

نمذجة العلاقة المثلى بين قطر الدوار واستطاعة المولد الكهربائي لعنفة ريحية مستخدمة في توليد الطاقة الكهربائية

الدكتور أحمد سلامة*

الدكتور أيوب حسن**

حسن علي محمد***

(تاريخ الإيداع 7 / 5 / 2013. قُبِلَ للنشر في 20 / 8 / 2013)

▽ ملخص ▽

يناقش هذا البحث مسألة التصميم الأمثل لعنفة ريحية أفقية المحور ثلاثية الشفرات تعمل على توليد الطاقة الكهربائية، وذلك من خلال تصميم خوارزمية برمجية خاصة بالاعتماد على برنامج (MATLAB) لتحديد النسبة المثلى بين قطر دوار العنفة الريحية، و استطاعة المولد الكهربائي المربوط معها، لتحقيق خرج كهربائي سنوي أعظمي لموقع ريحي محدد الشروط وبتكلفة محددة للعنفة، ومن ثم دراسة كيفية تغير هذه النسبة المثلى بتغير الموقع الريحي والتكلفة. تعتمد هذه الخوارزمية بشكل رئيسي على نموذج رياضي مبني وفقاً لنظرية العزم العنصري للشفرة من أجل حساب الاستطاعة الميكانيكية التي تولدها العنفة، كما تم اختيار المواقع الريحية وشروطها باعتبارها مواقع ريحية نموذجية لتركيب العنفات الريحية سواء من حيث متوسط سرعة الرياح في الموقع، أو من حيث متغيرات تابع ويبول (weibull) وتحديد قيمة عامل الشكل.

يمكن بواسطة هذه الخوارزمية دراسة حالات أخرى لم تشملها الدراسة، عند معرفة شروط الموقع الريحي المراد استثماره، كما أنها تسمح بتحديد الأبعاد الأساسية للعنفة الريحية، أي قطر الدوار واستطاعة المولد الكهربائي للحصول على الخرج الأعظمي بما يتناسب مع كلفة العنفة.

الكلمات المفتاحية: العنفة الريحية، نظرية العزم العنصري لشفرة، تابع ويبول، عامل الشكل

* أستاذ مساعد - قسم التصميم والإنتاج - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

** أستاذ - قسم القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

*** طالب دراسات عليا (ماجستير) - طاقة رياح - جامعة تشرين - اللاذقية - سورية.

Modeling the Optimal Relationship between the Rotor Diameter and Generator Capacity for Wind Turbine Used to Generate Electricity

Dr.Ahmad Salamah^{*}
Dr. Ayob Hasan^{**}
Hasan Ali mohammad^{***}

(Received 7 / 5 / 2013. Accepted 20 / 8 / 2013)

▽ ABSTRACT ▽

The research discusses the optimum design of three blade horizontal axis wind turbine that used to produce electricity.

The purpose of this study was to develop an algorithm to determine the optimal rotor-to-generator size for a given wind resource and to determine how this optimum varies as the wind resource varies.

A MATLAB model was developed to predict total annual electrical production from a wind turbine of given design characteristics at a wind resource defined by the Weibull probability parameters. The blade element momentum method was used to determine power output of a given wind turbine configuration at a given wind speed.

The sites were selected according to researches indicate that these sites are typical for wind applications, i.e . average wind speed and shape parameter.

This algorithm can be used to determine the dimensional of wind turbine in order to get the maximum electrical energy as well as study any wind sources that didn't discuss in the research.

Keywords: wind turbine ,Blade Element Momentum Theory , Weibull function , shape parameter.

^{*} Associate professor, Department of Design and production Engineering, Faculty of mechanical engineering. Tishreen University, Lattakia, Syria .

^{**} Professor, Department of mechanical forces, Faculty of mechanical engineering. Tishreen University, Lattakia, Syria.

^{***} Postgraduate student, Department of wind energy, Faculty of mechanical engineering. Tishreen University,Lattakia, Syria.

مقدمة:

نتيجة الطلب المتزايد على الطاقة وانخفاض الاحتياطات العالمية من الوقود العضوي، وما تسببه من تلوث للبيئة كان الاتجاه نحو الطاقات النظيفة مثل طاقة الرياح والطاقة الشمسية وغيرها. مما تقدم ازداد استخدام الرياح في إنتاج الطاقة الكهربائية عبر العالم، حيث تتميز هذه التكنولوجيا بعدم وجود انبعاثات غازية ضارة بالبيئة وعدم وجود كلفة وقود التشغيل. ومن ناحية أخرى، تتغير سرعة الرياح وبشكل ساعي خلال اليوم الواحد، وبالتالي لا يمكن التحكم الكامل بالاستطاعة الأعظمية المولدة من قبل العنفة الريحية خلال فترة زمنية محددة. تقود هذه الإشكالية إلى معيار مختلف لمسألة التصميم الأمثل، مقارنة مع تلك المسائل حيث يكون من الممكن التحكم الكامل بمعدل الخرج تبعاً لاستطاعة التجهيزات المستخدمة في عملية توليد الطاقة. يعتبر التصميم الأمثل لعنفة ريحية ما و تعمل في موقع ريحي ذي شروط معينة هو التصميم الذي ينتج استطاعة كهربائية أعظمية من أجل كلفة مالية محددة.

أهمية البحث وأهدافه:

تعتبر الجمهورية العربية السورية من الدول الواعدة في مجال طاقة الرياح، حيث يتوفر على امتداد مساحة القطر العديد من المناطق المناسبة لإنشاء مزارع ريحية تساهم في توليد الكهرباء سواء من خلال ربطها مع الشبكة العامة أو من خلال استخدامها بشكل معزول في المناطق النائية والبعيدة عن الشبكة. ومن أجل إنشاء مثل هذه المزارع لا بد من توفر دراسات أولية تشكل قاعدة بيانات خاصة بهذا المجال، وبناءً عليه يمكن القول بأن هذا البحث يشكل مساهمة جزئية في دعم هذه القاعدة وتوسيعها. يهدف هذا البحث إلى:

- تحديد العلاقة المثلى بين قطر دوار العنفة الريحية واستطاعة المولد الكهربائي المربوط معها، بهدف تحقيق أعلى خرج كهربائي ممكن في موقع ريحي محدد.
- دراسة كيفية تغير هذه العلاقة مع تغير شروط الموقع الريحي.

طرائق البحث ومواده:

تعتمد طريقة إجراء البحث على تحديد الكلفة الكلية للعنفة الريحية (كلفة الدوار الريحي مع كلفة المولد الكهربائي). ومن ثم القيام بزيادة قيمة استطاعة المولد الكهربائي، وبالتالي انخفاض قيمة قطر العنفة الريحية مع بقاء الكلفة ثابتة. يتم حساب قيمة الخرج الكهربائي السنوي من أجل كل حالة من الحالات (قطر دوار / استطاعة مولد) عند الكلفة نفسها، والحالة التي تحقق أعظم خرج تمثل الحل الأمثل. ثم إجراء هذه المنهجية من أجل عدة مواقع ريحية وكلف متغيرة، بهدف تحليل كيفية تغير الحل الأمثل تبعاً لتغير الموقع والكلفة.

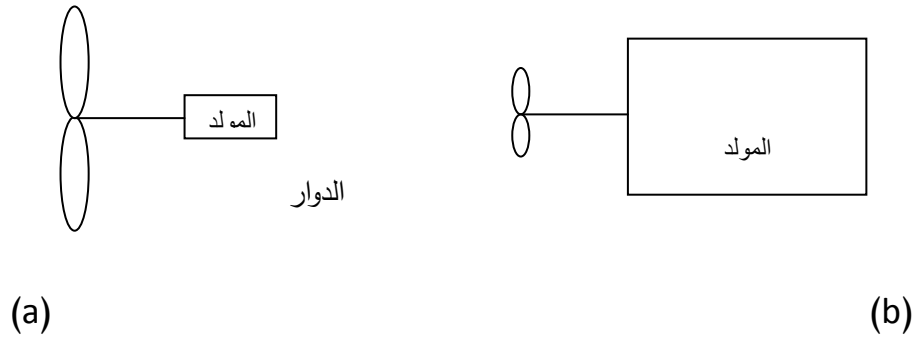
إن متغيرات وبيول المختارة وسرعات الرياح تمثل الشروط الأكثر استخداماً للتطبيقات المتعلقة بطاقة الرياح (مواقع نموذجية) [1].

العلاقة المثلى بين قطر الدوار واستطاعة المولد ومفهوم عامل الاستطاعة.

يُعرف عامل الاستطاعة بأنه كمية الطاقة المنتجة خلال فترة محددة (سنة واحدة عادة) مقسومة على كمية الطاقة التي من الممكن إنتاجها في حال عمل نظام التوليد عند قيمته الاسمية خلال كامل فترة تشغيله (الاستطاعة النظرية). عادة يكون من المرغوب عند شراء معدات التوليد الكهربائي اختيار أجهزة تعمل عند عامل استطاعة مرتفع، وذلك لأسباب اقتصادية. وعند الاختيار يكون من الأفضل عدم شراء جهاز يتمتع باستطاعة أعلى من الاستطاعة المطلوبة، ولكن بسبب عدم قابلية أنظمة التوليد الريحية للتحكم الكامل باستطاعتها يكتسب عامل الاستطاعة أهمية خاصة عند اختيار العنفة الريحية المناسبة. يمكن توضيح ذلك من خلال المناقشة التالية.

يبين الشكل (1) إمكانييتين مختلفتين لاختيار قطر الدوار واستطاعة المولد الكهربائي الموافق له عند كلفة ثابتة. نلاحظ من الشكل (1.a) ارتباط دوار قطره كبير جداً مع مولد استطاعته صغيرة جداً. إن مثل هذا النظام يملك عامل استطاعة مرتفع جداً، والسبب في ذلك أنه وحتى من أجل سرعة رياح منخفضة نسبياً يكون الدوار قادر على قيادة المولد عند قيمة استطاعة قريبة من قيمته الاسمية. ولكن عند سرعات الرياح العالية سوف يتم كبح عمل الدوار بحيث لا يتعرض المولد لحمل زائد. يوجد عدة طرق لكبح عمل العنفة خلال السرعات العالية للرياح، وأهم هذه الطرق هي طريقة الكبح الأيروديناميكي للشفرة والتي تعتمد على نفس مبدأ طريقة إقلاع وهبوط الطائرة. حيث يتم التلاعب بقيمة زاوية الخطوة لشفرة العنفة بحسب السرعة المطلوبة من خلال مشغلات هيدروليكية تؤدي الغرض المطلوب، أي ما يسمى التحكم الأيروديناميكي للاستطاعة. بمعنى آخر هذه الطاقة التي يمكن تسخيرها من قبل دوار العنفة الريحية كان ممكن الاستفادة منها و تحويلها إلى طاقة كهربائية في حال استخدام مولد باستطاعة أكبر تتوافق وقطر الدوار. من ناحية أخرى يبين الشكل (1.b) الحالة المعاكسة للحالة السابقة أي دوار بقطر صغير جداً مرتبط بمولد استطاعته كبيرة جداً، نلاحظ أن مثل هذا النظام يولد طاقة منخفضة من الكهرباء. ولكن السبب في هذه الحالة يعود إلى عدم قدرة الدوار على تحويل كمية كبيرة من طاقة الرياح نتيجة قطره الصغير. إن هذه الحالة من الاقتران بين الدوار والمولد تبين مقدار الهدر الحاصل، بحيث إن كلفة المولد تكون مرتفعة جداً مع عدم إمكانية الاستفادة من استطاعته الاسمية لأن الدوار لن يؤمن الطاقة اللازمة لتشغيله عند هذه الاستطاعة.

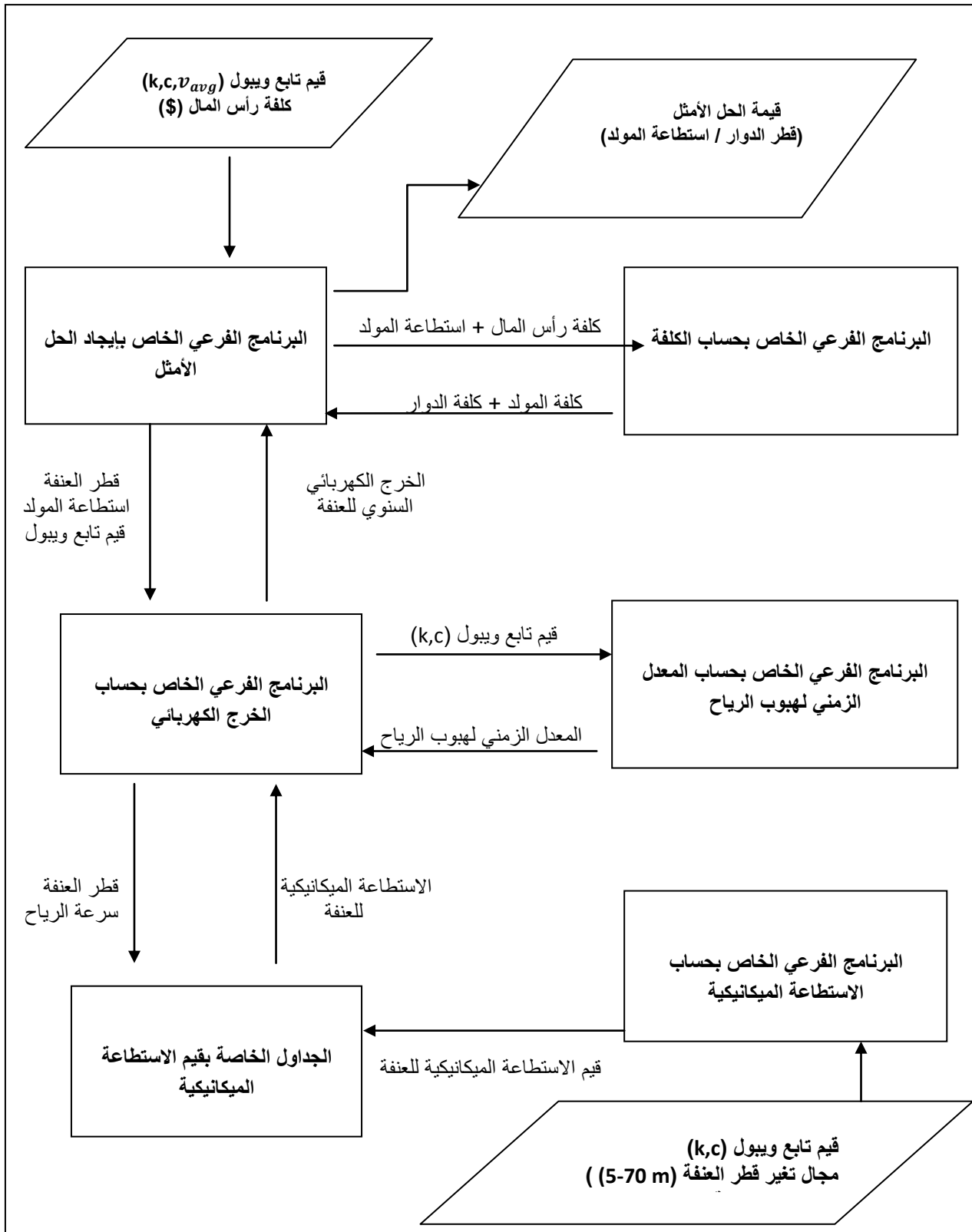
إن الحل الأمثل للارتباط بين المولد والدوار يقع بين هاتين الحالتين الحديتين، وهذا الحل يتغير من موقع لآخر ويتعلق بشكل رئيسي بكيفية توزيع سرعة الرياح في الموقع المدروس.



شكل (1) الحالتين الحديتين لارتباط المولد مع دوار العنفة

خوارزمية إيجاد الحل الأمثل:

يبين الشكل (2) المخطط الصندوقي العام الذي تعمل وفقه الخوارزمية.



الشكل (2) المخطط الصندوقي لخوارزمية الحل الأمثل

يتألف المخطط الصندوقي من ثلاثة برامج رئيسية وهي:

- البرنامج الفرعي الخاص بإيجاد الحل الأمثل للعلاقة بين المولد والدوار .

- البرنامج الفرعي الخاص بحساب الخرج الكهربائي .

- البرنامج الفرعي الخاص بالاستطاعة الميكانيكية.

إن معظم العمليات الحسابية الرياضية تتم ضمن البرنامج الفرعي الخاص بالاستطاعة الميكانيكية حيث تُستخدم نظرية (BEMT)* . يقوم البرنامج الفرعي الخاص بحساب الخرج الكهربائي باستخدام القيم الناتجة من حساب الاستطاعة الميكانيكية ، بالتوازي مع القيم المميزة للموقع الريحي (قيم تابع ويبول وسرعة الرياح الرئيسية) من أجل إيجاد قيمة الخرج السنوي من الكهرباء للعنفة الريحية ، وذلك من أجل كل حالة من حالات الارتباط (مولد / دوار). يعمل البرنامج الفرعي الخاص بإيجاد الحل الأمثل على اختيار القيمة الأعلى للخرج الكهربائي التي تمثل هذا الحل. بالإضافة إلى البرامج الفرعية الرئيسية السابقة يتضمن البرنامج مجموعة من البرامج الفرعية الأخرى التي تساعد في عملية إيجاد الحل الأمثل، وهي:

- برنامج خاص بحساب الكلفة الأساسية لنظام التوليد.

- برنامج خاص بحساب المعدل الزمني لهبوب الرياح.

يقوم البرنامج الخاص بحساب المعدل الزمني بإيجاد عدد الساعات التي من أجلها تهب الرياح وفقاً لسرعة محددة خلال العام الواحد، أما البرنامج الخاص بحساب التكلفة يحسب كلفة رأس المال الأساسية (مولد + دوار).

آلية عمل البرنامج الخاص بإيجاد الحل الأمثل

1- يتم أولاً إدخال قيمة كلفة رأس المال (مولد + دوار).

2- يتم إدخال سرعة الرياح الوسطية (v_{avg}) و بارامترات ويبول عامل الشكل (K) وعامل القياس (C) لتحديد كيفية توزع سرعة الرياح في الموقع.

3- يتم اختيار قيمة صغيرة لاستطاعة المولد ولتكن (500 kw)

4- يتم استدعاء النموذج الخاص بحساب الكلفة الذي يقوم بحساب كلفة المولد وكلفة الدوار بشكل منفصل.

5- يتم حساب قطر الدوار باستخدام المعادلة التالية [2]:

$$\$_1 = B \cdot C_1 \cdot R^{3.04} \quad (1)$$

حيث : ($\$_1$) كلفة الدوار فقط ، (B) عدد شفرات الدوار .

(R) نصف قطر الدوار (m) ، ($C_1 = 1.304$) من أجل عملة مقدره بالدولار .

* (BEMT) : Blade Element Momentum Theory

أما كلفة المولد فتحدد من العلاقة التالية [2]:

$$\$_2 = 99 \cdot P_{gen} \quad (2)$$

حيث: ($\$_2$) كلفة المولد فقط ، (P_{gen}) استطاعة المولد

6- يتم إرسال قيم كل من (R, P_{gen}, K, C) إلى البرنامج الخاص بحساب الخرج الكهربائي السنوي من أجل تحديد قيمة الخرج خلال عام واحد.

7- يتم حساب قيمة النسبة الخاصة (SA) والتي تعبر عن النسبة بين قطر الدوار و استطاعة المولد من أجل سهولة تحليل النتائج

$$SA = \frac{\pi.R^2}{P_{gen}} \quad (3)$$

8- تكرر العملية بدءاً من الخطوة (4) بزيادة قيمة استطاعة المولد تدريجياً وقيمة صغيرة مع ثبات كلفة رأس المال، سيحصل انخفاض مقابل في قطر الدوار المحسوب. ويتم العمل على زيادة استطاعة المولد ضمن المجال $(500-5000Kw)$ في معظم الحالات. ويتم تكرار كافة الخطوات السابقة من أجل كل الحالات المدروسة لمصادر الرياح وعند قيم مختلفة من كلفة رأس المال (مولد + دوار).

البرنامج الخاص بحساب التكلفة

إن المهمة الأساسية لهذا النموذج هي تحديد قطر الدوار انطلاقاً من علاقته بالتكلفة وذلك وفقاً للخطوات التالية:

- 1- يتم إدخال قيمة كلفة رأس المال (مولد + دوار) وقيمة استطاعة المولد .
- 2- يتم حساب كلفة المولد فقط من خلال المعادلة (2).
- 3- يتم حساب كلفة الدوار من خلال طرح قيمة كلفة المولد فقط من قيمة رأس المال الكلية.
- 4- يتم حساب قيمة (R) من خلال المعادلة (1).

البرنامج الخاص بحساب المعدل الزمني

كما ذكرنا يقوم هذا النموذج بحساب عدد الساعات المتوقع فيها هبوب الرياح وفق سرعة محددة من مجال تغير السرعة المدروس وذلك على الشكل التالي:

- 1- يتم إدخال قيم بارامترات وبيول عن طريق الكتلة الخاصة بحساب الخرج السنوي.
- 2- يتم حساب القيمة الاحتمالية لهبوب الرياح من أجل كل قيمة من قيم مجال السرعة المدروس (4-27m/s). وذلك باستخدام المعادلة التالية [5] :

$$f(V) = \frac{K}{C} \cdot \left(\frac{V}{C}\right)^{K-1} \cdot e^{-\left(\frac{V}{C}\right)^K} \quad (4)$$

3- تعاد هذه القيم الاحتمالية إلى البرنامج الخاص بحساب الخرج السنوي لاستخدامها. إن تابع وبيول هو تابع رياضي احتمالي يستخدم من أجل تحديد كيفية توزع سرعة الرياح في الموقع خلال فترة معينة عام واحد على الأغلب. ويشير عامل الشكل (K) بشكل أساسي إلى ذروة توزع الرياح في الموقع المدروس، أي أعلى قيمة لمنحني توزع الرياح في الموقع، أما عامل القياس (C) فهو يشير بشكل رئيسي إلى شدة الرياح في الموقع المدروس.

يتم تحديد قيم بارامترات وبيول (k, c) من خلال طرق خاصة اعتماداً على بيانات الرياح التراكمية في الموقع. ولكن في بحثنا تم اختيار قيم نموذجية لكل من سرعة الرياح الوسطية السنوية وعامل الشكل (k) أما عامل القياس (c) فتم حسابه من العلاقة:

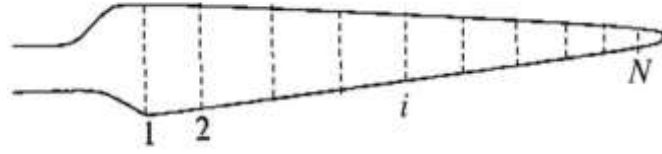
$$\frac{C}{V} = \left(0.598 + \frac{0.433}{K}\right)^{\frac{1}{K}} \quad (5)$$

البرنامج الخاص بحساب الاستطاعة الميكانيكية

يتم حساب قيم الاستطاعة الميكانيكية وفق الخطوات التالية:

- 1- يتم إرسال قيم قطر الدوار واستطاعة المولد وسرعة الرياح.
- 2- تستخدم نظرية (BEMT) من أجل حساب قيمة الاستطاعة الموافقة لسرعة الرياح [4].
- 3- نقارن قيمة الاستطاعة الميكانيكية بقيمة استطاعة المولد ونأخذ القيمة الأصغر على أنها استطاعة الخرج الميكانيكية للدوار.

يتم حساب الاستطاعة الميكانيكية للعنفة الريحية باستخدام نظرية (BEMT) التي تعتمد على طريقة العناصر المنتهية (FEM) *، أي تقسيم شفرة الدوار إلى عدة أجزاء بحسب طولها ودراسة كل جزء بشكل مستقل عن الجزء الآخر كما هو موضح في الشكل (2)



الشكل (2) تقسيم شفرة الدوار إلى عدة عناصر مستقلة.

يتم حساب قيمة الاستطاعة الميكانيكية لكل عنصر على حدا، ومن ثم جمع كافة القيم للحصول على الاستطاعة الميكانيكية الكلية. وتشكل العمليات الحسابية التي تعتمد على العلاقات الرياضية الحاكمة لهذه النظرية الجزء الأكبر من الخوارزمية البرمجية المصممة بواسطة برنامج (MATLAB).

(Finite Element Method)*

البرنامج الفرعي الخاص بحساب الخرج الكهربائي السنوي

يقوم هذا البرنامج بحساب كمية الطاقة الكهربائية التي تولدها العنفة الريحية خلال عام واحد كما يلي:

- 1- يتم إدخال قيم كل من بارمترات وبيول وقطر دوار العنفة الريحية واستطاعة المولد الموافق (R, P_{gen})

$$(k, c, v_{avg})$$

- 2- يتم إرسال قيم تابع وبيول (K, c) إلى النموذج الخاص بحساب المعدل الزمني لهبوب الرياح الذي يعمل بدوره على إعادة القيم الزمنية (عدد الساعات) المتوقع هبوب الرياح وفقها.
- 3- يتم إرسال قيم سرعة الرياح وقطر الدوار واستطاعة المولد (R, P_{gen}, v_{avg}) إلى الكتلة الخاصة بحساب الاستطاعة الميكانيكية للدوار الذي يعمل على إرجاع قيم هذه الاستطاعة.
- 4- يتم حساب الخرج السنوي من خلال ضرب قيم الاستطاعة بالمعدل الزمني لهبوب الرياح وفق السرعة الموافقة من خلال المعادلة الرياضية [3].

$$AEP_i = 8760 \cdot P_i \cdot f(v_i) \quad (6)$$

حيث (8760) عدد ساعات عمل العنفة في السنة

(P_i) الاستطاعة الميكانيكية التي تولدها العنفة عند السرعة (v_i)

($f(v_i)$) معدل هبوب الرياح للسرعة الموافقة (احتمال هبوب الرياح وفقاً للسرعة الموافقة)

(AEP_i) الإنتاج السنوي من الكهرباء عند السرعة (v_i).

5- يتم زيادة معدل سرعة الرياح زيادة تدريجية ضمن المجال المدروس وهو (4-27m/s).

6- الخرج الكهربائي السنوي الكلي هو حاصل جمع كافة القيم السابقة من أجل كل سرعة من سرعات مجال

تغير سرعة الرياح.

$$AEP = \sum_{i=1}^n 8760 \cdot P_i \cdot f(v_i) \quad (7)$$

إن العلاقة (7) تسمح بحساب الخرج الكهربائي السنوي للعنفة الريحية باعتبار قيمة المردود الإجمالي للعنفة

مثالي أي المردود الميكانيكي ($\eta_m = 1$) والكهربائي ($\eta_g = 1$) وعامل استطاعة العنفة ($C_p = 59\%$) وهو الحد

النظري للعنفة [3]. أما في حال كانت قيمة المردود للمولد الكهربائي والمردود الميكانيكي لسلسلة نقل القدرة وعامل

الاستطاعة للعنفة محددة بقيم عملية فإن العلاقة تصبح من الشكل:

$$AEP = C_p \cdot \eta_m \cdot \eta_g \sum_{i=1}^n 8760 \cdot P_i \cdot f(v_i) \quad (8)$$

التحقق من صحة الخوارزمية

بهدف التحقق من عمل الخوارزمية الخاصة بالدراسة، وبالتالي التأكد من صحة النتائج التي تم التوصل إليها،

تمت مقارنة النتائج الخاصة بتطبيق الخوارزمية الشكل (3)، بالنتائج الخاصة بعنفة تجارية وفقاً للشركة الصانعة شكل

(4). سنعتمد في عملية المقارنة على العنفة التجارية من نوع:

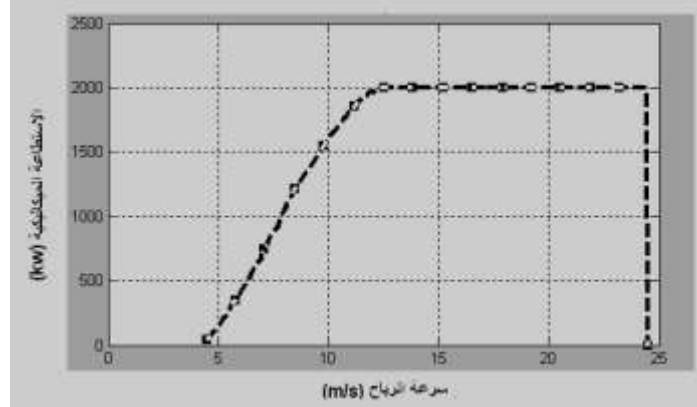
VESTAS 90-2MW (الشركة الصانعة - VESTAS - الدنمركية)

نصف قطر هذه العنفة ($R=45$ m)، واستطاعة المولد الكهربائي المستخدم ($P_{gen} = 2MW$)، تعمل هذه

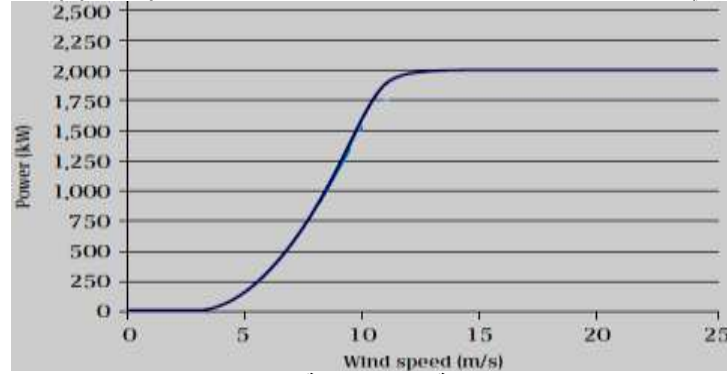
العنفة ضمن مجال متغير لعدد الدورات هو ($n=9-14.9$ r.p.m). يتم اختيار سرعة دورانية ثابتة مناسبة لعمل العنفة

وبحسب الحالة المدروسة أي بحسب خصائص موقع الرياح. يبين الشكل (2) منحنى الاستطاعة الخاص بالعنفة وفق

الشركة المصنعة.



الشكل (3) منحنى الاستطاعة الخاص بالعنفة VESTAS 90-2MW وفق نظرية (BEMT) ($n=11.65$ rpm)



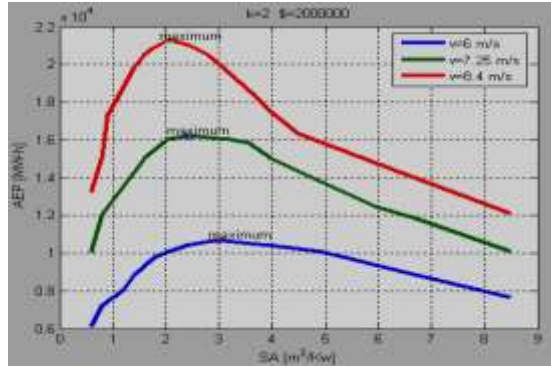
الشكل (4) منحنى الاستطاعة الخاص بالعنفة VESTAS 90-2MW [6].

بالمقارنة بين المنحنيين نلاحظ تقارب النتائج مع وجود اختلافات بسيطة سببها الأساسي يعود إلى نوع السطح الانسيابي المستخدم في عملية النمذجة، حيث افترضنا في الدراسة أنه من نوع (S809) وذلك من أجل كامل مقاطع الشفرة على امتداد طولها، إضافة إلى التأثيرات الثلاثية الأبعاد للظواهر الأيروديناميكية المرافقة لعمل العنفة والتي لم تؤخذ في الاعتبار في هذه الدراسة [7,8].

النتائج والمناقشة:

الحل الأمثل للعلاقة بين قطر الدوار واستطاعة المولد

يبين الشكل (5) النتائج الخاصة بتطبيق الخوارزمية البرمجية لإيجاد الحل الأمثل من أجل كلفة ثابتة ($\$=2,000,000$) والموافقة لثلاثة مصادر مختلفة من الرياح (ثلاثة مواقع).



الشكل (5) الخرج الكهربائي السنوي كتابع لـ (SA) من أجل (K=2 , \$=2000000) عند سرعات رياح مختلفة

نلاحظ من هذه المنحنيات أنه وعند قيمة ثابتة لكل من الكلفة وعامل الشكل (K) في الموقع المدروس توجد قيمة محددة تمثل ذروة المنحني، والتي من أجلها نحصل على خرج أعظمي للطاقة الكهربائية، وهذه الذروة تمثل الحل الأمثل، حيث أن أي قيمة مغايرة من المنحني سوف يكون الخرج الكهربائي أقل. كما نلاحظ أن زيادة سرعة الرياح الوسطية تسبب زيادة في قيمة الخرج الكهربائي السنوي للعنفة، وهذا أمر متوقع بالنظر للعلاقة بين سرعة الرياح واستطاعة العنفة، حيث أن أية زيادة بسيطة في سرعة الرياح يرافقتها زيادة واضحة في الاستطاعة. من ناحية أخرى، إن القيمة المثلى للنسبة الخاصة (SA) والتي توافق الخرج الأعظمي للطاقة تتناقص مع زيادة سرعة الرياح في الموقع. يدل تناقص قيمة (SA) على زيادة في استطاعة المولد وتناقص في قطر الدوار. إن الاختيار الصحيح لقطر الدوار الموافق لاستطاعة المولد وخاصة تقليل قطر الدوار قدر الإمكان يساهم في تحسين المردود الكلي للمزارع الريحية، من خلال إمكانية زيادة عدد العنفات المركبة في المزرعة الواحدة مع تحسين الظواهر الأيروديناميكية المرافقة لتوضع العنفات المتجاورة. يبين الجدول (2) ملخص النتائج الخاصة بالحالة السابقة. تمثل قيم (SA) الحل الأمثل لكل حالة من الحالات وهي التي تحقق خرج كهربائي سنوي أعظمي.

جدول (2) الحل الأمثل والخرج الكهربائي الأعظمي للحالة (K=2 , \$=2,000,000)

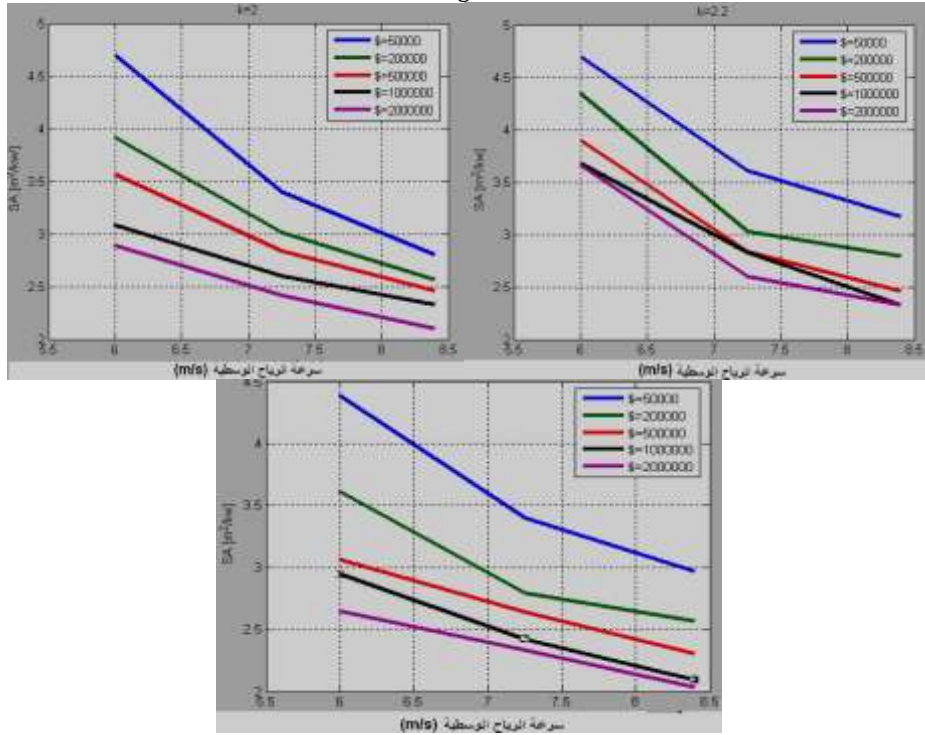
عامل الشكل (K)	الكلفة بالدولار الامريكي (\$) (\$)	سرعة الرياح V[m/sec]	استطاعة المولد p_{gen} [Kw]	قطر الدوار R[m]	النسبة الخاصة (SA) m^2/Kw	AEP MW-h/year
K=2	\$=2,000,000	6	4900	69.56	3.1	10692
		7.25	6029	68.16	2.42	16152
		8.4	6686	66.87	2.1	21288

إن كافة الحالات الأخرى المدروسة في البحث سوف تعطي منحنيات مشابهة من حيث الشكل العام مع تأكيد على اتجاه النتائج التي تم التوصل إليها في الحالتين السابقتين و الاختلاف في القيم فقط.

تأثير تغير قيمة متوسط سرعة الرياح السنوية (v_{avg}) على الحل الأمثل

يبين الشكل (6) أنه عند موقع ريحي بشروط محددة ($k=ثابت$)، يتجه الحل الأمثل (قيمة SA) للانخفاض مع زيادة سرعة الرياح الوسطية (v_{avg}). يعني ذلك أنه بازياد سرعة الرياح الوسطية سوف تنخفض قيمة نصف قطر العنفة مع ازدياد في قيمة استطاعة المولد ودوماً عند كلفة ثابتة بحسب العلاقة:

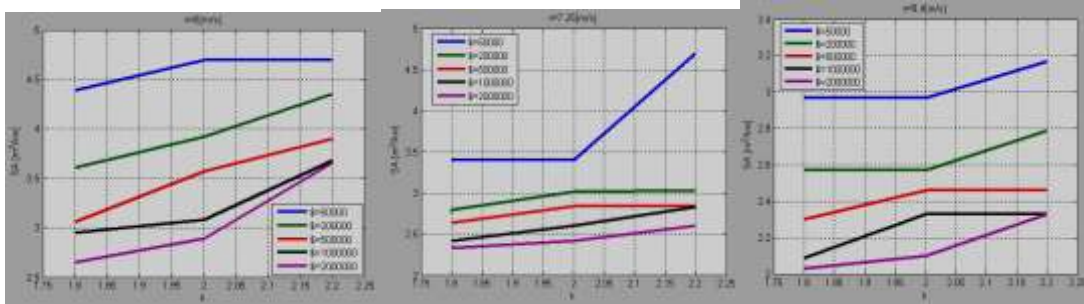
$$SA = \frac{\pi \cdot R^2}{P_{gen}}$$



الشكل (6) تأثير سرعة الرياح الوسطية (v_{avg}) على الحل الأمثل عند تكاليف مختلفة

تأثير تغير قيمة عامل الشكل (k) على الحل الأمثل

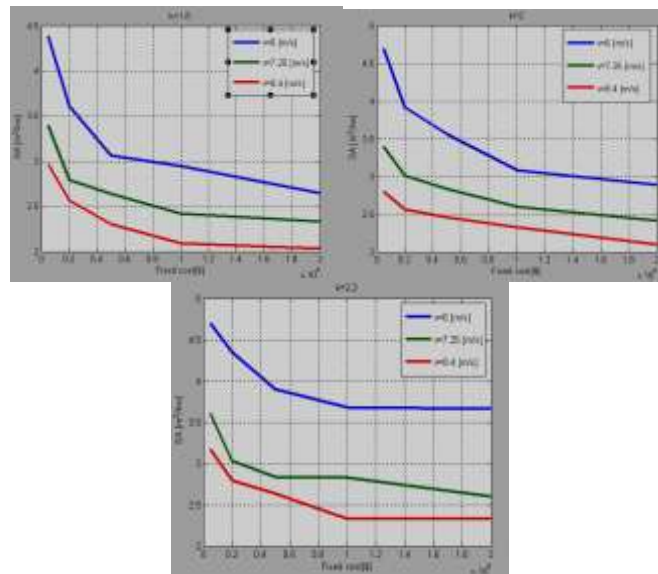
يبين الشكل (7) أنه من أجل سرعة رياح وسطية ثابتة (v_{avg})، أية زيادة في عامل الشكل (K) تؤدي إلى زيادة في قيمة (SA). إن ارتفاع قيمة (K) تعني أن معدل هبوب الرياح وفقاً لقيمة قريبة من القيمة السنوية الوسطية يزداد خلال العام. وعلى الرغم من أن الحالات المدروسة تبين أن قيمة (SA) تزداد بزيادة (K)، فإن هذه الزيادة قد تكون صغيرة جداً، وقد تكون غير ذات أهمية في بعض الحالات كما يلاحظ إمكانية وصول المنحني إلى ذروة محددة ثم يعود لينخفض قليلاً مع زيادة (K).



الشكل (7) تأثير عامل الشكل (k) على الحل الأمثل عند تكاليف مختلفة

تأثير كلفة المولد والدوار (\$) على الحل الأمثل

يبين الشكل (8) أنه عند موقع ريحي محدد يملك عامل شكل (k) ثابت وسرعة رياح وسطية ثابتة (v_{avg}) تنخفض قيمة (SA) مع ارتفاع قيمة كلفة المولد والدوار (\$). أي عند ارتفاع قيمة الكلفة تصبح استطاعة المولد هي الأهم , مقارنة مع الدوار عند موازنة العلاقة بينهما. يعود السبب إلى الاختلاف الموجود في العلاقة التي تحدد تكلفة كل من المولد والدوار. حيث نلاحظ من العلاقة (2) أن كلفة المولد تتعلق وبشكل خطي بقيمة استطاعته. بينما كلفة الدوار من العلاقة (1) تتعلق بمكعب نصف قطره.



الشكل (8) تأثير كلفة المولد والدوار على الحل الأمثل عند سرعات رياح وسطية مختلفة

الاستنتاجات والتوصيات:

توصلنا من خلال الدراسة السابقة إلى النقاط الأساسية التالية:

- من أجل موقع جغرافي ما بشروط رياح محددة، يوجد حل أمثل بين قطر دوار العنفة الريحية واستطاعة المولد الكهربائي المربوط معه، و يتغير هذا الحل مع تغير قيمة رأس المال (كلفة العنفة الإجمالية).
- يتأثر الحل الأمثل بطبيعة وشروط الرياح في الموقع المراد تركيب العنفة الريحية فيه وذلك من خلال عاملين اثنين، هما عامل الشكل (k) وسرعة الرياح الوسطية (v_{avg}).

- إن زيادة قيمة عامل الشكل مع ثبات العوامل الأخرى يسبب زيادة قطر الدوار وتناقص في استطاعة المولد الكهربائي.

- إن زيادة سرعة الرياح الوسطية في الموقع مع ثبات العوامل الأخرى يسبب انخفاضاً في قيمة قطر الدوار وزيادة في استطاعة المولد الكهربائي.

- زيادة كلفة رأس المال الإجمالي للعنفة الريحية يسبب تغير في قيم الحل الأمثل حيث يتناقص قطر الدوار وتزداد استطاعة المولد الكهربائي، مع ملاحظة أنه عند القيم الكبيرة للكلفة قد لا يكون هناك تأثير كبير للكلفة على الحل الأمثل، وخاصة عند قيم عالية لعامل الشكل حيث تصبح سرعة الرياح الوسطية في الموقع أكثر ثباتاً. يوصى بالنقاط التالية:

- ضرورة دراسة كل من متوسط سرعة الرياح في الموقع وكيفية توزع هذه السرعة بشكل مستقل وذلك عند اختيار أبعاد العنفة الريحية المراد تركيبها في الموقع المدروس، حيث أن موقع بسرعة رياح وسطية مرتفعة ليس بالضرورة موقع جيد للاستثمار في الطاقة الريحية، فقد يكون توزع سرعة الرياح في هذا الموقع على مدار العام غير مناسب.

- تم من خلال هذه الدراسة اختبار خمس قيم مختلفة للكلفة من أجل تسعة مواقع ريحية مختلفة، كما تمت دراسة قيم لعامل الشكل ضمن مجال معين (2, 2.2, 1.8). وقد يكون من المفيد دراسة قيم لعامل الشكل ضمن المجال (1.5-3). وهذا الأمر ينطبق على قيمة سرعة الرياح الوسطية في الموقع.

- تم في هذه الدراسة حساب كلفة العنفة اعتماداً على كلفة كل من المولد والدوار فقط، وقد يكون من المفيد تضمين قيم تكاليف المكونات الأخرى للعنفة، مثل علبه السرعة وأنظمة التحكم وتكاليف التركيب والتشغيل والصيانة، ودراسة تأثيرها على طبيعة الحل الأمثل والنتائج.

ملحق (أ) جدول يوضح ملخص نتائج الدراسة

عامل الشكل	الكلفة الثابتة بالدولار الأمريكي	سرعة الرياح الوسطية V[m/sec]	استطاعة المولد P_{gen} [Kw]	نصف قطر الدوار R[m]	النسبة الخاصة SA[m ² /Kw]	AEP MW-h/year
K=1.8	S=50000	6	240	18.3	4.39	685
		7.25	280	17.5	3.4	955
		8.4	300	16.83	2.97	1175
	\$=200000	6	798.5	30.3	3.61	1989
		7.25	946.5	29	2.79	2849
		8.4	993	28.5	2.57	3606
	\$=500000	6	1800	41.9	3.06	3982
		7.25	2000	41.03	2.64	5784
		8.4	2200	40.12	2.3	7372
	\$=1000000	6	3100	53.97	2.95	6662
		7.25	3600	52.67	2.42	9779
		8.4	4000	51.57	2.09	12559
\$=2000000	6	5600	68.79	2.65	11061	
	7.25	6200	67.84	2.33	16371	
	8.4	6900	66.7	2.03	21182	
K=2	\$=50000	6	230	18.54	4.7	682
		7.25	280	17.36	3.38	959.5
		8.4	300	16.83	2.97	1211

	\$=200000	6	756	30.73	3.92	2020
		7.25	906	29.48	3.01	2920
		8.4	998	28.58	2.57	3690
	\$=500000	6	1590	42.5	3.57	3880
		7.25	1800	40.5	2.84	5780
		8.4	1910	38.7	2.46	7473
	\$=1000000	6	2900	53.5	3.08	6495
		7.25	3290	52.2	2.6	9715
		8.4	3560	51.4	2.33	12690
	\$=2000000	6	5100	69.56	2.89	10692
		7.25	6000	68.16	2.43	16211
		8.4	6800	66.87	2.07	21300
K=2.2	\$=50000	6	230	18.61	4.7	667
		7.25	270	17.61	3.61	966
		8.4	290	17.1	3.17	1225
	\$=200000	6	700	31.12	4.35	1934
		7.25	900	29.48	3.03	2848
		8.4	950	29.04	2.79	3705
	\$=500000	6	1500	43.13	3.9	3811
		7.25	1900	41.47	2.84	5746
		8.4	2100	40.58	2.46	7563
	\$=1000000	6	2600	55.21	3.68	6306
		7.25	3200	53.71	2.83	9641
		8.4	3700	52.4	2.33	12764
	\$=2000000	6	4300	70.75	3.66	10368
		7.25	5700	68.63	2.6	16095
		8.4	6200	67.84	2.33	21380

المراجع:

- 1- SCHMIDT,H. *The Economic Optimization of Wind Turbine Design*.1ST.ed, Thesis , Georgia Institute of Technology ,2007,115.
- 2- D.J. Malcolm; A.C. Hansen, *WindPACT Turbine Rotor Design Study*, 1ST.ed, National Renewable Energy Laboratory,2002,52
- 3- Hansen.M, *Aerodynamics of Wind Turbines*, 2ST.ed, published by Earthscan in the UK and USA in 2008,181.
- 4- J.F. Manwell, J.G. McGowan ; A.L. Rogers;A.L.ROGERS,*WIND ENERGY EXPLAINED THEORY,DESIGN AND APPLICATION*, 1ST.ed. University of Massachusetts, Amherst, USA,2002,576.
- 5- Burton.T; Sharpe.D; Jenkins.N; Bossanyi.E, *WIND ENERGY HANDBOOK*, 1ST.ed, England,2001,617.
- 6- WWW.VESTAS.COM.
- 7- Ahlstrom.A, *Aeroelastic Simulation of Wind Turbine Dynamics*, 1ST.ed, Stockholm, Sweden,2005,154.
- 8- Mathew.S, *Wind Energy Fundamentals, Resource Analysis and Economics*, 1ST.ed, India,2006,246.