

التوزيع الأمثل للعنفات الريحية ضمن المزارع الريحية الكبيرة باستخدام الخوارزمية الجينية

أ.د. عمار حجار * أ.د. زيد بدر * م. هبة قمر الدين **

(الإيداع: 22 تشرين الأول 2019 ، القبول: 23 كانون الثاني 2020)

الملخص:

يهدف هذا البحث إلى الحصول على التوزيع الأمثل للعنفات الريحية ضمن المزارع الريحية الكبيرة، في مرحلة التخطيط، للحصول على استطاعة الخرج الأعظمية من المزارع الريحية وذلك من خلال تخفيض الضياعات الناتجة عن التداخل الريحي بين العنفات الريحية. لذا، تم في هذا البحث استخدام الخوارزمية الجينية (GA) لتحديد التوزيع الأمثل للعنفات الريحية ضمن مزرعة ريحية افتراضية، وذلك لأجل ثلاث حالات مختلفة للرياح: رياح ثابتة السرعة والاتجاه، رياح ثابتة السرعة متغيرة الاتجاه ورياح متغيرة السرعة والاتجاه.

لقد تم في هذا البحث استخدام نموذج جينسن لتمثيل أثر التداخل الريحي بين العنفات الريحية، الذي يتم من خلاله تحديد سرعة الرياح أمام جميع العنفات الريحية المتأثرة بالتداخل الريحي، ومن ثم يتم حساب الاستطاعة الكلية المنتجة من المزرعة الريحية سنوياً.

لقد تم كتابة الكود البرمجي لخوارزمية التوزيع الأمثل للعنفات الريحية ضمن المزارع الريحية الكبيرة في بيئة ماتلاب البرمجية، وتم اختباره على مزرعة ريحية افتراضية، ومن ثم تم مقارنة النتائج التي حصلنا عليها (الإحداثيات الدقيقة للعنفات الريحية التي حققت أكبر استطاعة خرج للمزرعة الريحية عند الحالات الثلاث للرياح) مع نتائج الأبحاث السابقة. لقد أبدت النتائج التي حصلنا عليها توفراً ملحوظاً على نتائج الأبحاث الأخرى.

الكلمات مفتاحية: العنفات الريحية - المزارع الريحية الكبيرة - التداخل الريحي - التوزيع الأمثل - الخوارزمية الجينية.

(*) أستاذ دكتور في قسم هندسة الطاقة الكهربائية - جامعة تشرين - بريد الكتروني

(**) طالبة ماجستير - ماجستير هندسة الطاقات المتجددة والبيئة - قسم هندسة الطاقة الكهربائية - جامعة تشرين.

Optimal Distribution of Wind Turbines in Large Wind Farms Using Genetic algorithm

Prof. Dr. Ammar Hajjar * Prof. Dr. Zaid Badr* Eng. Heba Kamar Aldeen **

(Received: 22 October 2019, Accepted: 23 January 2020)

Abstract:

This research aims to obtain an optimal distribution of wind turbines in large wind farms, in the planning stage, to extract the maximum output power from the wind farms by reducing the wake effect losses between the wind turbines. So that, a genetic algorithm (GA) has been used in this paper for optimizing wind turbines distribution within a hypothetical wind farm considering three different cases of wind, i.e. constant wind speed with fixed wind direction, constant wind speed with variable wind direction, variable wind speed with variable wind direction.

In this paper, Jensen's Model has been used to represent the wake effects between the wind turbines, which through it we can determine the wind speed in front of all wind turbines affected by the wake, and then calculate the total produced power from the wind farm annually.

The code for the algorithm of the optimal distribution of wind turbines within large wind farms has been written in MATLAB environment. The code has been tested on a hypothetical wind farm, then the obtained results (the precise coordinates of wind turbines, which achieved the maximum output power of the wind farm at three wind cases) are compared with the results of the previous works. The results we have obtained have shown a remarkable superiority over those introduced in the previous works.

Keywords: Wind Turbines, Large Wind Farms, Wake Effect, Optimal distribution, Genetic Algorithm.

(*) Prof. Dr. at Department of Electrical Power Engineering, Tishreen University, Syria,

(**) MSc. Student at Department of Electrical Power Engineering, Tishreen University, Syria.

1- المقدمة:

لقد حظيت المزارع الريحية الكبيرة بانتشار كبير في الكثير من دول العالم خلال العقدين السابقين. يعد التوزيع الأمثل للعنفات الريحية ضمن المزارع الريحية، في مرحلة التخطيط، أمراً في غاية الأهمية، وذلك للحصول على استطاعة الخرج الأعظمية لها، وذلك من خلال تقليل عدد حالات التداخل الريحي (Wake effect) بين عنفات المزرعة الريحية الذي يؤدي إلى ضياعات في استطاعة خرجها [1].

لقد درس باحثون أثر التداخل الريحي بين العنفات الريحية باستخدام نموذجين رئيسيين هما: النموذج التحليلي والنموذج الحسابي [2]. حيث، طور الباحث جينسن [3] النموذج التحليلي وتمكن من تقديم حسابات التداخل الريحي بأبسط صورة، حيث عرّف التداخل الريحي على أنه اضطراب في حركة الرياح تسببه الدوامات الريحية التي تتأوب في التشكل من طرفي العنفة الريحية، ثم اعتبر أن الانتشار الريحي يتم بشكل خطي. لقد استخدم الكثير من الباحثين هذا النموذج في حل مسائل التوزيع الأمثل للعنفات الريحية ضمن المزارع الريحية، بينما تم استخدام النموذج الحسابي لتمثيل التداخل في حل مسائل أخرى نظراً للعبء الحسابي الكبير الناتج عن عملية الحساب [4]. من جهة أخرى، تم في المراجع [1] و[4] و[8-12] الأخذ بالحسبان أثر التداخل الريحي الجزئي (Partial wake effect) بين العنفات الريحية لأجل حساب سرعة الرياح أمام العنفات الريحية المتأثرة به.

درس باحثون في المراجع [4-9] مشكلة تحديد التوزيع الأمثل للعنفات الريحية ضمن المزارع الريحية لأجل ثلاث حالات للرياح وهي: حالة رياح ثابتة السرعة والاتجاه، حالة رياح ثابتة السرعة متغيرة الاتجاه، وحالة رياح متغيرة السرعة والاتجاه باستخدام خوارزميات إيجاد الحل الأمثل المختلفة.

تم في المرجع [10] التأكيد على ضرورة أخذ جميع الاتجاهات الممكنة للرياح بالحسبان، وعدم الاكتفاء بالاتجاه السائد فقط للرياح، وذلك عند تحديد التوزيع الأمثل للعنفات الريحية ضمن المزارع الريحية، لأن الاكتفاء بالاتجاه السائد فقط للرياح سيؤدي إلى تقدير غير دقيق لاستطاعة الخرج للمزرعة الريحية يقدر بحوالي 8%+.

اعتمد باحثون على التوزيعات الاحتمالية للتعبير عن خصائص الرياح (سرعتها، اتجاهها، احتمال حدوثها). حيث، تم في المراجع [2] و[4-7]، استخدام التوزيعات الاحتمالية المتقطعة المعتمدة على التمثيل البياني (Histogram representation)، وتم في المرجع [11] استخدام تمثيل وردة الرياح (Wind rose representation)، بينما تم في المرجع [10] استخدام التوزيعات الاحتمالية المستمرة المعتمدة على الشكل العام لتابع الكثافة الاحتمالي (Probability density function)، وتم في المراجع [8، 9] استخدام توزيع وبيبل الاحتمالي (Weibull distribution).

لقد تم دراسة مسألة التوزيع الأمثل للعنفات الريحية باستخدام العديد من خوارزميات إيجاد الحل الأمثل كخوارزمية سرب الجزيئات، وخوارزمية مستعمرة النمل، وخوارزمية التطور، وخوارزمية محاكاة التلدين، ومحاكاة مونت كارلو، لكن تركز الاهتمام الأكبر على استخدام الخوارزمية الجينية، خوارزمية تطويرية تقوم على فكرة البقاء للأفضل وتعتمد على تقنية البحث العشوائي الموجه، كونها مناسبة للمسائل التي تتطلب البحث عن الحل الأمثل ضمن مجال واسع من الحلول الممكنة [11]. فإذا افترضنا أنه لدينا مزرعة ريحية مربعة الشكل أبعادها 2km*2km ومقسمة إلى مئة خلية كل خلية منها قادرة على احتواء عنفة ريحية واحدة فإن عدد إمكانيات توضع العنفات هو 2^{100} إمكانية [12]. لذا، تعد الخوارزمية الجينية أداة جيدة لإيجاد التوضع الأمثل للعنفات الريحية ضمن المزارع الريحية [5].

لقد تم في المرجعين [13] و[14] تحديد التوضع الأمثل للعنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية الكبيرة لأجل أعداد مختلفة من العنفات الريحية. حيث، استخدم المرجع [13] محاكاة مونت كارلو لتحديد التوضع الأمثل لأجل حالة واحدة فقط للرياح (حالة رياح ثابتة السرعة والاتجاه)، ثم قارن النتائج التي حصل عليها مع نتائج موزيتي [5] وغراي [6]. استخدم المرجع

[14] الخوارزمية الجينية للحصول على توضع جديد للعنفات لأجل حالتين للرياح فقط (رياح ثابتة السرعة والاتجاه، رياح ثابتة السرعة متغيرة الاتجاه) ثم قارن نتائج مع نتائج غراي [6]، حيث أنه انخفضت قيمة تابع الهدف عند زيادة عدد العنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية [1]، وهذا بديهي، لذا تعد هذه المقارنة غير عادلة بسبب استخدام أعداد عنفات ريحية مختلفة.

لذا، تم في بحثنا هذا تحديد التوزيع الأمثل للعنفات الريحية ضمن المزارع الريحية الكبيرة للحصول على أكبر استطاعة خرج ممكنة من المزرعة الريحية باستخدام الخوارزمية الجينية ولأجل الحالات الثلاث للرياح. كما تم مقارنة نتائج التوزيع الأمثل مع نتائج الأبحاث السابقة لأجل نفس العدد من العنفات الريحية.

2- أهمية البحث وأهدافه:

تتركز أهمية البحث حول تخطيط المزارع الريحية لتحقيق أعلى مردود. أما الهدف من البحث فهو زيادة استطاعة الخرج المنتجة من العنفات الريحية من خلال تقليل الضياعات الناتجة عن أثر التداخل الريحي بين العنفات.

3- المواد وطرائق البحث:

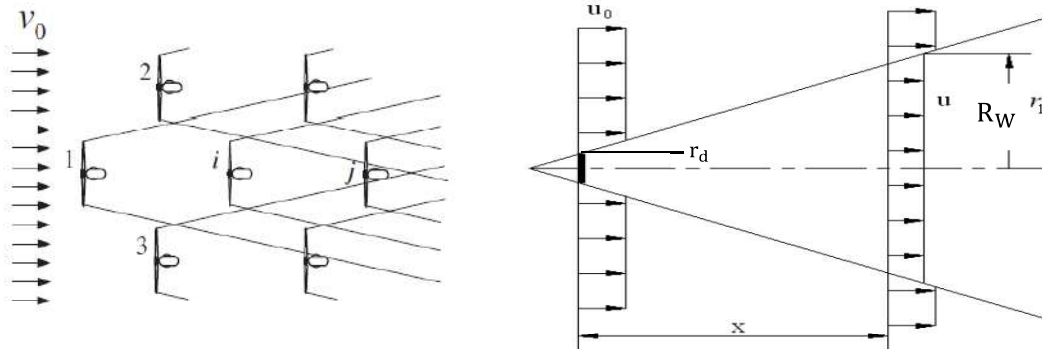
لقد تم في هذا البحث تحديد التوضع الأمثل للعنفات الريحية بالاعتماد على الخوارزمية الجينية باستخدام بيئة ماتلاب (MATLAB) البرمجية، وتم التحقق من العمل المقدم من خلال مقارنة النتائج التي حصلنا عليها مع نتائج الأبحاث السابقة ذات الصلة.

4- النموذج الرياضي لمشكلة التوزيع الأمثل للمزارع الريحية

4-1 نموذج تأثير التداخل الريحي (Wake effect model) :

من المعلوم جيداً أنه عند ورود الرياح إلى عنفة ريحية فإنها تستهلك جزءاً من طاقتها الحركية، مما يؤدي إلى تقليل سرعتها خلف العنفة، وإلى تشكل منطقة هوائية مخروطية الشكل ذات ضغط منخفض تكون فيها حركة الرياح مضطربة، كما هو مبين في الشكل (1)، ومع استمرار ورود الرياح إلى العنفة فإن هذه المنطقة الهوائية ستنتشر وتتوسع مع اتجاه الرياح ومن ثم سيقبل تأثيرها .

بما أن المزرعة الريحية تتكون من مجموعة من العنفات الريحية المتوضعة ضمن منطقة ريحية محددة فإن وجود التداخل الريحي بين هذه العنفات يعد أمراً لا مفر منه، أنظر إلى الشكل (2).



الشكل رقم (1): مخروط التداخل الريحي

الشكل رقم (2): التداخل الريحي بين عدة عنفات ريحية

بما أن استطاعة الخرج للعنفة الريحية تتناسب مع مكعب سرعة الريح فإن وجود أي عنفة ريحية ضمن منطقة التداخل الريحي سيؤدي إلى تقليل استطاعة خرجها. وبما أن حركة الرياح تكون مضطربة ضمن منطقة التداخل الريحي فسيؤدي هذا إلى

تشكيل إجهادات ميكانيكية إضافية على ريشات العنفات الريحية الواقعة ضمن هذه المنطقة. لذا، ولضمان التشغيل الآمن للعنفات الريحية، يتم عملياً ترك مسافة أمان فاصلة بين كل عنفتين ريحيتين متجاورتين تساوي إلى خمسة أضعاف قطر دوائر العنفة الريحية الواحدة.

لتمثيل التداخل الريحي بين العنفات الريحية قمنا في هذا البحث باستخدام النموذج التحليلي الذي تم تطويره من قبل جينسن [3]، كونه يحتاج إلى زمن أقل في الحساب، كما أنه يوفر الدقة الحسابية الكافية.

يمكن تحديد سرعة الرياح أمام العنفة الريحية الخلفية الواقعة ضمن منطقة التداخل الريحي بالعلاقة التالية [4]:

$$U = U_0 \left(1 - 2a \left[1 + \frac{\alpha x}{rd} \right]^{-2} \right) \left[\frac{m}{s} \right] \quad (1)$$

حيث:

U_0 : هي السرعة الوسطية للرياح الحرة [m/s].

a : هو معامل التحريض المحوري.

X : هي المسافة بين العنفتين على المحور الموازي لجهة الرياح [m].

α : هو معامل الخشونة.

r_d : هو نصف قطر القاعدة الصغرى لمخروط التداخل.

يتم حساب معامل التحريض المحوري من علاقة بيتز التي تعطى بعلاقة معامل الدفع C_T التالية [5]:

$$C_T = 4a(1 - a) \quad (2)$$

يعطى نصف قطر القاعدة الصغرى لمخروط التداخل بالعلاقة التالية [4]:

$$r_d = r_T \sqrt{\frac{1 - a}{1 - 2a}} \quad [m] \quad (3)$$

حيث: r_T هو نصف قطر دوائر العنفة الأمامية [m].

يعبر معامل الخشونة α عن تأثير سرعة الرياح بطبيعة سطح الأرض وما عليها من عوائق أو منشآت أو أشجار، ويتم حسابه من العلاقة التجريبية التالية [4]:

$$\alpha = \frac{0.5}{\ln\left(\frac{Z}{Z_0}\right)} \quad (4)$$

حيث، Z [m] تمثل ارتفاع محور العنفة الأمامية، Z_0 [m] تمثل ارتفاع الخشونة للأرض، وهو يتعلق بطبيعة سطح الأرض في مكان وجود المزرعة الريحية، بالنسبة لمزرعتنا (المفترض وجودها في إحدى الضواحي أو القرى) فإن قيمته تساوي 0.3 [m].

بمعرفة نصف قطر الدائرة الكبرى لمخروط التداخل R_W يمكن تحديد فيما إذا كانت العنفة الخلفية واقعة ضمن منطقة التداخل أم لا، يعطى نصف قطر الدائرة الكبرى لمخروط التداخل R_W بالعلاقة التالية [4]:

$$R_W = r_d + \alpha x \quad [m] \quad (5)$$

في حال وقعت العنفة الريحية الخلفية تحت تأثير عدة مناطق تداخل ريحي (Multiple wake)، ناتج عن عدة عنفات ريحية أمامية، فإنه يتم حساب سرعة الرياح أمام هذه العنفة الريحية اعتماداً على مقدار تدني قيمة الطاقة الحركية الكلي لهذه العنفات الريحية، والذي يساوي إلى مجموع التدني في الطاقة الحركية لكل من هذه العنفات الريحية. وبكلمات أخرى، يساوي تقليل الطاقة الحركية أمام العنفة الخلفية الواقعة تحت تأثير التداخل الريحي المتعدد إلى مجموع تقليل في الطاقة الحركية لكل من هذه العنفات الريحية الناتج عن كل تداخل ريحي مؤثر على العنفة الخلفية ويعطى بالعلاقة التالية [5]:

$$\left(1 - \frac{\bar{U}_i}{U_0}\right)^2 = \sum_{i=1}^{N_t} \left(1 - \frac{U_i}{U_0}\right)^2 \quad (6)$$

حيث، N_t هو العدد الكلي للعنفات الريحية الأمامية المؤثرة بالتداخل الريحي على العنفة الخلفية. إذا لم تقع العنفة الريحية الخلفية بكامل محيطها ضمن منطقة التداخل الريحي فسيحدث ما يسمى بالتداخل الريحي الجزئي (Partial wake)، الشكل (3)، عندئذ يتم حساب السرعة أمام العنفة المتأثرة بالتداخل الجزئي باستخدام العلاقة التالية [4]:

$$\left(1 - \frac{\bar{U}_i}{U_0}\right)^2 = \frac{A_w}{A_T} \left(1 - \frac{\bar{U}_i}{U_0}\right)^2 \quad (7)$$

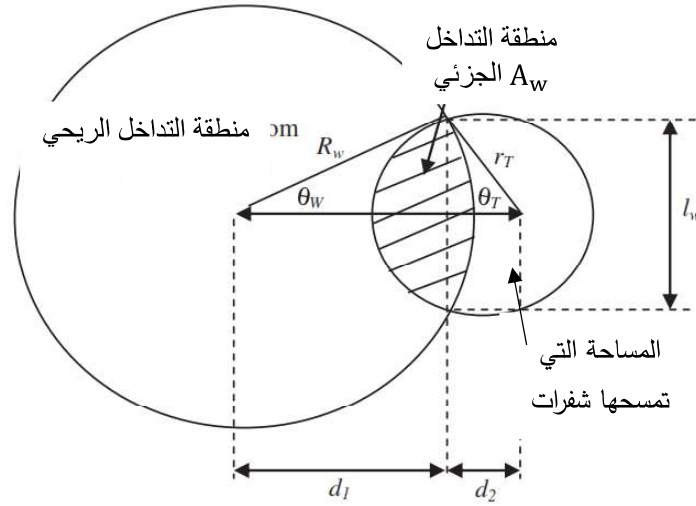
حيث، A_w هي مساحة منطقة التداخل الجزئي وتحسب بالعلاقة التالية [4]:

$$A_w = R_w^2 \left(\theta_w - \frac{\sin 2\theta_w}{2}\right) + r_T^2 \left(\theta_T - \frac{\sin 2\theta_T}{2}\right) \quad (8)$$

θ_w و θ_T هما زاويتين تحسبان بالعلاقتين التاليتين [4]:

$$\theta_T = \cos^{-1} \left(\frac{r_T^2 + D^2 - R_w^2}{2r_T D} \right) \quad (9)$$

$$\theta_w = \cos^{-1} \left(\frac{R_w^2 + D^2 - r_T^2}{2R_w D} \right) \quad (10)$$



الشكل رقم (3) : منطقة التداخل الجزئي

حيث تمثل $D = d_1 + d_2$ هي المسافة الواقعة بين مركز دائرة العنفة الخلفية ومركز دائرة مخروط التداخل.

من الشكل (3) نجد أن الشرط اللازم والكافي لحدوث التداخل الجزئي هو [4]:

$$R_w - r_T \leq D \leq R_w + r_T$$

في حال كانت $D \geq R_w + r_T$ فإن $A_w = 0$ ، وبالتالي لا يوجد تداخل،

أما في حال كانت $D \leq R_w - r_T$ فإن $A_w = A_T$ ، فيوجد تداخل كامل هنا.

حيث A_T تمثل المساحة التي تمسحها ريشات العنفة الخلفية.

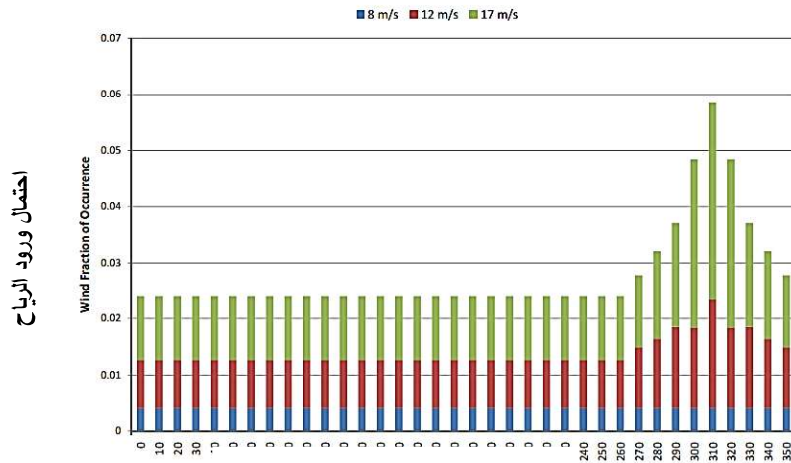
$$A_T = \pi r_T^2 \quad [m^2] \quad (11)$$

4-2 تابع الاستطاعة:

لتحديد استطاعة المزرعة الريحية يجب حساب استطاعة الخرج لجميع عنفاتها الريحية. لذا، سنفرض أن جميع العنفات الريحية في المزرعة متماثلة ولها المعالم التالية: ارتفاع محور العنفة 60 m، قطر دائر العنفة 40m، معامل الدفع $C_T = 0.88$. يعطى منحنى استطاعة الخرج للعنفة الريحية $P_i(\bar{U}_i)$ [kW]، كتابع لسرعة الرياح الوسطية \bar{u}_i أمام العنفة الريحية بالعلاقة التالية [4]:

$$P_i(\bar{u}_i) = \begin{cases} 0 & \text{for } \bar{u}_i \leq 2.3 \text{ m/s} \\ 0.3\bar{u}_i^3 & \text{for } 2.3 < \bar{u}_i \leq 12.8 \text{ m/s} \\ 630 & \text{for } 12.8 \leq \bar{u}_i \leq 18 \text{ m/s} \\ 0 & \text{for } \bar{u}_i > 18 \text{ m/s} \end{cases} \quad (12)$$

حيث يتبع التغير في اتجاه الرياح إلى التوزيع الاحتمالي المبين في الشكل (4).



زاوية ورود الرياح (°)

الشكل رقم (4) : المميين ابياني سورج ارياح سحابه اسائة للرياح.

تحتسب الاستطاعة الكلية للمزرعة الريحية للحالة الأولى للرياح بجمع استطاعات الخرج لعنفاتها وفق العلاقة التالية:

$$P_T = \sum_{i=1}^{N_t} P_i(\bar{u}_i) \quad (13)$$

تعتمد قيمة الاستطاعة بشكل مباشر على سرعة الرياح وعلى احتمال حدوثها. تعطى استطاعة المزرعة الريحية عند وجود رياح متغيرة الاتجاه بالعلاقة التالية [4]:

$$P_T = \sum_{k=0}^{360} \sum_{i=1}^{N_t} f_k P_i(\bar{u}_i) \quad (14)$$

حيث أن:

P_T هي استطاعة خرج المزرعة الريحية عند وجود رياح متغيرة الاتجاه [kW].

f_k هو احتمال ورود الرياح عند كل اتجاه محتمل k .

تعطى استطاعة العنفة الريحية عندما تكون سرعة الرياح متغيرة بالعلاقة التالية [8]:

$$P_i(\bar{u}_i) = P_i(\bar{u}_{i1}) + P_i(\bar{u}_{i2}) + P_i(\bar{u}_{i3}) \quad (15)$$

حيث أن :

\bar{u}_{i1} هي سرعة الرياح الوسطية الأولى.

\bar{u}_{i2} هي سرعة الرياح الوسطية الثانية.

\bar{u}_{i3} هي سرعة الرياح الوسطية الثالثة.

3-4 تابع الهدف (OF Objective Function):

هو تعظيم الاستطاعة المنتجة من المزرعة الريحية:

$$OF = \text{Maximize } P_T \quad (16)$$

5- استخدام الخوارزمية الجينية لتحديد التوضع الأمثل للعنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية:

تعتبر الخوارزمية الجينية خوارزمية بحث احتمالية، تعتمد على طرق البحث العشوائي الموجه، لذلك فهي تحتاج إلى تابع هدف لتقييم الحل الذي تم التوصل إليه. لقد تم في هذا البحث كتابة الكود البرمجي لحساب قيمة تابع الهدف في بيئة ماتلاب البرمجية، ثم تم ربطه مع واجهة الـ optimization tool لتقييم كل توضع للعنفات الريحية بالاعتماد على الخوارزمية الجينية.

5-1 الترميز الكروموسومي (Chromosome Encoding):

الخطوة الأولى هي تحويل الحل الممكنة إلى كروموسومات مكونة من جينات. لقد تم في معظم الأبحاث السابقة اعتماد الترميز الثنائي، ثم تم تطبيق الدراسة على مزرعة ريحية مربعة الشكل، أبعادها $2\text{km} \times 2\text{km}$ ، ومقسمة إلى 100 خلية مربعة $5\text{D} \times 5\text{D}$ ، كل منها قادر على احتواء عنفة ريحية واحدة، وبالتالي هناك حاجة إلى مصفوفة مربعة 10×10 أو إلى كروموسوم مكون من 100 جين لتخزين إحداثيات عنفات المزرعة الريحية بالشكل الثنائي (0، 1). حيث، "0" يعني عدم وجود عنفة ضمن الخلية، "1" يعني وجود عنفة ضمن الخلية.

لقد تم في هذا البحث استخدام الإحداثيات الديكارتية ذات التدرج 1m لتحديد إحداثيات كل عنفة ريحية، لذا سنحتاج إلى كروموسوم واحد عدد جيناته يساوي إلى ضعف عدد العنفات الريحية. بناءً على ذلك، يمكن تحديد مكان العنفة الريحية في المستوي الإحداثي (x,y) بدقة مهما كان شكل المزرعة الريحية وباستخدام عدد جينات أقل.

5-2 التهيئة (Initialization):

يوفر برنامج ماتلاب واجهة خاصة للتعامل مع بعض خوارزميات الحل الأمثل ومنها الخوارزمية الجينية، باستخدام هذه الواجهة أصبح التحكم بمتغيرات الخوارزمية الجينية أمراً في غاية السهولة. بداية حددنا عدد المتحولات المستقلة التي تمثل عدد الجينات في كل كروموسوم، ثم حددنا نوع هذه المتغيرات، وباعتبار أنها إحداثيات العنفات الريحية على المحاور الإحداثية (x, y) قمنا باختيار النوع double vector، بعد ذلك قمنا بتحديد عدد الكروموسومات في كل جيل، ثم حددنا نمط الانتقاء الكروموسومي، ثم نمط واحتمال التزاوج، ثم نمط واحتمال الطفرة، ومن ثم عدد كروموسومات النخبة.

5-3 القيود (Constraints):

ستؤد الخوارزمية الجينية كروموسومات تكون فيها قيمة كل جين منتمة إلى مجموعة الأعداد الحقيقية، لكن هذا الأمر غير مقبول كإحداثيات لعنفة ريحية تتوضع ضمن منطقة محدودة الأبعاد، لذلك سيكون هناك قيود مفروضة تتعلق بأبعاد المزرعة الريحية، أي سيكون لدينا حد أدنى وحد أعلى مفروض (قيود) على كل قيمة سيأخذها كل جين. من الجدير ذكره، أن هذه القيود ستصبح أعقد كلما تعقد الشكل الهندسي للمزرعة الريحية.

4-5 تقييم الحلول (Fitness Evaluation):

بعد إكمال عملية التهيئة سيتم تنفيذ الخوارزمية لتوليد مجموعة من الحلول مع الأخذ في الحسبان القيود المفروضة. لذا، سيتم تقييم جميع الحلول المقترحة من خلال حساب قيمة تابع اللياقة (الهدف) الذي هو عبارة عن استطاعة الخرج للمزرعة ، حيث سيتم إرسال جميع الحلول تبعاً إلى الكود البرمجي الذي سيحسب تابع الهدف ويعيد هذه القيمة إلى الخوارزمية مجدداً.

5-5 معايير التوقف (Stopping Criteria):

هناك مجموعة من المعايير التي عند تحقق أحدها ستتوقف الخوارزمية الجينية عن عملية التكرار، حيث سيتم التحقق من هذه المعايير بعد كل جيل كرموسومي. نورد فيما يلي هذه المعايير:

- الوصول إلى العدد الأعظمي للتكرارات (الأجيال).
- الوصول إلى الزمن الأعظمي المسموح لتنفيذ التكرارات.
- الوصول إلى قيمة محددة لتابع الهدف.
- معدل التغيير في قيمة تابع الهدف عبر الأجيال يجب أن يكون أقل من القيمة المسموح بها.
- زمن التغير في قيمة تابع الهدف عبر الأجيال يجب أن يكون أكبر من الزمن المسموح به.

إذا لم يتحقق أحد هذه المعايير فإن الخوارزمية الجينية ستقوم بترتيب الكرموسومات حسب قيم تابع لياقتها استعداداً لتوليد الجيل التالي.

5-6 توليد الأجيال (Create a new population):

يبدأ توليد الأجيال بمرحلة الاختيار، حيث أنه كلما كان تابع لياقة الكرموسوم أعلى كلما كان احتمال اختياره أكبر. تتم بعد ذلك عملية نقل بعض الكرموسومات من الجيل الحالي إلى الجيل التالي مباشرة (أي الكرموسومات ذات تابع اللياقة الأعلى، وتسمى بكرموسومات النخبة). بعد مرحلة الاختيار تتم عملية المزوجة، ثم الطفرة، يكون بذلك الجيل الجديد من الحلول جاهز لإرساله إلى الكود البرمجي لكي يتم حساب تابع لياقة أفراد.

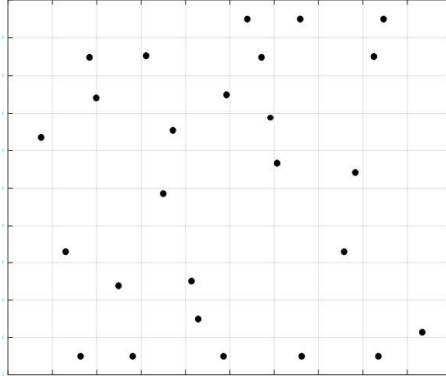
6- النتائج والمناقشة:

سيتم فيما يلي تحديد التوزيع الأمثل لعنفات مزرعة ريحية افتراضية مربعة الشكل ذات أرض مستوية أبعادها 2km * 2km لأجل ثلاث حالات للرياح. وسيتم استخدام المحاور الإحداثية (x, y) ذات التدرج 1m لتحديد موقع كل عنفة ريحية ضمن المزرعة الريحية، مما يعطي مرونة أكبر في تحديد مكان العنفة الريحية، ويسمح بتعميم الدراسة على مختلف أشكال المزارع الريحية. سيتم تحديد التوضع الأمثل للعنفات الريحية مع المحافظة على مسافة أمان قدرها 5D بين كل عنفتين ريحيتين متجاورتين. بالإضافة لذلك، سيتك مسافة قدرها 100m كهامش أمان غير مستخدم عند الحدود الخارجية للمزرعة، لكي نتجنب وقوع أي عنفة خارج محيط المزرعة الريحية.

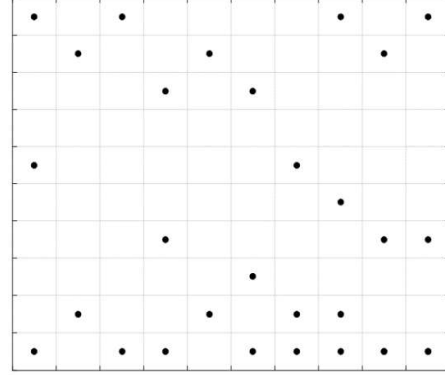
6-1 الحالة الأولى للرياح (سرعة واتجاه ثابتين للرياح):

وهي تمثل أبسط حالة، لقد تم الافتراض هنا بأن سرعة الرياح الوسطية تساوي 12m/s واتجاهها هو $\theta = 0^\circ$ الذي يوافق اتجاه الشمال. تبين الأشكال (5 ، 7) توزيع العنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية الذي تم الحصول عليه في المراجع [6 ، 5] ، حيث يمثل السهم اتجاه ورود الرياح ، نلاحظ من هذه الأشكال وجود عدة حالات تداخل ريحي كلي بين العنفات الريحية مما ينعكس سلباً على مردود المزرعة الريحية. بينما تبين الأشكال (6 ، 8) توزيع العنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية الذي تم الحصول عليه في بحثنا هذا، من هذه الأشكال نلاحظ أن توزيع العنفات الريحية يتجنب حدوث حالات التداخل

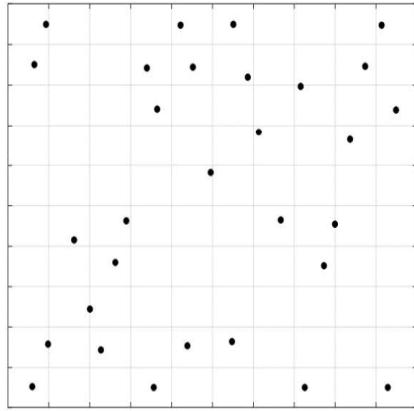
الريحي الكلي، ويقلل من عدد حالات التداخل الريحي الجزئي بين العنفات الريحية، وبذلك نكون حققنا زيادة في المردود قدرها 7.2% و6.2%، لأجل عدد عنفات ريحية 26 و30، على التوالي. حيث يمثل مردود المزرعة الريحية حاصل النسبة بين استطاعة الخرج لجميع العنفات الريحية بوجود التداخل الريحي واستطاعة الخرج لجميع العنفات الريحية بدون وجود التداخل الريحي.



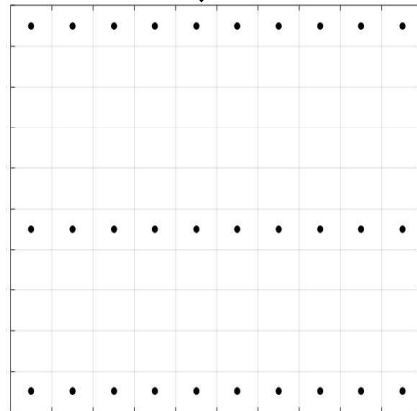
الشكل رقم (6) : الحالة الأولى/ التوزيع المقترح للعنفات الريحية في هذا البحث لأجل عدد عنفات (N =26).



الشكل رقم (5) : الحالة الأولى/ التوزيع المقترح للعنفات الريحية من قبل موزيتي لأجل عدد عنفات (N =26) [5]



الشكل رقم (8) : الحالة الأولى/التوزيع المقترح للعنفات في هذا البحث لأجل عدد عنفات (N =30).



الشكل رقم (7) : الحالة الأولى/التوزيع المقترح للعنفات من قبل غراي [6] و بوكيونت [4] لأجل عدد عنفات (N =30).

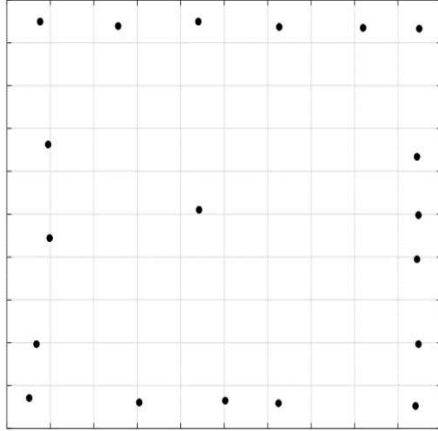
نبيين في الجدول (1) قيم الاستطاعة، تابع الهدف، والمردود لأجل كل توزيع مقترح للعنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية لأجل الحالة الأولى للرياح. نلاحظ من هذا الجدول أن التوزيع المقترح في بحثنا هو الأفضل، لكونه ذي مردود أعلى للمزرعة الريحية عند نفس العدد من العنفات الريحية.

الجدول رقم (1): نتائج توضع العنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية لأجل الحالة الأولى للرياح

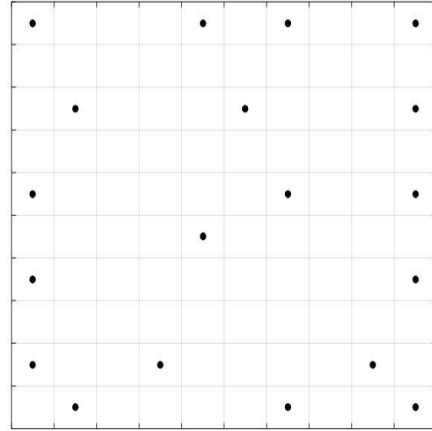
المردود	الاستطاعة الكلية (تابع الهدف) [kw]	عدد العنفات	الدراسة المنفذة	الخوارزمية المستخدمة
91.6%	12352	26	موزيتي [5]	GA
98.8%	13328	26	البحث الحالي	GA
92%	14310	30	غراي [6] وبوكيونت [4]	GA, PSO
98.2%	15286	30	البحث الحالي	GA

6-2 الحالة الثانية للرياح (سرعة الرياح ثابتة واتجاهها متغير):

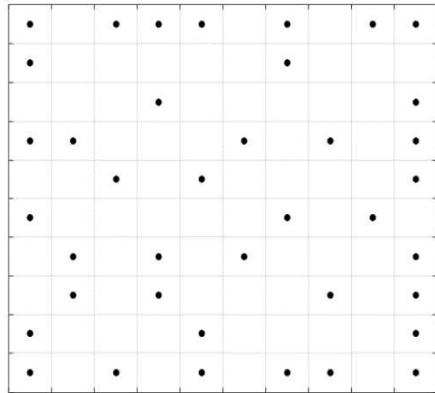
لقد تم في هذه الحالة أخذ سرعة الرياح مساوية إلى 12m/s، وتم اعتبار اتجاهها متغير بمقدار 10° على مدار 360° ويتبع هذا التغير إلى التوزيع الاحتمالي المنتظم (uniform)، أي أنه لا يوجد جهة سائدة للرياح. تبين الأشكال (9، 11، 12) توزيع العنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية المقترحة في المراجع [5-7]، نلاحظ من هذه الأشكال أن توزيع العنفات الريحية غير منتظم ضمن المزرعة الريحية ويشغل معظم مساحة المزرعة الريحية. بينما تبين الأشكال (10، 13) توزيع العنفات الريحية المقترح في هذا البحث، نلاحظ من هذه الأشكال أن معظم العنفات الريحية تتوزع على الحدود الخارجية للمزرعة لكي تتلقى أكبر قدر ممكن من الرياح الحرة.



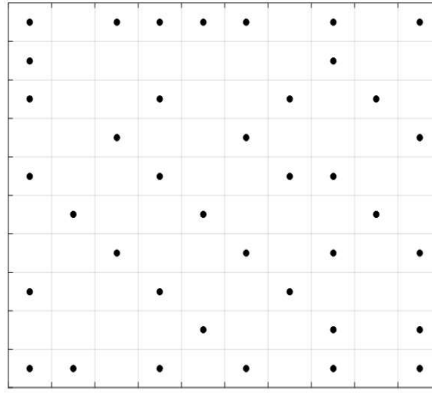
الشكل رقم (10) : الحالة الثانية/التوزيع المقترح للعنفات الريحية في هذا البحث لأجل عدد عنفات (N=19).



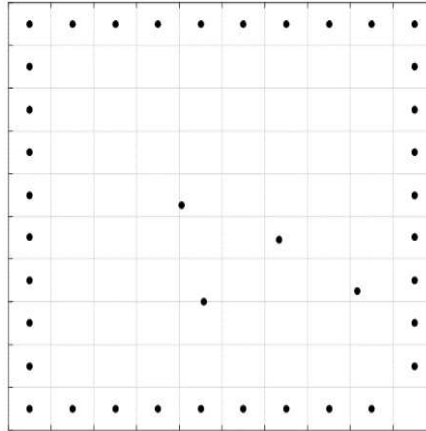
الشكل رقم (9): الحالة الثانية/التوزيع المقترح للعنفات الريحية من قبل موزيتي لأجل عدد عنفات (N=19) [5].



الشكل رقم (12): الحالة الثانية/التوزيع المقترح للعنفات الريحية من قبل غونزاليس لأجل عدد عنفات (N=39) [7].



الشكل رقم (11): الحالة الثانية/التوزيع المقترح للعنفات الريحية من قبل غراي لأجل عدد عنفات (N=39) [6].



الشكل رقم (13) : الحالة الثانية/ التوزيع المقترح للعنفات الريحية في هذا البحث لأجل عدد عنفات (N=39).
 نبين في الجدول (2) قيم الاستطاعة، تابع الهدف، والمردود لأجل كل التوزيعات المقترحة للعنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية لأجل الحالة الثانية للرياح. نلاحظ من هذا الجدول أن التوضع المقترح في بحثنا هو الأفضل، لكونه مردود أعلى للمزرعة الريحية عند نفس العدد من العنفات الريحية.

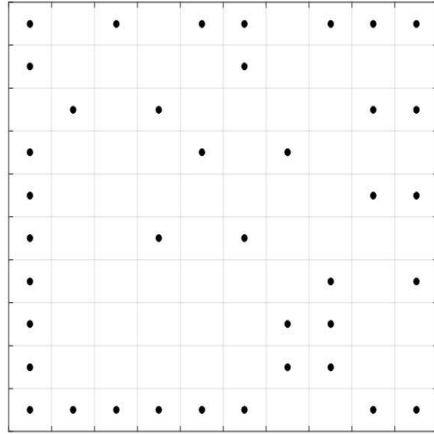
الجدول رقم (2): نتائج توضع العنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية لأجل الحالة الثانية للرياح

المردود	الاستطاعة الكلية (تابع الهدف) [kw]	عدد العنفات	الدراسة المنفذة	الخوارزمية المستخدمة
93.8%	9245	19	موزيتي [5]	GA
96%	9460	19	البحث الحالي	GA
85.1%	17220	39	غراي [6]	GA
89.3%	18065	39	غونزاليس [7]	EA
91.6%	18521	39	البحث الحالي	GA

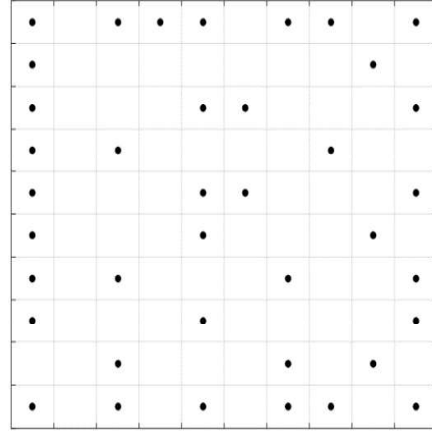
6-3 الحالة الثالثة للرياح (سرعة الرياح واتجاهها متغيرين):

تعد هذه الحالة الأقرب إلى الواقع، لقد تم في هذه الحالة اعتماد سرعة رياح متغيرة 8 و 12 و 17، واتجاه رياح متغير أيضاً بمقدار 10° على كامل المجال (0° - 360°)، يتبع التغير في اتجاه الرياح إلى التوزيع الاحتمالي المبين في الشكل (4). يبين الشكل (14) توزع العنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية المقترح من قبل غراي لأجل عدد عنفات (N=39) [6]، نلاحظ من هذا الشكل أن توزع العنفات الريحية يتركز على الحدود الخارجية للمزرعة الريحية، بينما تكون العنفات الريحية في الوسط متباعدة عن بعضها البعض. يبين الشكل (15) التوزيع المقترح للعنفات الريحية من قبل غونزاليس لأجل عدد عنفات (N=39) [7]، نلاحظ من هذا الشكل أن توزع العنفات الريحية يتركز بشكل أكبر عند المجال (360° - 270°) نظراً لأن هذا الاتجاه تكون فيه الرياح في أعلى سرعة لها وأكثر تكراراً في الحدوث، وهذا يضمن للعنفة الريحية توليد استطاعتها الاسمية حتى لو وقعت تحت تأثير التداخل الريحي لعدة عنفات ريحية. يبين الشكل (16) التوزيع المقترح للعنفات الريحية في هذا البحث لأجل عدد عنفات (N=39)، نلاحظ من هذا الشكل أن العنفات الريحية تتوزع على الحدود الخارجية بكثافة أكبر، مما يساعد على تقليل تأثير التداخل الريحي لأجل كافة الاتجاهات تقريباً.

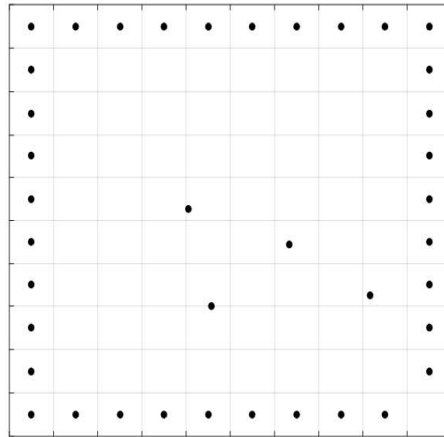
نبين في الجدول (3) قيم الاستطاعة، تابع الهدف، والمردود لأجل كل التوزيعات المقترحة للعنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية لأجل الحالة الثالثة للرياح. نلاحظ من هذا الجدول أن التوزيع المقترح في بحثنا هو الأفضل، لكونه ذي مردود أعلى للمزرعة الريحية عند نفس العدد من العنفات الريحية. نستنتج مما سبق، أن توزيع العنفات الريحية لمواجهة الاتجاه السائد للرياح يحقق زيادة في استطاعة خرج المزرعة الريحية، لكن تخفيض الضياعات الناتجة عن تأثير التداخل الريحي كان له فاعلية أكبر على زيادة الاستطاعة المنتجة من المزرعة الريحية، وبالتالي على زيادة مردودها.



الشكل رقم (15) : الحالة الثالثة/التوزيع المقترح للعنفات الريحية من قبل غونزاليس لأجل عدد عنفات (N=39) [7].



الشكل رقم (14) : الحالة الثالثة/التوزيع المقترح للعنفات الريحية من قبل غراي لأجل عدد عنفات (N=39) [6].



الشكل رقم (16) : الحالة الثالثة/التوزيع المقترح للعنفات الريحية في هذا البحث لأجل عدد عنفات (N=39).

الجدول رقم (3): نتائج توزيع العنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية لأجل الحالة الثالثة للرياح

المردود	الاستطاعة الكلية (تابع الهدف) [kw]	عدد العنفات	الدراسة المنفذة	الخوارزمية المستخدمة
86.6%	32038	39	غراي [6]	GA
89.3%	32793	39	غونزاليس [10]	EA
89.6%	33142	39	الدراسة الحالية	GA

مما سبق نلاحظ تفوق التوزيع المقترح في هذا البحث للعنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية على التوزيع المقترح في الدراسات السابقة لأجل نفس العدد المستخدم من العنفات الريحية.

7- الاستنتاجات والتوصيات:

7-1 الاستنتاجات:

- 1- يمكن تقليل الضياعات الناتجة عن التداخل الريحي بين عنفات المزرعة الريحية من خلال التوزيع الأمثل للعنفات الريحية ضمن المزرعة الريحية.
- 2- أثبت تطبيق الخوارزمية الجينية على مسألة تحديد التوزيع الأمثل للعنفات الريحية فعاليته بجدارة، حيث أنه تم توزيع العنفات الريحية داخل المزرعة الريحية المقترحة بدقة.
- 3- لقد حقق التوزيع الأمثل للعنفات الريحية، المقترح في هذا البحث، استطاعة خرج أكبر للمزرعة الريحية لأجل ثلاث حالات مختلفة للرياح.
- 4- تم اعتماداً على الإحداثيات الديكارتية ذات التدرج 1m تحديد المكان الدقيق لكل عنفة ريحية ضمن المزرعة الريحية.

7-2 التوصيات:

في نهاية هذا البحث نوصي بما يلي:

- 1- استخدام أنواع مختلفة (ارتفاعات محاور مختلفة ، أقطار الدائر مختلفة ، استطاعات الخرج مختلفة) من العنفات داخل المزرعة الريحية الواحدة، حيث تم في بحثنا استخدام عنفات متماثلة داخل المزرعة الريحية الواحدة، بينما لو تم استخدام عنفات ريحية ذات بارامترات مختلفة عن بعضها يمكن تقليل الضياعات الناتجة عن التداخل الريحي بشكل أكبر، ويجب تحديداً الأخذ بالحسبان أثر تغير ارتفاعات محاور العنفات وتغير أنصاف أقطار دوائر العنفات.
- 2- نوصي باستخدام الإحداثيات الديكارتية لتسهيل عملية تعميم هذه الدراسة على الأشكال المختلفة للمزارع الريحية، حيث تم في هذا البحث تطبيق الدراسة على مزرعة ريحية افتراضية مربعة الشكل، لكن يمكن تعميم هذه الدراسة على أشكال مختلفة من المزارع الريحية يمكن دراستها في الأعمال المستقبلية.
- 3- لقد تم في هذا البحث افتراض أن المزرعة الريحية ذات أرض مستوية وهذا يعني عدم وجود أي تضاريس داخل المزرعة الريحية، لذا نوصي في الأعمال المستقبلية الأخذ بالحسبان وجود تضاريس في المزارع الريحية، ودراسة أثر هذه التضاريس على عامل خشونة الأرض وعلى التداخل الريحي بين العنفات.

8- المراجع العلمية:

- 1- A. Abdelsalam, M. El-Shorbagy (2018), "Optimization of wind turbines sitting in a wind farm using genetic algorithm based local search", Renewable Energy, Issue123, pp.748-755.
- 2- C. Ituarte, J. Espiritu (2011), "Optimization of wind turbine placement using a viral based optimization algorithm", Procedia Computer Science, Issue 6, pp.469-474.
- 3- I. Katic, J. Hojstrup and N. Jensen (1986), "A simple model for cluster efficiency", Proceedings of the European Wind Energy Conference and Exhibition, pp. 407-410.
- 4- S. Pookpunt, W. Ongsakul (2013), "Optimal placement of wind turbines within wind farm using binary particle swarm optimization with time-varying acceleration coefficients", Renewable Energy, Issue 55, pp. 266-276.

- 5- G. Mosetti, C. Poloni and B. Diviacco (1994), "Optimization of wind turbine positioning in large wind farms by means of a genetic algorithm", Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, Issue 51, pp. 105-116.
- 6- S. Grady, M. Hussaini and M. Abdullah (2005), "Placement of wind turbines using genetic algorithms", Renewable Energy, Issue 30, pp. 259-270.
- 7- J. González, A. Rodriguez and et. al. (2010), "Optimization of wind farm turbines layout using an evaluative algorithm", Renewable Energy, Issue 35, pp.1671-1681.
- 8- L. Wang (2017) , "Numerical optimization of wind farm layout and control strategy", Ph.D. thesis, Queensland University of Technology, School of Chemistry, Physics and Mechanical Engineering Faculty of Science and Engineering, pp1-221.
- 9- D. Wilson, S. Rodrigues and et. al. (2018), "Evolutionary computation for wind farm layout optimization", Renewable Energy.
- 10- S. Brusca, R. Lanzafame and M. Messina (2014), "Wind Turbine Placement Optimization by means of the Monte Carlo Simulation Method", Hindawi Publishing Corporation Modeling and Simulation in Engineering, 9 June.
- 11- S. Gatascha (2016), "Generic Optimization of a Wind Farm Layout using a Genetic Algorithm", M.Sc. thesis, University of Natural Resources and Life Science, Vienna, Department of Economics and Social Sciences Institute for Sustainable Economic Development, pp1-147.
- 12- D. Mohammed, E. Elmostapha (2018), "The optimal configuration of turbines location in a wind farm using a Genetic Algorithm", International Journal of Engineering Research & Science (IJOER), Vol.(4), Issue 12, December.
- 13- G. Marmidis, S. Lazarou and E. Pyrgioti (2008), "Optimal placement of wind turbines in a wind park using Monte Carlo simulation", Renewable Energy, Issue 33, pp.1455-1460.
- 14- C. Wan, J. Wang and et. al. (2009), "Optimal Micro-Siting of Wind Turbines by Genetic Algorithms Based on Improved Wind and Turbine Models", Joint 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference Shanghai, P.R. China, December 16-18.