌شود. ناحیه به‌وجود آمده در پشت توربین در شکل 1 همان ناحیه ویک است.

معادله بقای مومنتم در ناحیه ویک یک توربین به صورت معادله (1)

است. [17]

$$\pi r_o^2 u_o + \pi (r + r_o)^2 u = \pi r^2 u \quad (1)$$

پارامتر عددی  $\alpha$  مقدار گسترش ویک را بعد از توربین مشخص می‌کند.

این پارامتر از رابطه (2) قابل محاسبه است [17].

$$\alpha = \frac{0.5}{\ln \frac{z}{z_o}} \quad (2)$$

قید سوم، به اعمال اثر ویک یک توربین بر سایر توربین‌ها می‌پردازد. این قید به این صورت عمل می‌کند که اگر نقطه  $j$  تحت زاویه وزش  $\theta$  در ویک نقطه‌ای بالاتر از  $i$  قرار گیرد و در هر دو نقطه توربین قرار داشته باشد، آن‌گاه متغیر تصمیم  $w_{ij}$  مقدار یک به خود گرفته و منجر به اعمال پارامتر کاهش سرعت در محاسبه توان توربین  $j$  در رابطه (14) می‌شود. برای هر جهت وزش  $\theta$ ، مجموعه‌ای  $W_{i,\theta}$  محتوی شماره نقاطی است که در ویک توربین  $i$  قرار می‌گیرند. این مجموعه با استفاده از رابطه (9) به دست می‌آید و در رابطه (13) مورد استفاده قرار می‌گیرد.

$$x_i + x_j - w_{ij} \leq 1, \quad i \in V, j \in W_{i,\theta} \quad (13)$$

قید چهارم که در رابطه (14) بیان شده، توان هر توربین با توجه به تأثیر آیرودینامیکی یا همان ویک دیگر توربین‌ها را مشخص می‌سازد.

$$Z_i \leq \sum_{d \in D} 0.3 \left( u_{id,\infty}^3 x_i - \sum_{j \in W_{i,\theta}} u_{ijd}^3 w_{ij} \right) P_d \quad (14)$$

که در آن  $u_{id,\infty}$  سرعت باد در بالاترین و  $u_{ijd}$  سرعت باد در ناحیه توربین بادی با توجه به اثرات دیگر توربین‌ها می‌باشد.  $P_d$  احتمال توزیع باد در جهت  $d$  را نشان می‌دهد. در این مطالعه از پیشنهاد مرجع [13] تحت عنوان ویک منفرد استفاده شده است و در عمل پیش از ورود به بهینه‌سازی، همه سرعت‌ها حساب شده و به نوعی ترم‌های غیرخطی معلوم فرض شده و تابع هدف فرم خطی به خود می‌گیرد. همان‌طور که مشاهده می‌شود با فرض معلوم بودن مقادیر سرعت‌ها، رابطه (14) نسبت به متغیر  $x_i$  خطی است. به علاوه که متغیر  $Z_i$  پیوسته و متغیرهای  $x_i$  و  $w_{ij}$  به عنوان متغیر گسسته در مدل‌سازی حضور دارند.

#### 4-2- قید سطح مجاز صدا

یکی از اثرات زیست محیطی قابل توجه در احداث مزرعه‌های بادی، انتشار بیش از حد مجاز سطح صدای توربین‌ها به نواحی حساس منطقه مورد بررسی است. برای مدل‌سازی صدا، از معادلات موجود در استاندارد ISO-9613-2 استفاده شده است [18]. جهت تعیین سطح صدای منتشرشده از مزرعه بادی لازم است تا دریافت‌کننده‌هایی در نقاط حساس قرار گیرند. این دریافت‌کننده‌ها محل سکونت انسان یا حیوان هستند. بر این اساس، فشار صدا برای هر دریافت‌کننده از رابطه (15) محاسبه می‌شود.

$$L_f = L_w + D_c - A_f \quad (15)$$

برای اندازه‌گیری میزان صدای قابل تحمل انسان، در عمل از روش اندازه‌گیری میانگین سطح فشار صدا استفاده می‌گردد. این فرمول اندازه مجاز سطح فشار صدا را مشخص می‌کند. در عمل سطح صدای پیوسته میانگین در پایین دست  $L_{p,Avg}$  در مکان مورد نظر، با استفاده از سهم هر منبع صوتی در باندهای هشت‌گانه<sup>1</sup> محاسبه می‌گردد.

$$L_{p,Avg} = 10 \log \left( \sum_{i=1}^{n_s} \left( \sum_{j=1}^8 10^{0.1(L_p(i,j) + A_f(j))} \right) \right) \quad (16)$$

که در آن  $L_w$  توان صدایی است که از منبع منتشر می‌شود،  $D_c$  ضریب اصلاح‌کننده برای منبع است که مرتبط با جهت نیست.  $A_f$  مجموعه‌ای از میراکننده‌ها هستند که شامل اثرهای واگرایی هندسی، قابلیت جذب اتمسفر، اثرات زمین، موانع صدا و غیره می‌باشند.

در رابطه (16)  $n_s$  تعداد منابع انتشار صدا را مشخص می‌کنند که در این جا برابر با تعداد توربین‌ها است.  $j$  یکی از فرکانس‌های میانگین باندهای هشت‌گانه را نشان می‌دهد.  $A_f$  ضریب استاندارد میانگین وزنی را مشخص

در رابطه (9)،  $\theta$  جهت وزش باد،  $X_i$  بیانگر مختصات افقی و  $Y_i$  بیان‌گر مختصات عمودی نقطه  $i$  هستند. با فرض  $0 \leq \beta_{ij} < \pi$ ، معیار  $\gamma$  بیان‌گر آن است که توربین پایین‌دست  $T_2$  در ناحیه ویک توربین بالاترست  $T_1$  قرار دارد. در مطالعه حاضر قید غیرخطی مندرج در رابطه (9) مستقیم وارد محاسبات نشده و صرفاً جهت محاسبه مجموعه نقاطی که در ویک یک توربین مشخص قرار می‌گیرند مورد استفاده قرار گرفته است. فرم خطی شده رابطه (9) به صورت قید (13) در مدل‌سازی وارد گردیده که در ادامه به آن پرداخته خواهد شد.

#### 2-3- تشکیل تابع هدف و قیدها

در مطالعه حاضر فرض گردیده که تابع هدف و قیدها همگی خطی بوده و متغیرها از هر دو نوع عدد صحیح و دودویی تعریف گردیده‌اند. در واقع تابع هدف در رابطه (10) حاصل جمع توان تمامی توربین‌های موجود در مزرعه می‌باشد که در نهایت طبق الگوریتم بهینه‌سازی می‌بایست بیشینه شود. معادله‌ها در این بخش بر پایه مدل‌سازی دانائوان [13] انجام شده است.

$$\sum_{i=1}^n Z_i \quad (10)$$

که در آن  $Z_i$  توان تولید شده توسط هر توربین می‌باشد. اولین قیدی که بر روی تابع هدف اعمال می‌شود، تعداد توربین‌هاست. رابطه (11) تعداد توربین‌ها را طوری تنظیم می‌نماید که برابر  $m$  باشد.  $x_i$  متغیر تصمیم دودویی است که در صورت وجود توربین در نقطه  $i$  مقدار یک و در غیر این صورت مقدار صفر را می‌گیرد.

$$\sum_{i \in V} x_i = m \quad (11)$$

قید دوم، که در رابطه (12) بیان گردیده، به تعیین محدوده مجاز قرارگیری توربین‌ها در نزدیکی یکدیگر می‌پردازد. برای جلوگیری از اثر بیش از حد ویک توربین‌ها بر یکدیگر، نباید فاصله دو توربین از 5 برابر قطر روتور کمتر باشد. در واقع این قید از کاهش فاصله توربین‌ها به کم‌تر از این مقدار جلوگیری می‌کند. اثر ویک در این محدوده تا به حدی است که قرار گرفتن توربین دیگری در این ناحیه به‌صرفه نیست. در عمل قید رابطه (12) مشخص می‌کند که در ناحیه  $\varepsilon$  با اندازه پنج برابر قطر روتور، نمی‌تواند توربین دیگری قرار بگیرد. یعنی تنها یکی از متغیرهای تصمیم  $x_i$  یا  $x_j$  می‌تواند مقدار یک به خود بگیرد.

$$x_i + x_j \leq 1, \quad j \in \varepsilon_i \quad (12)$$

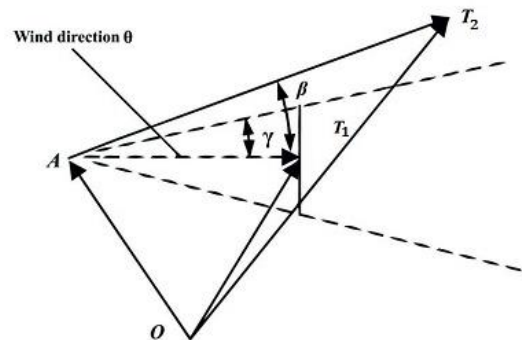


Fig. 2 How to put a turbine in the cone of another turbine speed and display the angles in Formula (9) [8]

شکل 2 نحوه قرارگیری یک توربین در مخروط سرعت توربین دیگر و نمایش زاویه‌ها در فرمول (9) [8]

<sup>1</sup> Octave band

جدول 2 داده‌های ورودی معادله صدا

Table 2 Input data of sound equation

| نام ورودی          | علامت    | مقدار     |
|--------------------|----------|-----------|
| توان منبع          | $L_w$    | 100dB     |
| ضریب تصحیح جهت     | $D_c$    | 0         |
| ضریب جذب صدای محیط | $\alpha$ | 0.005dB/m |

استفاده 2.5 GHz و 5 هسته با 6 GB حافظه می‌باشد. برای به‌دست آوردن جواب‌ها و حل مسئله بهینه‌سازی نیز از حل گر سی‌پلکس<sup>2</sup> استفاده گردیده است.

#### 4- بررسی نتایج

برای بررسی صحت مدل‌سازی، جواب‌های روش موجود با نتایج پژوهش‌های پیشین که با استفاده از الگوریتم‌های تکاملی فراابتکاری حل شده‌اند، مقایسه شد. برای این منظور از نتایج موزتی [1] و گریدی [2] استفاده شد. چون زمین پروژه در مدل‌های مذکور به‌صورت 10 در 10 یا 100 تایی مدل‌سازی شده بود، در این پژوهش نیز از همان مدل 100 سلولی برای مقایسه جواب‌ها استفاده شد. همچنین تعداد توربین‌ها نیز همان تعداد توربین‌های مدل‌های قبلی می‌باشد. گل‌بادها<sup>3</sup> نیز در سه مدل مختلف انتخاب شده‌اند. زمان نهایی حل یک ساعت در نظر گرفته شده است.

#### 4-1- گل‌باد الف

در این گل‌باد، سرعت مقداری ثابت و برابر با 12 m/s دارد. باد فقط از یک جهت و برابر با راستای منفی محور x می‌وزد. شکل 3 جهت وزش این گل‌باد را نشان می‌دهد.

جدول 3 مقایسه نتایج بین مدل موزتی و گریدی با مدل ارائه شده در پژوهش حاضر را نشان می‌دهد. نتایج نشان می‌دهد که پاسخ مدل موزتی بر پاسخ نهایی مدل حاضر، که همان توان بیشینه قابل حصول در مساله است، منطبق نمی‌باشد و به‌عبارتی مدل موزتی [1] در بهینه محلی متوقف گردیده است. همان‌طور که اشاره شد این ضعف در پاسخ الگوریتم‌های فراابتکاری وجود دارد. مقایسه چیدمان توربین‌ها محاسبه شده به‌وسیله مدل حاضر و مدل موزتی در شکل‌های 4 و 5 قابل مشاهده می‌باشد. همان‌طور که در شکل 4 ملاحظه می‌شود مدل موزتی قادر به یافتن پاسخ دقیق و بدیهی مساله ساده مورد بررسی نیست. این درحالی است که مدل گسسته حاضر پاسخ بهینه و بدیهی مساله را شناسایی کرده است. شبیه به چنین مقایسه‌ای، این بار با مدل گریدی [2] در شکل 5 صورت پذیرفته است که نتایج مدل حاضر

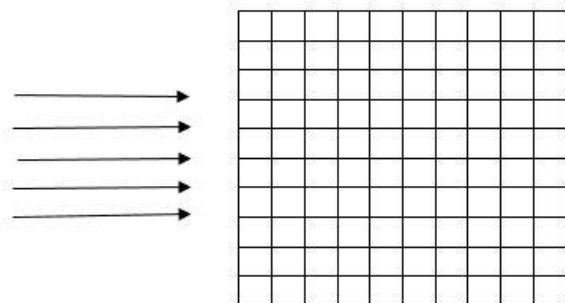


Fig. 3 The wind direction in the wind rose a

شکل 3 جهت وزش باد در گل‌باد الف

می‌سازد. این پارامتر از ترم‌های تضعیف مختلف تشکیل شده است که به صورت رابطه (17) است. [19]

$$A_f = A_{div} + A_{atm} + A_{gr} + A_{bar} + A_{misc} \quad (17)$$

که در آن  $A_{div}$  بیان‌گر اثرات واگرایی هندسی،  $A_{atm}$  جذب اتمسفر،  $A_{gr}$  جذب زمین،  $A_{bar}$  موانع صدا را نشان می‌دهند و  $A_{misc}$  شامل اثرات خنثی دیگر می‌باشد.

اژانس بین‌المللی انرژی<sup>1</sup> روشی برای به‌دست آوردن فشار صدا به عنوان تابعی از فاصله اقلیدسی بین یک یا گروهی از توربین‌ها و دریافت‌کننده صدا در زمین‌های صاف ارائه کرده است. این محاسبه بر مبنای گسترش نیم‌کره‌ای و در نظر گرفتن اثرات جذب اتمسفر بدون در نظر گرفتن اثرات هندسی بنا نهاده شده که در رابطه (18) ارایه گردیده است.

$$L_p(d_{ir}) = L_w - 10 \log_{10}(2\pi d_{ir}^2) - \alpha_s d_{ir} \quad (18)$$

که در آن،  $d_{ir}$  فاصله اقلیدسی بین توربین‌ها و دریافت‌کننده‌ها می‌باشد،  $i$  نشان‌دهنده توربین مورد نظر،  $r$  نشان‌دهنده دریافت‌کننده صدا و  $\alpha_s$  ضریب جذب صدا در هر باند هشت‌گانه (حدود 0.005dB/m) هستند. برای هر توربین به‌تنهایی با استفاده از رابطه (18) سطح فشار صدا حساب گردیده و در نهایت در رابطه (16) با یک‌دیگر جمع می‌شوند.

#### 3- مقداردهی عددی مسئله

یک زمین مربعی به عنوان مزرعه بادی انتخاب شده است. در این پژوهش، اندازه هر ضلع سلول در ابتدا 5 برابر قطر روتور در نظر گرفته می‌شود. این فاصله برای جلوگیری از تأثیر بیش از اندازه اثر ویک پیشنهاد گردیده است. با در نظر گرفتن این فاصله بهره‌وری و توان تولیدی خروجی افزایش می‌یابد. همچنین اندازه سلول‌ها به‌ترتیب به دو نیم برابر و دقیقاً برابر قطر روتور نیز کاهش یافت. این کاهش اندازه باعث افزایش سلول‌ها به‌ترتیب به 400 و 2500 سلول شد.

در این پژوهش فرض بر این است که در مزرعه بادی فقط از یک نوع توربین استفاده شده است؛ که در نتیجه دارای قطر روتور، تعداد پره و ارتفاع هاب یکسان می‌باشند. مشخصات توربین در جدول 1 آورده شده است.

زمین پروژه هیچ محدودیتی برای قرار گرفتن توربین‌ها در آن ندارد و ناهمواری‌های مسئله با ارتفاع زبری  $Z_0$  در معادلات وارد شده است. زمین با دسته‌بندی سلول‌ها به مربع‌هایی با اندازه‌ی مشخص، نظیر یک ماتریس عمل می‌کند که بودن یا نبودن توربین در هر سلول به‌صورت یک یا صفر قراردادن مشخصه هر سلول تعیین می‌شود. پارامترهای ورودی سطح صدا نیز در جدول 2 آمده است.

برای وارد کردن داده‌های اولیه، ایجاد مدل فیزیکی، مدل ریاضی و تشکیل ماتریس‌ها از نرم‌افزار متلب استفاده شده است. همچنین سیستم مورد

جدول 1 داده‌های ورودی مزرعه بادی

| نام ورودی         | علامت    | مقدار |
|-------------------|----------|-------|
| ارتفاع هاب توربین | $z$      | 60m   |
| شعاع روتور        | $r_0$    | 20m   |
| ضریب اطمینان      | $C_t$    | 0.88  |
| زبری زمین         | $Z_0$    | 0.3m  |
| ضریب کاهش محوری   | $a$      | 0.326 |
| سرعت باد          | $u_0$    | 12m/s |
| ثابت گسترش        | $\alpha$ | 0.102 |

<sup>1</sup> IEA

<sup>2</sup> CPLEX

<sup>3</sup> Wind Rose

و مدل گریدی بر پاسخ بهینه و بدیهی مساله کاملاً منطبق است.

#### 2-4- گل‌باد ب

در این گل‌باد، باد با سرعت ثابت 12 m/s و توزیع آن در طول سال نسبت به جهت کاملاً یکنواخت است که در مدل حاضر اثر آن در 36 جهت در نظر گرفته شده است. برخلاف مدل الف، مدل ب دارای پاسخ بدیهی نمی‌باشد. جدول 4 مقایسه بین نتایج مدل‌های پیشین و پژوهش حاضر را نشان می‌دهد.

مقایسه جواب‌های مدل موزتی و مدل حاضر نشان می‌دهد که مدل فراابتکاری موزتی [1] قادر به یافتن پاسخ دقیق مساله نیست و توان خروجی

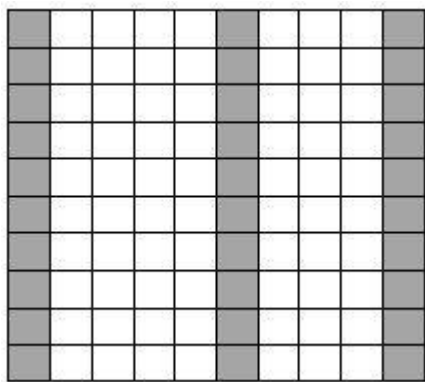


Fig. 5- b Sort 30 turbines for wind rose a in the present study

شکل 5- ب چیدمان 30 توربین برای گل‌باد الف در پژوهش حاضر

جدول 3 مقایسه نتایج گل‌باد الف

Table 3 Compare the results of wind rose a

| بازده % | توان (kW) | تعداد توربین | مدل        |
|---------|-----------|--------------|------------|
| 82      | 12352     | 26           | موزتی [1]  |
| 84      | 12563     | 26           | پژوهش حاضر |
| 83      | 14310     | 30           | گریدی [2]  |
| 83      | 14310     | 30           | پژوهش حاضر |

جدول 4 مقایسه نتایج گل‌باد ب

Table 4 Compare the results of wind rose b

| بازده % | توان (kW) | تعداد توربین | مدل        |
|---------|-----------|--------------|------------|
| 84      | 9244.7    | 19           | موزتی [1]  |
| 88      | 9671.3    | 19           | پژوهش حاضر |
| 77      | 17220     | 39           | گریدی [2]  |
| 83      | 18671     | 39           | پژوهش حاضر |

مدل حاضر به طرز قابل ملاحظه‌ای بیش‌تر از توان محاسبه شده توسط مدل موزتی می‌باشد. نتایج نشان می‌دهد که مدل حاضر در مقایسه با مدل موزتی، 4 بازده توان مزرعه را افزایش داده است. در ادامه، نتایج جدول 4 نشان می‌دهد مدل گریدی نیز که در گل‌باد نوع الف توانسته بود به پاسخ دقیق برسد در این گل‌باد حداکثر راندمان قابل حصول در چنین مساله‌ای را حدود 7 درصد کمتر از مدل حاضر پیش‌بینی می‌نماید. چیدمان توربین‌های محاسبه شده توسط مدل حاضر در قیاس با مدل‌های موزتی و گریدی در شکل‌های 6 و 7 آورده شده است.

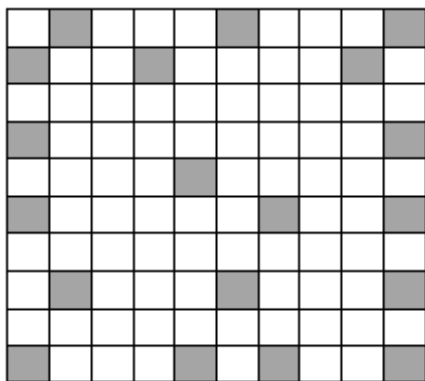


Fig. 6- a Sort 19 turbines for wind rose b in the Mosetti model [1]

شکل 6- الف چیدمان 19 توربین برای گل‌باد ب در مدل موزتی [1]

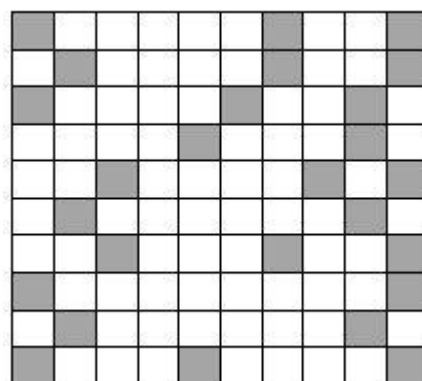


Fig. 4- a Sort 26 turbines for wind rose a in the Mosetti model [1]

شکل 4- الف چیدمان 26 توربین برای گل‌باد الف در مدل موزتی [1]

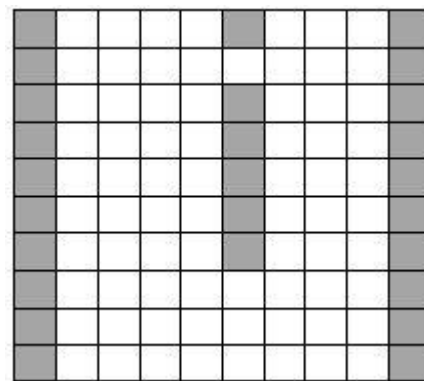


Fig. 4- b Sort 26 turbines for wind rose a in the present study

شکل 4- ب چیدمان 26 توربین برای گل‌باد الف در پژوهش حاضر

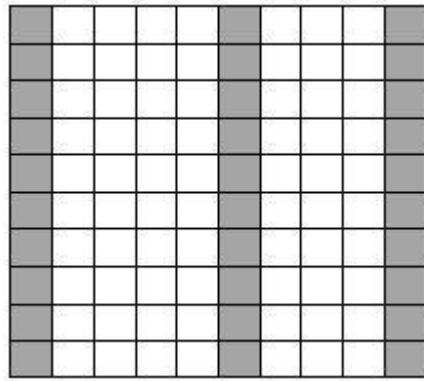


Fig. 5- a Sort 30 turbines for wind rose a in the Grady model [2]

شکل 5- الف چیدمان 30 توربین برای گل‌باد الف در مدل گریدی [2]

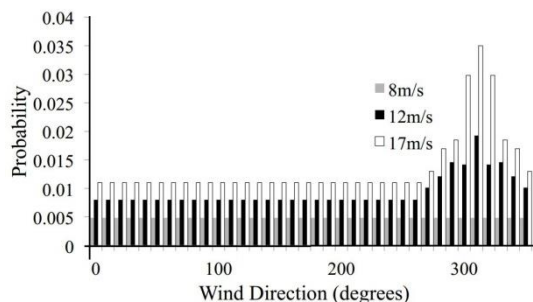


Fig. 8 Probabilities of different wind direction and wind speed combinations used in wind rose c

شکل 8 احتمال‌های جهت‌های مختلف و سرعت باد در گل‌باد ج

جدول 5 مقایسه نتایج گل‌باد ج

Table 5 Compare the results of wind rose c

| بازده % | توان (kW) | تعداد توربین | مدل        |
|---------|-----------|--------------|------------|
| 84      | 13343     | 15           | موزتی [1]  |
| 88      | 13475     | 15           | پژوهش حاضر |
| 77      | 32038     | 39           | گریدی [2]  |
| 83      | 32263     | 39           | پژوهش حاضر |

تحلیل نتایج گل‌باد ب و ج نسبت به گل‌باد الف نشان می‌دهد که هرچه مساله مورد بررسی به شرایط واقعی، از جمله مدل گل‌باد واقعی نزدیک‌تر می‌گردد، احتمال توقف الگوریتم‌های فراابتکاری در بهینه محلی و کاهش دقت آن‌ها بیشتر خواهد شد. چیدمان توربین‌ها تحت شرایط مورد بررسی در شکل‌های 9 و 10 آورده شده است.

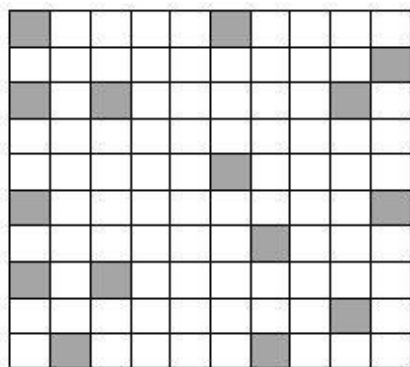


Fig. 9-a Sort 15 turbines for wind rose c in the Mosetti model [1]

شکل 9-الف چیدمان 15 توربین برای گل‌باد ج در مدل موزتی [1]

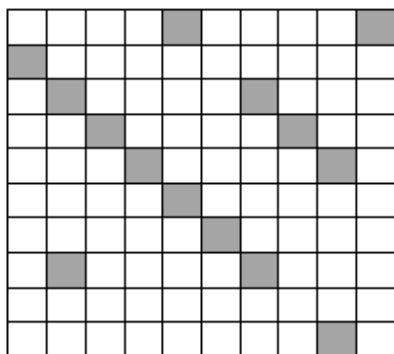


Fig. 9-b Sort 15 turbines for wind rose c in the present study

شکل 9-ب چیدمان 15 توربین برای گل‌باد ج در پژوهش حاضر

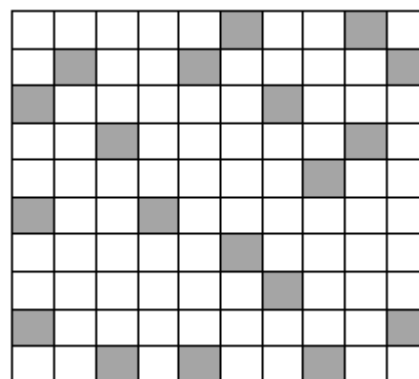


Fig. 6-b Sort 19 turbines for wind rose b in the present study

شکل 6-ب چیدمان 19 توربین برای گل‌باد ب در پژوهش حاضر

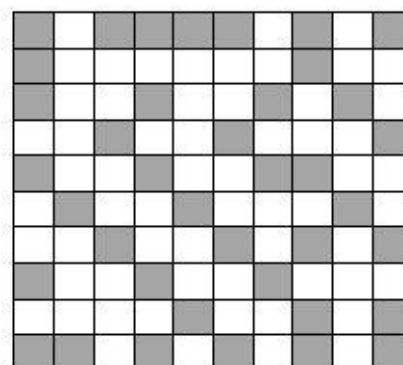


Fig. 7-a Sort 39 turbines for wind rose b in the Grady model [2]

شکل 7-الف چیدمان 39 توربین برای گل‌باد ب در مدل گریدی [2]

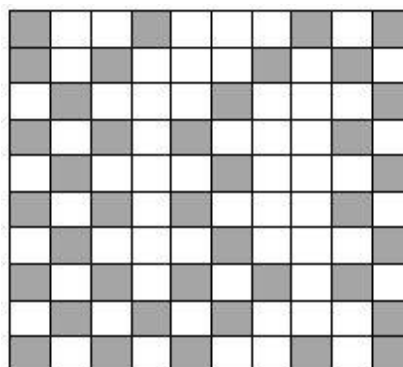


Fig. 7-b Sort 39 turbines for wind rose b in the present study

شکل 7-ب چیدمان 39 توربین برای گل‌باد ب در پژوهش حاضر

### 3-4- گل‌باد ج

در این گل‌باد، باد با سرعت‌های متغیر 8، 12 و 17 متر بر ثانیه و در 36 جهت و با توزیع ارایه شده در شکل 8 به سمت مزرعه می‌وزد. همان‌طور که ملاحظه می‌شود احتمال وزش باد متفاوت و در زوایه‌های بین 270 تا 360 درجه بیش از سایر زوایا است.

جدول 5 مقایسه نتایج مطالعه‌های موزتی و گریدی و نتایج حاصل از مدل‌سازی حاضر را با لحاظ گل‌باد ج نشان می‌دهد. نتایج حاکی از آن است که در این شرایط نیز مدل موزتی و گریدی پتانسیل ارایه نتایج بهینه مطلق را نداشته و مقادیر بازده مدل حاضر در شرایط مورد بررسی 4 و 7 درصد بیش‌تر از مقدار تخمین زده شده توسط، به‌ترتیب مدل‌های موزتی [1] و گریدی [2] می‌باشد.

خروجی مزرعه افزایش می‌یابد. این افزایش به‌نوعی می‌تواند تحت تأثیر ایجاد حالت‌های بیش‌تر جهت کاهش اثر ویک توربین‌ها بر روی یک‌دیگر باشد. در واقع در حالت 100 سلول، فاصله توربین‌ها مضربی از 5 برابر قطر روتور به‌دست خواهد آمد که لزوماً حالت بهینه نخواهد بود. با افزایش تعداد سلول‌ها و در نظر گرفتن فاصله‌های کم‌تر، حل‌گر حالت‌های بیش‌تری جهت قراردادن توربین‌ها و چیدمان آن‌ها در زمین مزرعه خواهد داشت و لذا نتایج به نتایج مدل پیوسته نزدیک‌تر خواهد بود. البته ارتباط یکسانی میان نتایج توربین‌ها و تعداد سلول‌ها مشاهده نمی‌شود و نتایج نشان می‌دهد که این افزایش در مواردی چشم‌گیر بوده و عملاً نیاز به افزایش تعداد سلول‌ها جهت دستیابی به پاسخ‌های دقیق‌تر کاملاً محسوس است. به طور مثال در گل‌باد مدل الف در جدول 5، اختلاف توان خروجی مزرعه برای 40 توربین در 100 سلول و 400 سلول، برابر 3465 کیلو وات می‌باشد که 20 درصد افزایش توان خروجی را ایجاد کرده است، در حالی‌که برای همین گل‌باد با 20 توربین، تفاوت توان خروجی بین 100 و 400 سلول، 2 درصد می‌باشد.

از طرف دیگر بر طبق انتظار، افزایش تعداد توربین منجر به افزایش چشم‌گیر توان خروجی خواهد شد و البته به نظر در این حالت، جهت یافتن مکان بهینه توربین‌ها بعضاً شبکه ریزتری لازم است.

#### 4-5- بررسی اثر صدا

برای بررسی تأثیر سطح صدا در جواب‌ها، قید صدا در معادله بهینه‌سازی وارد گردید. فاصله منطقه مسکونی مستقل تا مزرعه 500 متر و سطح صدای مجاز در این منطقه 40 دسی‌بل در نظر گرفته شده است [20]. سه مکان در موقعیت‌های مختلف برای دریافت‌کننده‌ها در نظر گرفته شده است. سطح مجاز صدا برای همه‌ی دریافت‌کننده‌ها 40dB می‌باشد. میدا مختصات در گوشه سمت چپ پایین قرار دارد. دریافت‌کننده R1، در وسط مزرعه بادی و در مختصات (1000m, 1000m)، دریافت‌کننده R2، در ضلع شمالی مزرعه و در مختصات (1000m, 2000 m) و دریافت‌کننده R3، در فاصله 500 متری ضلع شمالی و در مختصات (1000m, 2500m) قرار داده شدند.

برای گل‌باد الف مدلی با 30 توربین، برای گل‌باد ب مدلی با 19 توربین و برای گل‌باد ج مدلی با 39 توربین با لحاظ قید صدا در نظر گرفته شد. جدول 9 نتایج گل‌باد الف همراه با 30 توربین، جدول 10 نتایج گل‌باد ب همراه با 19 توربین و جدول 10 نتایج برای گل‌باد ج همراه با 39 توربین را نشان می‌دهند.

همان‌طور که مشاهده می‌شود در حالتی که قید صدا بر روی دریافت‌کننده R1 اعمال می‌گردد مستقل از نوع گل‌باد، بیش‌ترین تعداد توربین مجاز 6 می‌باشد. در واقع تعداد بیش‌تر توربین منجر به انحراف از قید صدا خواهد

جدول 9 نتایج قید صدا برای گل‌باد الف

| Table 9 Results of sound constraint for wind rose a |                 |                 |
|-----------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| دریافت‌کننده                                        | تعداد توربین‌ها | توان خروجی (kW) |
| R1                                                  | 6               | 3206            |
| R2                                                  | 30              | 12378           |
| R3                                                  | 30              | 13346           |

جدول 10 نتایج قید صدا برای گل‌باد ب

| Table 10 Results of sound constraint for wind rose b |                 |                 |
|------------------------------------------------------|-----------------|-----------------|
| دریافت‌کننده                                         | تعداد توربین‌ها | توان خروجی (kW) |
| R1                                                   | 6               | 3206            |
| R2                                                   | 19              | 8772            |
| R3                                                   | 19              | 9140            |

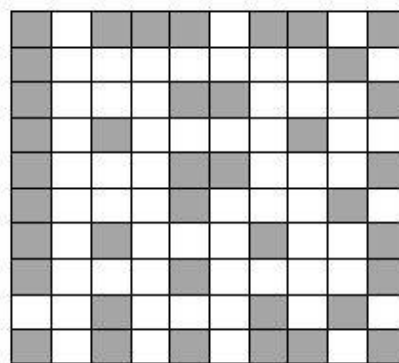


Fig. 10- a Sort 39 turbines for wind rose c in the Grady model [2]

شکل 10- الف چیدمان 39 توربین برای گل‌باد ج در مدل گریدی [2]

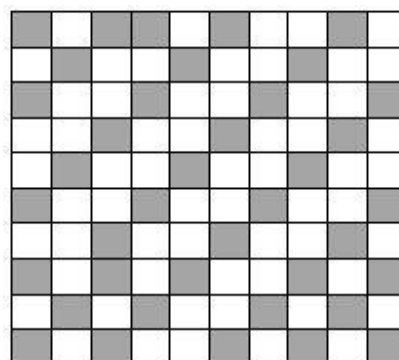


Fig. 10- b Sort 39 turbines for wind rose c in the present study

شکل 10- ب چیدمان 39 توربین برای گل‌باد ج در پژوهش حاضر

#### 4-4- بررسی اثر تعداد سلول‌ها

در این بخش، برای سه گل‌باد مذکور، در اندازه و تعداد سلول‌های متفاوت، توان خروجی به‌دست آمد. در این حالت، قید صدا وارد معادله‌های بهینه‌سازی نشده است. اندازه سلول‌ها، پنج برابر، دو و نیم برابر و برابر قطر روتور در نظر گرفته شده‌اند که به‌ترتیب تعداد سلول‌ها 100، 400 و 2500 به دست خواهند آمد.

نتایج جدول‌های 6 تا 8 نشان می‌دهد که با افزایش تعداد سلول‌ها، توان

جدول 6 نتایج گل‌باد الف در تعداد سلول‌های مختلف

| Table 6 Results of wind rose a in different cell numbers |          |          |           |
|----------------------------------------------------------|----------|----------|-----------|
| تعداد توربین                                             | 100 سلول | 400 سلول | 2500 سلول |
| 20                                                       | 10256    | 10368    | 10368     |
| 30                                                       | 12667    | 15341    | 15552     |
| 40                                                       | 16711    | 20167    | 20763     |

جدول 7 نتایج گل‌باد ب در تعداد سلول‌های مختلف

| Table 7 Results of wind rose b in different cell numbers |          |          |           |
|----------------------------------------------------------|----------|----------|-----------|
| تعداد توربین                                             | 100 سلول | 400 سلول | 2500 سلول |
| 20                                                       | 10145    | 10368    | 10368     |
| 30                                                       | 14715    | 14815    | 15460     |
| 40                                                       | 18974    | 19206    | 19980     |

جدول 8 نتایج گل‌باد ج در تعداد سلول‌های مختلف

| Table 8 Results of wind rose c in different cell numbers |          |          |           |
|----------------------------------------------------------|----------|----------|-----------|
| تعداد توربین                                             | 100 سلول | 400 سلول | 2500 سلول |
| 20                                                       | 17199    | 17490    | 17506     |
| 30                                                       | 25016    | 25120    | 25201     |
| 40                                                       | 31570    | 32588    | 33010     |

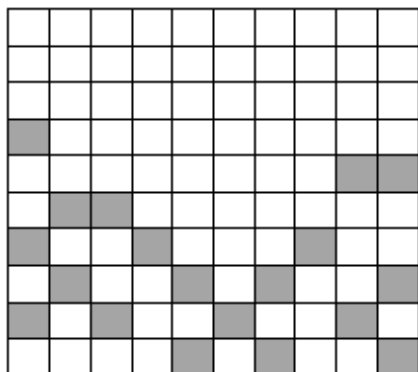


Fig. 13 Sort 19 turbines for wind rose b with sound in receptor R2

شکل 13 چیدمان 19 توربین برای گل‌باد ب با قید صدا در دریافت‌کننده R2

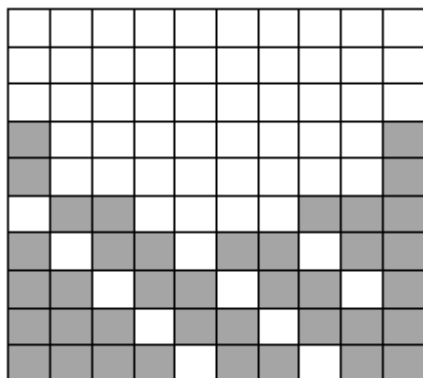


Fig. 14 Sort 39 turbines for wind rose c with sound in receptor R2

شکل 14 چیدمان 39 توربین برای گل‌باد ج با قید صدا در دریافت‌کننده R2

خروجی می‌گذارد.

در نهایت به بررسی اثر دریافت‌کننده R3 که در فاصله‌ی 500 متری مزرعه قرار گرفته است پرداخته می‌شود. توان خروجی مزرعه با اعمال قید صدا برای گل‌باد الف، 13346kW، برای گل‌باد ب 9140kW و برای گل‌باد ج 31015kW به‌دست آمد. در این حالت کاهش توان در مواجهه با قید صدا به نسبت دریافت‌کننده‌های دیگر به‌مراتب کم‌تر است. اختلاف توان 1932، 899 و 4711 کیلوواتی با مدل بدن قید صدا به‌ترتیب برای 30، 19 و 39 توربین، برای دریافت‌کننده R2 به 964، 531 و 1248 کیلووات برای دریافت‌کننده R3 رسید. لذا می‌بایست به فاصله مزرعه تا مناطق مسکونی توجه ویژه نمود، یا در صورت امکان با صاحبان نقاط حساس به صدا، تعامل صورت گیرد. البته در بررسی‌های بعدی می‌توان تأثیر هزینه تعامل با صاحبان مکان‌های حساس به صدا را وارد مدل‌سازی کرده و نقطه بهینه با یک آنالیز دقیق محاسبه گردد. در شکل‌های 15 تا 17 به‌ترتیب برای دریافت‌کننده‌های R2، R1 و R3 چیدمان توربین‌ها همراه با قید صدا آورده شده است. مشاهده می‌شود که تراکم چیدمان توربین‌ها در این حالت نسبت به دریافت‌کننده R2 کم‌تر شده است و توربین‌ها تا ردیف نهم سلول‌ها را پر کرده‌اند. البته این آرایش تراکم بیش‌تری نسبت به حالت بدون قید صدا که توربین‌ها تا آخرین ردیف را پر می‌کنند، دارد.

##### 5- نتیجه‌گیری

در این پژوهش مدل خطی گسسته جایگزین مدل پیوسته غیر خطی گردیده است. این مدل با استفاده از روش برنامه‌ریزی عدد صحیح خطی برای یافتن بیشینه توان خروجی مزرعه بادی می‌باشد. نتایج با مقادیر محاسبه شده

جدول 11 نتایج قید صدا برای گل‌باد ج

Table 11 Results of sound constraint for wind rose c

| دریافت‌کننده | تعداد توربین‌ها | توان خروجی (kW) |
|--------------|-----------------|-----------------|
| R1           | 6               | 5176.3          |
| R2           | 39              | 27552           |
| R3           | 39              | 31015           |

شد. شکل 11 چیدمان 6 توربین را در مزرعه‌ای با دریافت‌کننده R1 نشان می‌دهد. مشخص است که توربین‌ها در کناره‌های زمین و به دور از دریافت‌کننده قرار می‌گیرند.

دریافت‌کننده R2 که روی ضلع شمالی مزرعه بادی قرار گرفته است، اجازه قرارگیری 30 توربین برای گل‌باد الف، 19 توربین برای گل‌باد ب و 39 توربین برای گل‌باد ج را می‌دهد. مشاهدات حاکی از آن است که قید صدا مربوط به R2 کماکان کاهش توان چشم‌گیری را در بر دارد. عملاً برای گل‌باد الف و مزرعه‌ای با 30 توربین، توان خروجی از 14310kW به حدود 12378kW کاهش پیدا کرد. هم‌چنین در گل‌باد ب با اعمال 19 توربین نیز توان از 9671 kW به 8772kW و در گل‌باد ج با اعمال 39 توربین، توان از 32263kW به 27552kW رسید. شکل‌های 12، 13 و 14 به‌ترتیب چیدمان این مدل‌ها را با قید صدا نشان می‌دهند. همان‌طور که در شکل‌های 12، 13 و 14 دیده می‌شود، توربین‌ها تا ردیف هفتم سلول‌ها را پر کرده‌اند و آرایش متراکم‌تری به‌خود گرفته‌اند که سبب کاهش توان در مزرعه بادی شده است.

با بررسی این نتایج مشهود است که در موارد مورد بررسی، با افزایش تعداد توربین، قید صدا افت توان بیش‌تری ایجاد می‌نماید. به‌نوعی، در نظر گرفتن قید صدا می‌تواند منجر به کم شدن فاصله توربین‌ها و افزایش اثر ویک شود، که این موضوع با افزایش تعداد توربین، تأثیر بیش‌تری بر کاهش توان

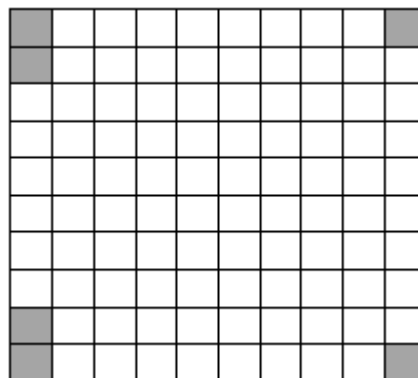


Fig. 11 Sort turbines for all wind rose in receptor R1

شکل 11 چیدمان توربین برای همه گل‌بادها در دریافت‌کننده R1

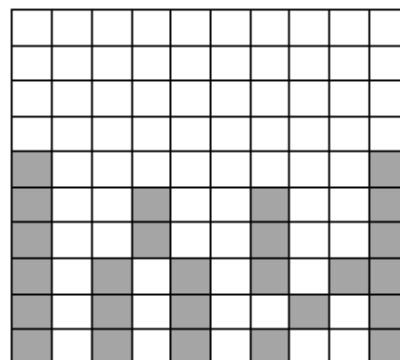


Fig. 12 Sort 30 turbines for wind rose a with sound in receptor R2

شکل 12 چیدمان 30 توربین برای گل‌باد الف با قید صدا در دریافت‌کننده R2

## 6- فهرست علائم

|                 |                                                                    |
|-----------------|--------------------------------------------------------------------|
| $A$             | مساحت حاصل از چرخش پره‌ها ( $m^2$ )                                |
| $A_{atm}$       | اثر تضعیف اتمسفر (dB)                                              |
| $A_{bar}$       | اثر موانع صدا (dB)                                                 |
| $A_{div}$       | اثر تضعیف واگرایی (dB)                                             |
| $A_{gr}$        | اثر تضعیف زمین (dB)                                                |
| $A_{misc}$      | اثرهای خنثی دیگر (dB)                                              |
| $A_f$           | پارامتر تضعیف صدا (dB)                                             |
| $a$             | ضریب کاهش محوری                                                    |
| $\alpha_s$      | ضریب جذب صدای محیط (dB/m)                                          |
| $c_t$           | ضریب اعتماد                                                        |
| $D_c$           | ضریب تصحیح جهت                                                     |
| $d_{ir}$        | فاصله اقلیدسی بین توربین‌ها و دریافت کننده (m)                     |
| $k$             | ثابت گسترش اثر ویک                                                 |
| $L_{p.Avg}$     | سطح صدای پیوسته میانگین در پایین دست (dB)                          |
| $L_f$           | سطح صدا در دریافت کننده (dB)                                       |
| $L_w$           | سطح صدا در منبع (dB)                                               |
| $m$             | تعداد توربین                                                       |
| $n_s$           | تعداد منابع صدا                                                    |
| $P$             | توان خروجی مزرعه (kW)                                              |
| $P_d$           | احتمال وزش باد در جهت $d$                                          |
| $r_d$           | شعاع (m)                                                           |
| $r$             | شعاع در پایین دست ناحیه ویک (m)                                    |
| $r_o$           | شعاع روتور (m)                                                     |
| $u_{id,\infty}$ | سرعت آزاد باد در بالادست توربین $i$ در جهت $d$ (m/s)               |
| $u_{ijd}$       | سرعت باد در نقطه $i$ باتوجه به اثر ویک توربین $j$ در جهت $d$ (m/s) |
| $u$             | سرعت پایین دست ناحیه ویک (m/s)                                     |
| $u_o$           | سرعت بالادست ناحیه ویک (m/s)                                       |
| $W_{i,\theta}$  | مجموعه نقاطی که در زاویه $\theta$ در ویک نقطه $i$ قرار دارند.      |
| $\omega_{i,j}$  | متغیر نشان‌دهنده اثر ویک دو توربین بر یکدیگر                       |
| $X_i$           | مختصات افقی توربین در دستگاه مختصات مزرعه بادی (m)                 |
| $x_i$           | متغیر باینری نشان‌دهنده وجود یا عدم وجود توربین                    |
| $Y_i$           | مختصات عمودی توربین در دستگاه مختصات مزرعه بادی (m)                |
| $z$             | ارتفاع هاب توربین (m)                                              |
| $Z_i$           | توان هر توربین بادی در مدل ریاضی (kW)                              |

## علائم یونانی

|               |                                                      |
|---------------|------------------------------------------------------|
| $\alpha$      | مقدار گسترش ویک                                      |
| $\rho$        | چگالی هوا ( $kg/m^3$ )                               |
| $E$           | ناحیه‌ای که فقط یک توربین می‌تواند قرار گیرد.        |
| $\eta$        | بازده                                                |
| $\beta_{i,j}$ | زاویه بین دو بردار مخروط رسم شده بین توربین‌ها (rad) |
| $\theta$      | جهت وزش باد (rad)                                    |
| $\Gamma$      | تانژانت ثابت گسترش ویک                               |

## 7- مراجع

- [1] G. Mosetti, 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.

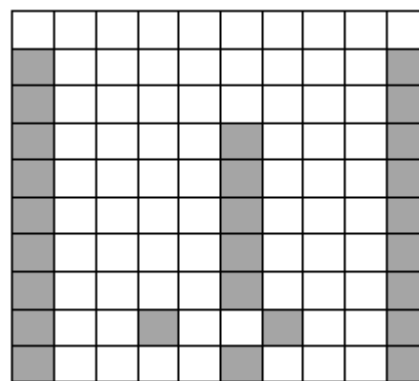


Fig. 15 Sort 30 turbines for wind rose a with sound in receptor R3

شکل 15 چیدمان 30 توربین برای گل‌باد الف با قید صدا در دریافت کننده R3

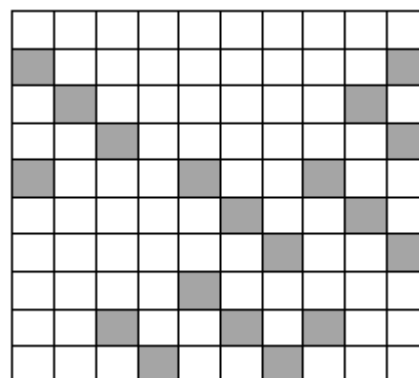


Fig. 16 Sort 19 turbines for wind rose b with sound in receptor R3

شکل 16 چیدمان 19 توربین برای گل‌باد ب با قید صدا در دریافت کننده R3

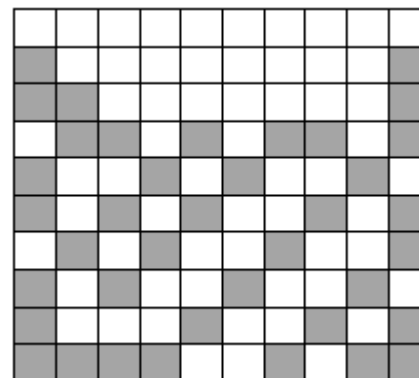


Fig. 17 Sort 39 turbines for wind rose c with sound in receptor R3

شکل 17 چیدمان 39 توربین برای گل‌باد ج با قید صدا در دریافت کننده R3

توسط مدل‌های فراابتکاری مقایسه گردید. نتایج نشان داد که روش حاضر، جواب بهینه‌تری را نسبت به روش‌های پیشین ارائه می‌کند. این بهبود در جواب‌ها در مدل‌های گل‌باد پیچیده، که به مدل‌های واقعی نزدیک‌تر بودند، بیش‌تر نمایان شد. هم‌چنین اثر تعداد سلول‌ها نیز بر روی جواب‌های خروجی مسئله بررسی گردید. نتایج نشان می‌دهد که رابطه مشخصی میان افزایش سلول‌ها و توان خروجی نیست و البته در مواردی می‌تواند این افزایش منجر به افزایش قابل توجه توان خروجی شود. سطح صدا نیز در بخشی دیگر به عنوان قید وارد مسئله شد. این قید با سه دریافت‌کننده در مکان‌های مختلف لحاظ گردید. نتایج نشان می‌دهد که محل‌های حساس به قید صدا که در داخل مزرعه قرار می‌گیرند افت توان چشم‌گیری ایجاد می‌کنند.

- [12] S. Chowdhury, J. Zhang, A. Messac, L. Castillo, Unrestricted wind farm layout optimization (UWFLO): Investigating key factors influencing the maximum power generation, *Renewable Energy*, Vol. 38, No. 1, pp. 16-30, 2012.
- [13] S. Donovan, An improved mixed integer programming model for wind farm layout optimisation, *Proceeding of*, 143-151.
- [14] R. Archer, G. Nates, S. Donovan, H. Waterer, Wind turbine interference in a wind farm layout optimization mixed integer linear programming model, *Wind Engineering*, Vol. 35, No. 2, pp. 165-175, 2011.
- [15] S. D. O. Turner, D. A. Romero, P. Y. Zhang, C. H. Amon, T. C. Y. Chan, A new mathematical programming approach to optimize wind farm layouts, *Renewable Energy*, Vol. 63, No. Supplement C, pp. 674-680, 2014/03/01/, 2014.
- [16] J. Y. J. Kuo, D. A. Romero, J. C. Beck, C. H. Amon, Wind farm layout optimization on complex terrains – Integrating a CFD wake model with mixed-integer programming, *Applied Energy*, Vol. 178, No. Supplement C, pp. 404-414, 2016/09/15/, 2016.
- [17] N. O. Jensen, A note on wind generator interaction, *RISO National Laboratory, Roskilde, Denmark*, Technical report Riso-M-2411, 1983.
- [18] J. F. Herbert-Acero, O. Probst, P.-E. Réthoré, G. C. Larsen, K. K. Castillo-Villar, A review of methodological approaches for the design and optimization of wind farms, *Energies*, Vol. 7, No. 11, pp. 6930-7016, 2014.
- [19] W. Y. KWong, P. Y. Zhang, D. Romero, J. Moran, M. Morgenroth, C. Amon, Wind farm layout optimization considering energy generation and noise propagation, *Proceeding of International design Engineering Technical Conferences & Computers and Information in Engineering Conference*, Chicago, IL, USA, August 12-15, 2012.
- [20] J. P. Harrison, Wind turbine noise, *Bulletin of Science, Technology & Society*, Vol. 31, No. 4, pp. 256-261, 2011.
- [2] S. Grady, M. Hussaini, M. M. Abdullah, Placement of wind turbines using genetic algorithms, *Renewable Energy*, Vol. 30, No. 2, pp. 259-270, 2005.
- [3] A. Emami, P. Noghreh, New approach on optimization in placement of wind turbines within wind farm by genetic algorithms, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 7, pp. 1559-1564, 2010.
- [4] J. S. González, A. G. G. Rodriguez, J. C. Mora, J. R. Santos, M. B. Payan, Optimization of wind farm turbines layout using an evolutive algorithm, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 8, pp. 1671-1681, 2010.
- [5] G. Marmidis, S. Lazarou, E. Pyrgioti, Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation, *Renewable Energy*, Vol. 33, No. 7, pp. 1455-1460, 2008.
- [6] L. Ekonomou, 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.
- [7] A. Mittal, *Optimization of the Layout of large Wind Farms Using a Genetic Algorithm*, Thesis, Case Western Reserve University, 2010.
- [8] A. Kusiak, Z. Song, Design of wind farm layout for maximum wind energy capture, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 3, pp. 685-694, 2010.
- [9] U. A. Ozturk, B. A. Norman, Heuristic methods for wind energy conversion system positioning, *Electric Power Systems Research*, Vol. 70, No. 3, pp. 179-185, 2004.
- [10] S. Chowdhury, J. Zhang, A. Messac, L. Castillo, Optimizing the arrangement and the selection of turbines for wind farms subject to varying wind conditions, *Renewable Energy*, Vol. 52, pp. 273-282, 2013.
- [11] I. Mustakarov, D. Borissova, Wind turbines type and number choice using combinatorial optimization, *Renewable Energy*, Vol. 35, No. 9, pp. 1887-1894, 2010.