

تأثير البارامترات الحاكمة على أداء توربين ريحي ذو محور أفقي، للوصول إلى أفضل مردود ممكن عند سرعات الرياح المنخفضة

د. فريد أبو حامد*

(تاريخ الإيداع 19 / 7 / 2011. قُبِلَ للنشر في 9 / 10 / 2011)

□ ملخص □

ينطلق البحث من فكرة أن كثيراً من شركات تصنيع التوربينات الريحية لا تدخل في حساباتها سرعة الرياح المنخفضة في التصميم الأساسي للتوربينات، وتعتمد في تصميمها على سرعات كبيرة لا تبلغها الرياح في منطقتنا العربية إلا لساعات معدودة على مدار السنة باستثناء بعض المناطق، الأمر الذي يستوجب بذل جهود ملموسة لتطوير صناعة توربينات الرياح الصغيرة التي تعمل بسرعات منخفضة بما يتوافق مع المعطيات الريحية والمتطلبات المحلية. إن الهدف العام من تصميم توربين ريحي مثالي هو إمكانية استخلاص طاقة الرياح بأقل كلفة ممكنة للمنظومة، وهذا الهدف قد يختلف بعض الشيء عن تصميم توربين ريحي مثالي لسرعة رياح منخفضة، وبذلك سيواجه التصميم تحديات أكبر تتمثل بانخفاض الأداء وكذلك مشكلة الإقلاع. لذلك فإن معظم العوامل المؤثرة قد تم دراستها خلال البحث وأدخلت القيم المثالية لها في التصميم الأساسي، وبما أن التوربين يمكن أن يواجه ظروفاً مختلفة عن الواقع التصميمي فقد تمت دراسة أداء التوربين عملياً من خلال السيطرة والتحكم بقيم معظم البارامترات المؤثرة، وبيان تأثير ذلك على بعضها الآخر وكذلك على فعالية التوربين في استخلاص الطاقة ومن أهم هذه العوامل: عدد ريش الدوار (N) ونسبة الصلابة (σ)، وزاوية ميل الريشة (θ)، ونسبة سرعة الطرف (λ)، والحمل المسلط (P).

الكلمات المفتاحية: توربين ريحي، سرعة رياح منخفضة، تصميم، ريشة، الصلابة، نفق هوائي.

* أستاذ مساعد - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق - سورية.

The Effects of Parameters on the Performance of a Horizontal Wind Turbine for obtaining Optimum Efficiency at Low Wind Speed

Dr. Farid Abouhamed*

(Received 19 / 7 / 2011. Accepted 9 / 10 / 2011)

□ ABSTRACT □

This study has started from the idea that many of the manufacturers of wind turbines do not take into account the low speed of winds in the basic design of wind turbines, as they base their design on high speeds that winds in the Arab region cannot reach but only for a few hours throughout the year, except for some areas. This involves some real efforts to be exerted to improve the industry of small wind turbines operating at low speeds in accordance with wind data and local requirements.

The general purpose of designing an ideal wind turbine is to see the possibility of extracting wind energy at low cost. This target may differ slightly from the design of an ideal wind turbine for low speed winds, thus facing bigger challenges represented in the starting problem and the decrease of performance. Therefore, most factors affecting the performance have been studied through this research and the relevant ideal values have been introduced in the basic design.

Since the turbine may face performance conditions different from the design environment, the turbine performance has been practically studied through controlling the values of most affecting parameters and their effect on each other and on turbine efficiency for extracting energy. The main factors that influence efficiency are: the number of rotor blades (N), rigidity proportion (σ), the inclination (θ), the rate of edge speed (λ), and the applied load (P).

Keywords: Wind Turbines, Low speed, Design, blade, Solidity, Wind Tunnel.

* Associate Professor, Faculty of Electrical & Mechanical Engineering, Damascus University, Syria.

مقدمة:

على الرغم من التطور الرائع في تصميم توربينات الرياح الكبيرة في العقود الثلاثة الأخيرة إلا أن توربينات الرياح الصغيرة لم تحظ بالتطور المطلوب لأسباب معروفة. وفي الآونة الأخيرة بدأت الدول المتقدمة تهتم بتطوير صناعة توربينات الرياح الصغيرة وتعمل على تمويلها، لما تمتاز به من خواص مهمة وأثبتت جدارتها من التطبيقات الميدانية. وبعد الاطلاع على مجموعة كبيرة من المراجع اتضح أن التوربين الريحي الصغير هو أكثر تعقيداً من دراسة توربينات الرياح الكبيرة؛ وذلك لعدة أسباب منها: إن سرعة دوران التوربينات الصغيرة كبيرة بالمقارنة مع التوربينات الكبيرة، وكذلك يعمل توربين الرياح الصغير ضمن طبقة الجو الأقرب من سطح الأرض ذات نسبة الاضطراب الأكبر. إضافة لعدم امتلاك الرياح الصغيرة لمنظومات السيطرة على أداء التوربين بما يلائم الظروف المحلية [1].

استناداً إلى الدراسة النظرية لتصميم توربين الرياح وفق نظرية عنصر زخم النصل (*BEM*) [2] لحالة الأداء الأمثل لسرعة الرياح المنخفضة وبحدود 8 [m/s] ، وبعد الانتهاء من عملية بناء التوربين بمواصفات جهاز اختبري، كان لا بد من التحقق من أداء التوربين ومقارنة النتائج العملية بالجانب النظري. إن عملية اختبار توربين ريحي بقطر 2.8 [m] دون وجود نفق هوائي مناسب فيها الكثير من الصعوبات والتحديات، وتكمن هذه التحديات بعدة نقاط منها:

1- إن اختيار منظومة بديلة للنفق الهوائي يتطلب دراسة معمقة للتأثيرات الجانبية التي قد ترافق هذه العملية، وتأثير ذلك على دقة البيانات التجريبية [3].

2- عدم توافر أجهزة القياس الخاصة بسرعة الرياح وسرعة دوران التوربين وأجهزة قياس الحمل الكهربائي، وإيجاد البدائل المناسبة لها لغرض إنجاز عملية الاختبار هي مهمة صعبة.

3- عملية اختبار التوربين بطرق مبتكرة مثل المنصة المتحركة هي عملية مكلفة مادياً وتشكل عقبة أمام الإمكانيات المتوفرة والمتواضعة.

4- عدم توافر الكوادر الفنية المساعدة لتنفيذ مهمة علمية تشكل تحدياً كبيراً.

5- المخاطر المتوقعة خلال إجراء عملية الاختبار، حيث يتم أخذ البيانات التجريبية في موقع أسفل التوربين مباشرة مع العلم أن الاختبار كان يمثل التشغيل التجريبي للتوربين المصمم والمنفذ محلياً وهو يدور بسرعة دوران تصل إلى أكثر من 600 [rpm] ، حيث تبلغ قوة الطرد المركزية لكل ريشة بحدود 10000 [N] .

6- عملية اختبار التوربين الريحي تتطلب معرفة مسبقة بالأهداف المرجوة من عملية الاختبار، ومعرفة الأسلوب الصحيح لتنفيذ عمليات الاختبار؛ وهذا الموضوع معقد لكثرة البارامترات المتغيرة، وفيه الكثير من التفاصيل الدقيقة.

يوضح الشكل (1) توربيناً ريحياً اختبارياً تم بناؤه ضمن متطلبات إنجاز هذا البحث



الشكل (1) التوربين الريجي الاختباري

الموقع المتاح لإجراء الاختبار ميدانياً هو فوق سطح أحد المباني السكنية ، حيث يقابل منطقة مفتوحة باتجاه الجنوب، يرتفع سطح البناية بحدود 20m عن سطح الأرض، ويحيط بالموقع مبانٍ سكنية من جميع الجهات، تم رفع التوربين بواسطة برج بارتفاع 6m. وقد أجريت تجارب اختبار التوربين خلال شهر آذار (مارس) من عام 2009. كما تم اختبار التوربين على منصة متحركة (عربة حمل) مهيأة لإجراء التجارب عند سرعات مختلفة للرياح وذلك في منطقة بالقرب من مدينة دمشق.

أهمية البحث وأهدافه:

تعد بحوث أداء توربينات الرياح الصغيرة في الكثير من الجامعات ومراكز البحوث المختصة في السنوات الأخيرة من البحوث المهمة، وإذا حققت توربينات الرياح الصغيرة كفاءة مقبولة وانتشاراً واسعاً فقد تكون منافساً قوياً لتوربينات الرياح الكبيرة في توليد طاقة الرياح.

إنَّ الهدف العام من التصميم والاختبار لتوربين ريجي صغير ذي ريش قابلة للتعديل $N=2, 3, 6$ وتحديد خصائصه التصميمية عند سرعة الرياح المنخفضة، وبيان الحالة المثالية لزاوية ميل الريشة مع سرعة الرياح ومع سرعة دوران التوربين، وبيان تأثير نسبة الصلابة σ على θ ، λ وصولاً إلى تحليل النتائج والبيانات التي تؤدي إلى تحديد مواصفات التوربين الذي يقدم أفضل مردود ممكن عند سرعة الرياح المنخفضة.

الدراسة المرجعية:

تطرق (Fuglsang P. and Madsen H.) [4] إلى أسلوب تحقيق المثالية في التصميم، وتعتمد دراسة تحقيق المثالية على التعرف الواضح لهدف التصميم، بالإضافة إلى تحديد مجال أو فضاء الحل. وتعريف فضاء الحل (*solution space*) يكمن في سعة ومدى حرية متغيرات التصميم. إن طرق تحقيق المثالية هو علم يستخدم بكثرة في الآونة الأخيرة بسبب التوسع في إدخال المتغيرات المتعددة الداخلة ضمن المسائل الهندسية. ويعدُّ تصميم توربين الرياح من المسائل العديدة المتغيرات. وهناك شواهد متزايدة على تطبيق تحقيق المثالية في مشاريع تصميم توربين ريحي.

تشمل منظومة التوربين الريحي العديد من مجالات التصميم المختلفة؛ الميكانيكية والكهربائية والهيكلية والاقتصادية. والعديد من المشاريع التي تتحقق فيها المثالية تؤدي بالباحث إلى تحقيق أحد الأهداف المطلوبة أو مجموعة متداخلة، وفي التوربين الريحي تؤخذ اعتبارات التصميم الاقتصادية في معظم الأحيان بالحسبان كأسبقية أولى، حيث إن هدف التصميم المقبول هو إنتاج طاقة على مدار السنة بأقل كلفة ممكنة مقبولة اقتصادياً.

أجرى (Benini E. and Toffolo A.) [5] دراسة على تحقيق المثالية متعددة الموضوعية في بحثه، فوضع نموذجاً لتوربين ريحي، ومتغيرات التصميم كانت القدرة التصميمية للتوربين، ونصف قطر الريشة، بالإضافة إلى طول وتر سطح الانسياب، وتوزيعات زوايا قتل الريشة، وحساب الأداء الأيروديناميكي للريشة وفق نظرية *BEM*. وأكد الباحث على إدخال عامل الكلفة واحداً من شروط المثالية. وعلى سبيل المثال افترض بأن الأنصال تشكل 20 % فقط من كلفة التوربين، وكلفة التوربين لها علاقة خطية بالوزن ونوع منظومة التحكم وما تحققه من زيادة في إنتاج الطاقة، وعلى الرغم من كثرة المحددات فقد أدخل الكثير من التبسيط لتحقيق تصميم موضوعي بحالة مثالية.

ودرس (Mark C. R.) [6] تأثير الصلابة، وعدد الريشات، وزاوية ميل الريشة على أداء توربين الرياح الصغير في استخلاص الطاقة الديناميكية للرياح وسرعة الإقلاع، وتم إجراء التجارب على منصة ثابتة ضمن سرعات متغيرة للرياح. وأجريت الدراسة العملية على توربينين صغيرين نوع (*Bergey XL.1*) بقطر دوار قدره 2.5m وعدد الريشات 3 والصلابة 6%، حيث كانت تجري عملية تغيير في عدد الريشات وزاوية ميل الريشة لأحد النموذجين، ومن ثم أجريت عملية مقارنة لتقويم تأثير التعديل الذي تم إجراؤه. بينما كان التحكم بالحمل الكهربائي يجري يدوياً.

لقد تم تغيير عدد ريشات التوربين لغاية 6 ريشات ونسبة الصلابة لغاية 12%، بينما كان يجري عملية تغيير زاوية ميل الريشة بإضافة حشوات تحت قاعدة الريشة ويتم ذلك بعد إنزال التوربين إلى الأرض. والخلاصة التي تم التوصل إليها هي: يتناسب عدد الريشات لأفضل أداء تناسباً عكسياً مع سرعة الرياح، وتتغير قيمة زاوية ميل الريشة للحالة المثالية تناسباً عكسياً مع نسبة سرعة طرف التوربين.

لقد أجرى (Jessica S. and K. Visser) [7] دراسة أخرى أكثر تعمقاً لدراسة تأثير عدد الريشات والصلابة وزاوية ميل الريشة مع تغيير تصميم الريشة لنموذج توربين رياح صغير، في جامعة (Clarkson University) وباستخدام النفق الهوائي دون الصوتي. تم بناء أكثر من نموذج ريشة باستخدام سطح انسيابي نوع (SG6043) عند قيم رينولد $Re=10^5$.

وتم بيان تأثير تغيير عدد الريشات بين 3 و6 و12 مع المحافظة على نسبة الصلابة عند 5%، ومن ثم تم تثبيت عدد الريشات وتغيير نسبة الصلابة من 5% و10% إلى 15%. تم إجراء الاختبارات عند سرعات رياح مختلفة، وعند حمل متغير لبيان قيمة أعظم معامل طاقة ممكن. أشارت النتائج الأولية إلى أنه عند سرعة رياح 5[m/s] فإن معامل الاستطاعة C_p قد ازداد من $C_p=29\%$ عند $\sigma=10\%$ إلى $C_p=34\%$ عند $\sigma=15\%$.

وأشارت التجارب عند سرعة رياح $5[m/s]$ ونسبة صلادة $\sigma = 10\%$ إلى انخفاض أداء التوربين من 29% إلى 24% عند زيادة عدد الريشات من 3 إلى 6 ريشات. وبين الباحث انه قد يكون لانخفاض قيم Re عند زيادة عدد الريشات سبباً في تدني قيمة معامل الاستطاعة.

طرائق البحث ومواده:

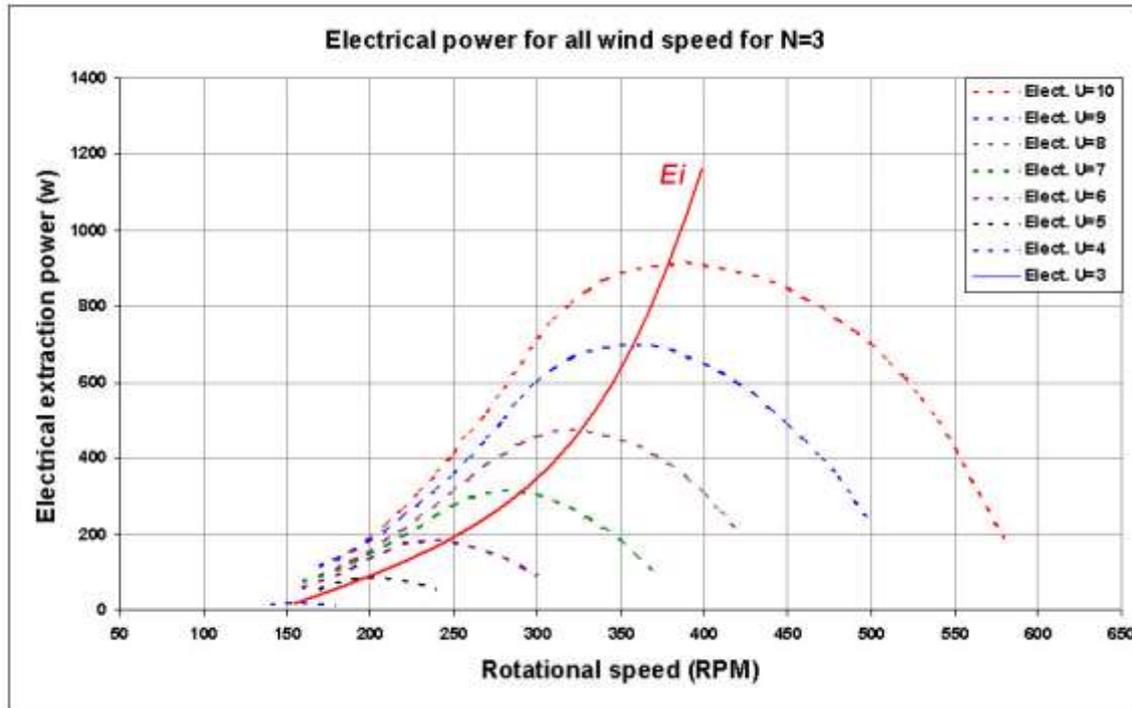
الغرض من إجراء التجارب على توربين الرياح المصمم هو التحقق من الأداء ومقارنة النتائج بالجانب النظري، وكذلك بيان تأثير البارامترات الحاكمة على الأداء وتحديد القيم المثالية للوصول إلى أفضل مردود ممكن عند سرعة الرياح المنخفضة، وأهم العوامل المؤثرة هي: تأثير سرعة الرياح، وتأثير الحمل، وتأثير نسبة الصلابة وعدد الريش، وتأثير زاوية ميل الريش. ولذلك يتطلب إجراء التجارب خطوات محددة لتحقيق الأهداف المرجوة، وهذه الخطوات هي كما يلي:

- 1- تقسم التجارب إلى ثلاث مجموعات رئيسية حسب عدد ريش التوربين (2، و3، و6).
- 2- تقسم كل مجموعة تجارب رئيسية إلى 9 مجموعات فرعية حسب سرعة الرياح $10-2[m/s]$.
- 3- تتكون كل مجموعة تجارب فرعية من 6 إلى 8 تجارب وذلك حسب قيم زاوية ميل الريشة، وتبدأ بزاوية ميل 30° ولغاية 0° بخطوة ثابتة مقدارها 5° .
- 4- تبدأ التجارب عند سرعة رياح مقدارها $10[m/s]$ وزاوية ميل الريشة عند 30° . ثم يتم إطلاق التوربين بحرية ليبدور دون أي حمل ليصل إلى أعلى سرعة دوران ممكنة، مع وجوب مساعدة التوربين على الإقلاع يدوياً في حال عدم تمكنه من الإقلاع ذاتياً، وبعدها تسجيل بيانات الطاقة المستخلصة وسرعة دوران التوربين بعد كل عملية زيادة في الحمل الكهربائي، والذي يؤدي عادة إلى انخفاض في سرعة دوران التوربين ويفضل بواقع خطوة لكل انخفاض مقداره $20[rpm]$ ، وتستمر خطوات زيادة الحمل لغاية توقف التوربين عن الدوران. وبذلك سنحصل على منحني يمثل علاقة الطاقة المستخلصة مع سرعة الدوران لسرعة رياح $10[m/s]$ وزاوية ميل 30° [8], [9].
- 5- بإعادة التجربة للخطوة (4) مع خفض زاوية ميل الريشة لحدود 25° أي بواقع انخفاض 5° لكل تجربة ولغاية زاوية ميل 0° ، وبذلك نحصل على 6 منحنيات تبين تأثير تغيير زاوية ميل الريشة على الأداء عند سرعة رياح ثابتة $10[m/s]$.
- 6- نعيد خطوات المرحلة (4 و5) مع تغيير سرعة الرياح من $10[m/s]$ إلى $9[m/s]$ سنحصل على مجموعة أخرى من المنحنيات تبين تأثير زاوية الميل عند سرعة رياح $9[m/s]$. نستمر بخفض سرعة الرياح بواقع $1[m/s]$ ولغاية $2[m/s]$ وبذلك سنحصل على نتائج المجموعة الرئيسية الأولى والمتمثلة بعلاقة الطاقة المستخلصة مع تغيير سرعة الرياح وزاوية ميل الريشة عند عدد محدد من الريش.
- 7- وبإعادة الخطوات (4 و5 و6) مع تغيير عدد الريش سنحصل على ثلاث مجموعات رئيسية من التجارب تبين تأثير عدد الريش لجميع سرعات الرياح وزوايا ميل الريشة.

النتائج والمناقشة:

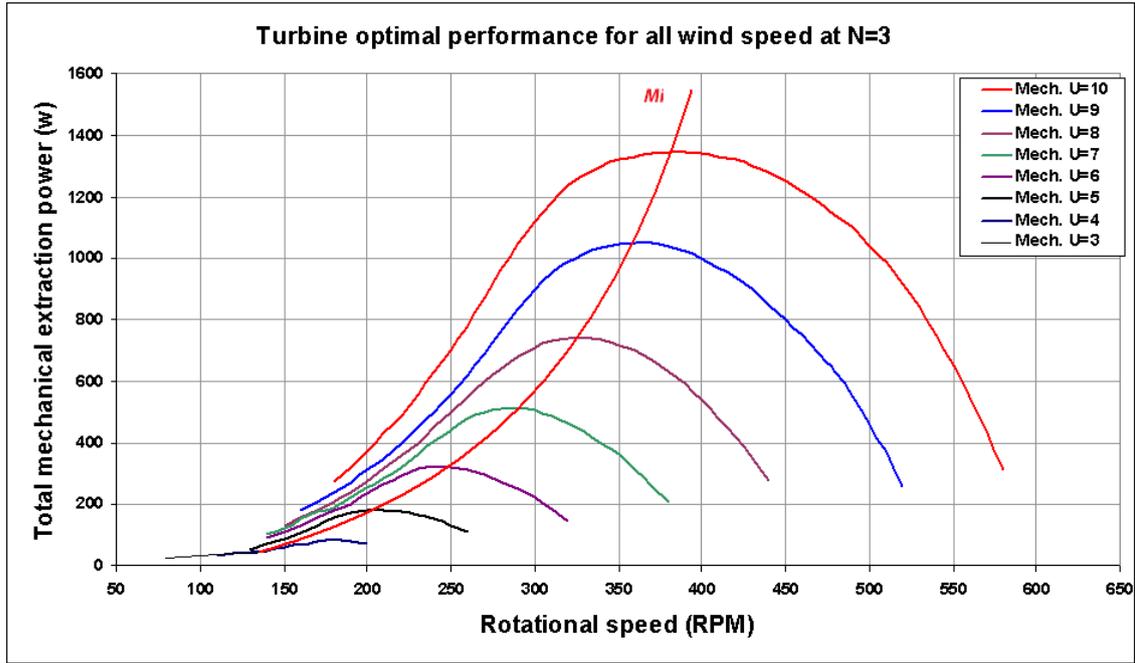
تبين نتائج اختبارات التوربين على وجود زاوية ميل معينة للريشة وسرعة دوران محددة يمكن أن تحقق حالة مثالية في استخلاص طاقة الرياح، وقيم هذه الزاوية تختلف حسب قيم سرعة الرياح، ولغرض إجراء عملية المقارنة

للنتائج المستخلصة فقد تم رسم منحنيات استخلاص الطاقة الكهربائية بمنحني (*Curves fitting*) بواسطة برنامج (*Grapher Version 1.09*). ومنحنيات الطاقة الكهربائية لجميع سرعات الرياح للحالة المثالية، موضحة بالشكل (2)، حيث يمثل هذا الشكل صورة شاملة لخصائص التوربين للحالة المثالية ولجميع سرعات الرياح، يمكن من هذه المنحنيات إيجاد منحني أفضل أداءً لجميع سرعات الرياح وما يناسبها من سرعة دوران وزاوية ميل مناسبة، ويتم ذلك بإيصال نقاط أعظم قيم للطاقة المستخلصة مع بعضها، كما هو موضح بالمنحني (E_i) ذي الخط الأحمر المتصل.



الشكل (2) منحنيات أفضل أداء في إنتاج الطاقة الكهربائية لجميع سرعات الرياح.

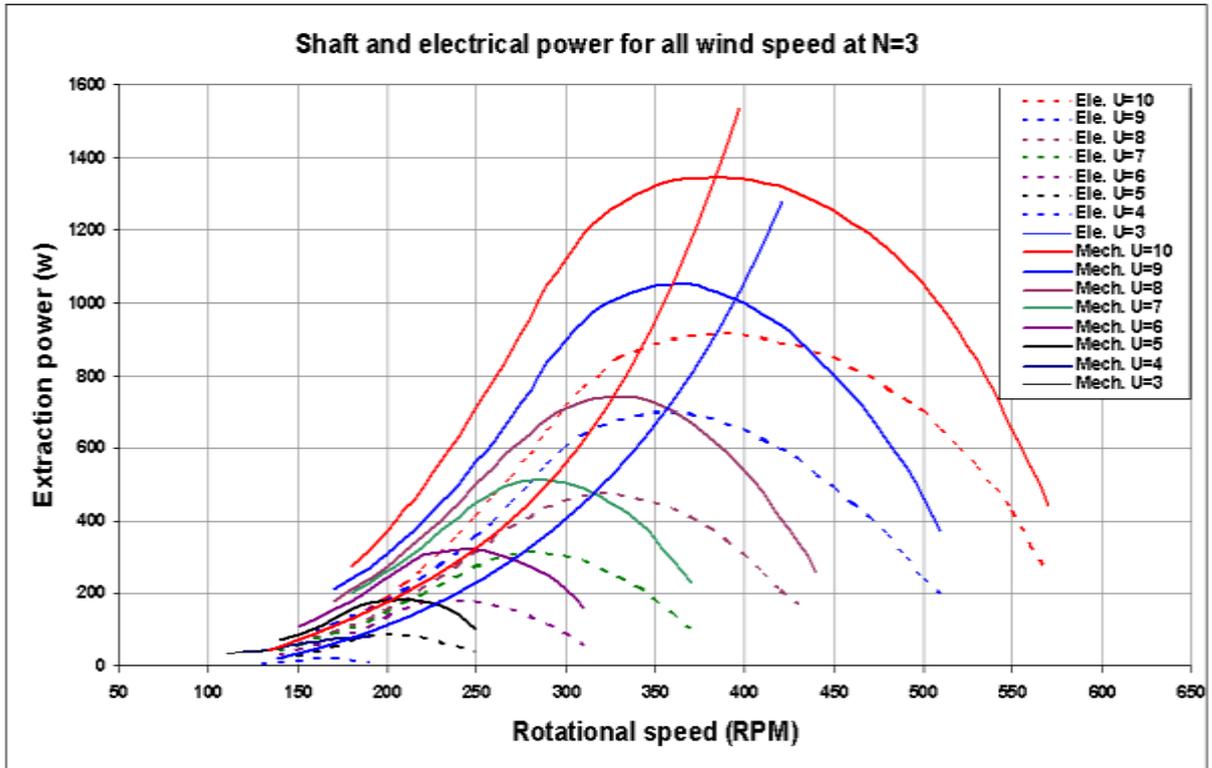
بإضافة ضياعات الطاقة يمكن رسم منحنيات الطاقة المستخلصة للحالة المثالية ولمختلف سرعات الرياح كما هي موضحة في الشكل (3).



الشكل (3) منحنيات أفضل أداء في استخلاص الطاقة الميكانيكية لجميع سرعات الرياح.

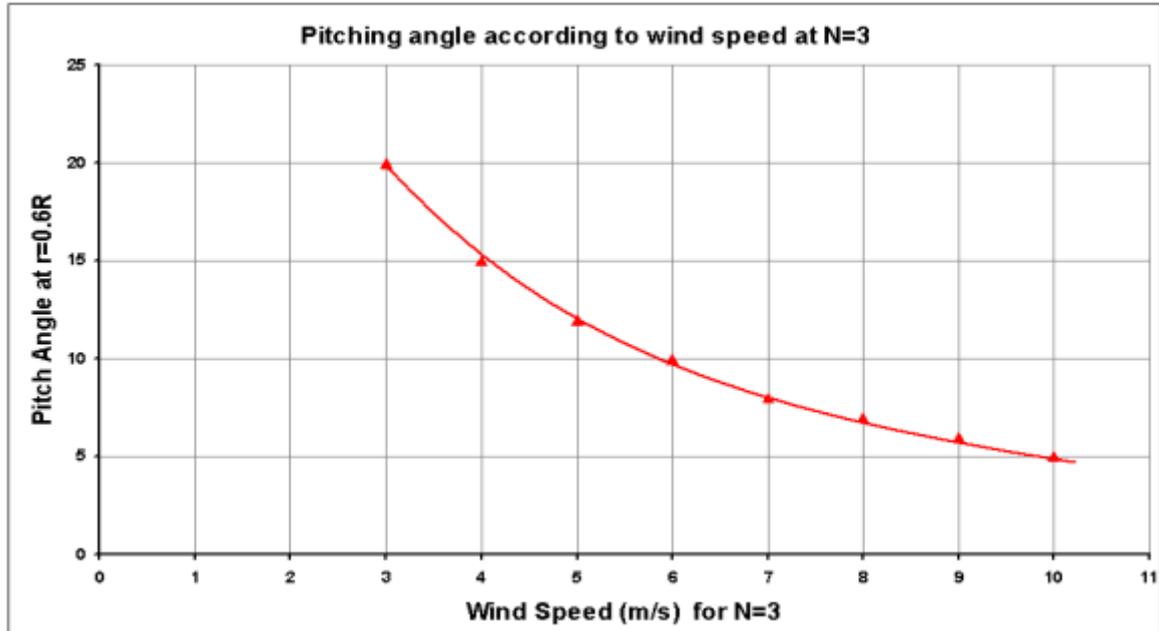
لغرض مقارنة منحنى أداء إنتاج الطاقة الكهربائية ومنحنى استخلاص الطاقة الميكانيكية للحالة المثالية يوضح الشكل

(4) مجموع العلاقات لحالة عدد الريشات $N=3$.



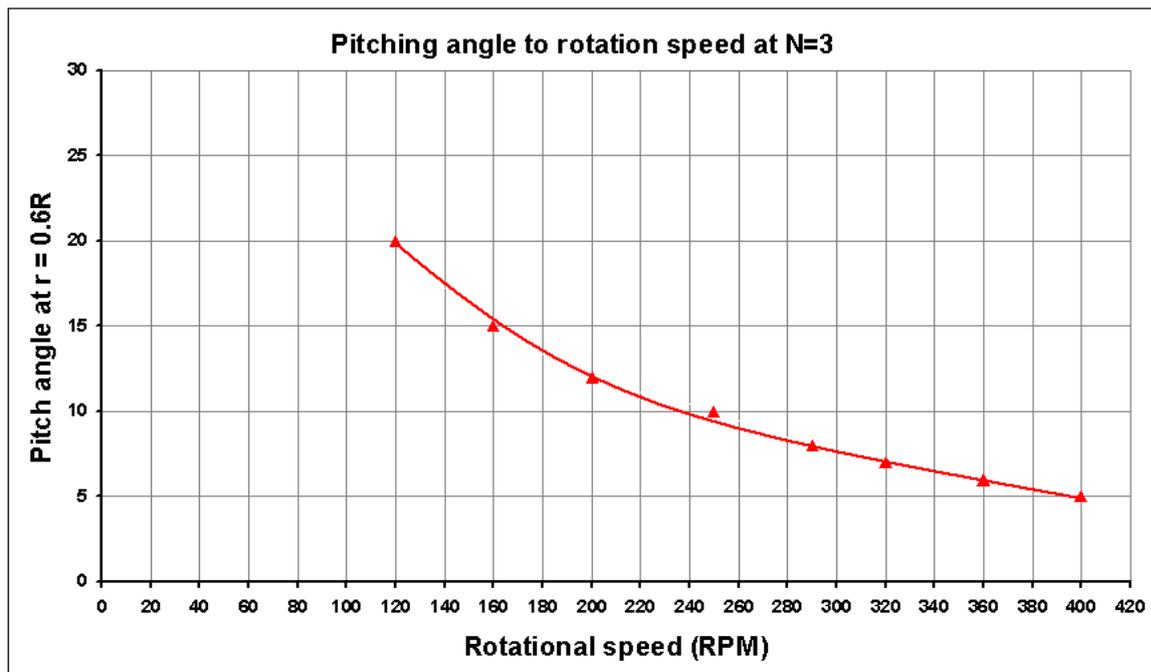
الشكل (4) مقارنة بين منحنى إنتاج الطاقة الكهربائية ومنحنى استخلاص الطاقة الميكانيكية عند $N=3$.

بعد تحديد منحنى الأداء الأمثل للتوربين لحالة $N=3$ يمكن تحديد قيم زاوية الميل وسرعة الدوران التي تلائم سرعة الرياح، يوضح الشكل (5) علاقة أفضل زاوية ميل للريشة مع سرعة الرياح، هذه العلاقة مهمة لغرض تصميم منظومة التحكم بزاوية الريشة اعتماداً على قيم سرعة الرياح.



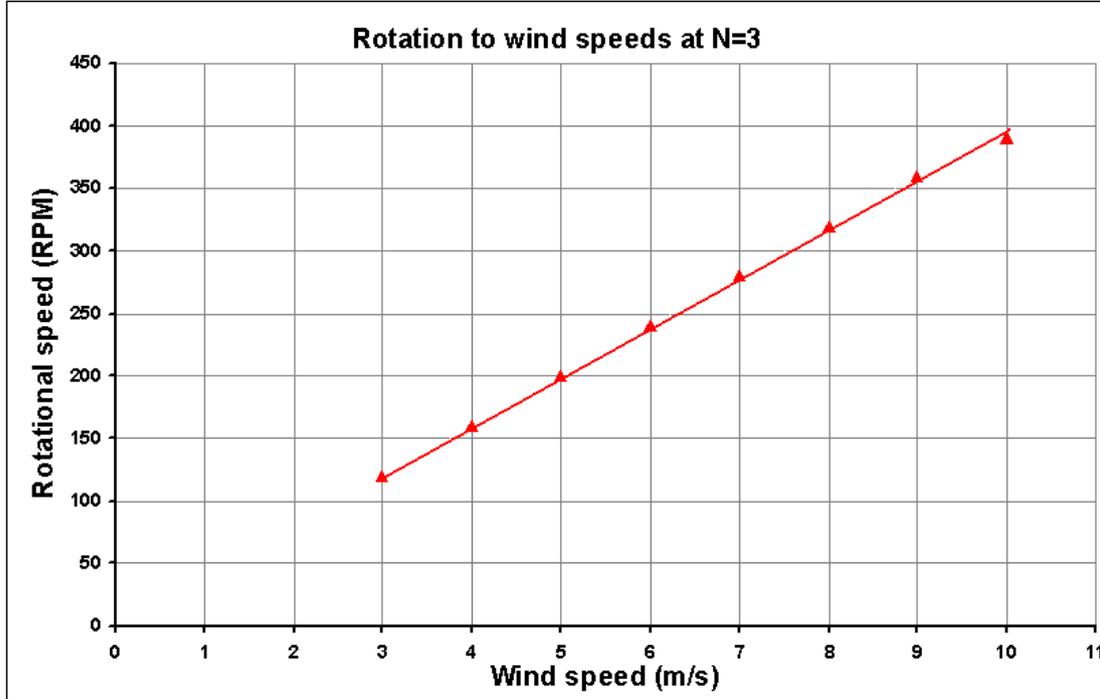
الشكل (5) العلاقة التصميمية لزاوية ميل الريشة مع سرعة الرياح عند $N=3$.

كذلك يمكن تصميم منظومة التحكم اعتماداً على منحنى علاقة سرعة الدوران بزاوية ميل الريشة كما هو موضح بالشكل (6).



الشكل (6) علاقة زاوية ميل الريشة بسرعة الدوران لحالة أفضل أداء .

كذلك يمكن تحديد علاقة سرعة الدوران المثالية مع سرعة الرياح، وهي مهمة لغرض تحديد سرعة الدوران المثالية وتحديد شدة التوتر المناسبة في المولد الكهربائي وقيم الحمل الكهربائي مع سرعات الرياح المتاحة، وهذه العلاقة موضحة بالشكل (7).



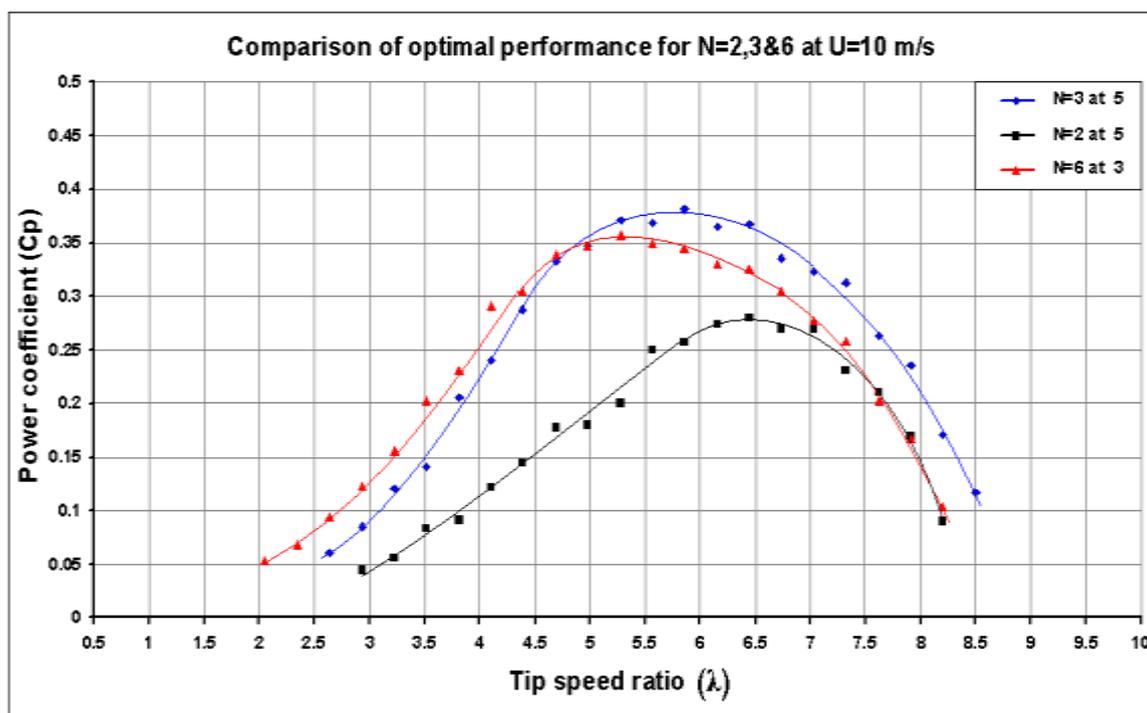
الشكل (7) العلاقة المثالية لسرعة دوران التوربين مع سرعة الرياح، لحالة $N=3$.

بعد إنهاء التجارب الخاصة بالتوربين ذي الثلاث ريشات تم إجراء تجارب أخرى لحالة التوربين ذي ست ريشات $N=6$ ، ومن ثم تنفيذ التجارب لحالة التوربين بريشتين $N=2$ ، و كانت نتائج التجارب تختلف بين حالة وأخرى بحسب عدد ريشات التوربين.

ولغرض الاختصار في عرض نتائج أداء التوربين للحالتين $N=2$ و $N=6$ لمختلف زوايا ميل الريشة، نكتفي بعرض بعض أفضل حالات أداء للتوربين عند $N=2$ و $N=6$ ولمختلف سرع الرياح من $U_0=10$ [m/s] ولغاية $U_0=2$ [m/s]، ومقارنتها لحالة $N=3$ ، مع تحديد قيم زاوية الميل التي حققت أفضل أداء.

يوضح الشكل (8) مقارنة شاملة لأداء التوربين، أي علاقة معامل الطاقة (C_p) مع معامل نسبة سرعة الطرف

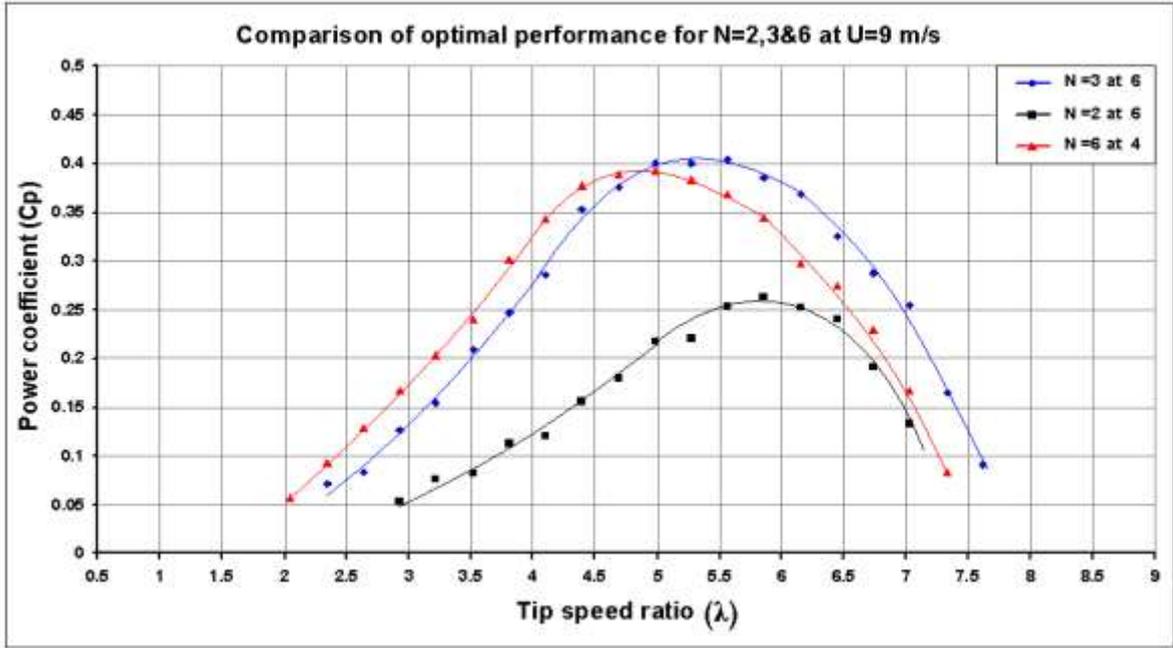
(λ) للتوربين عند الحالات الثلاث، $N=2,3$ و $N=6$.



الشكل (8) مقارنة أفضل أداء لثلاثة أنواع من التوربينات N=2,3&6 عند $U_0=10\text{m/s}$.

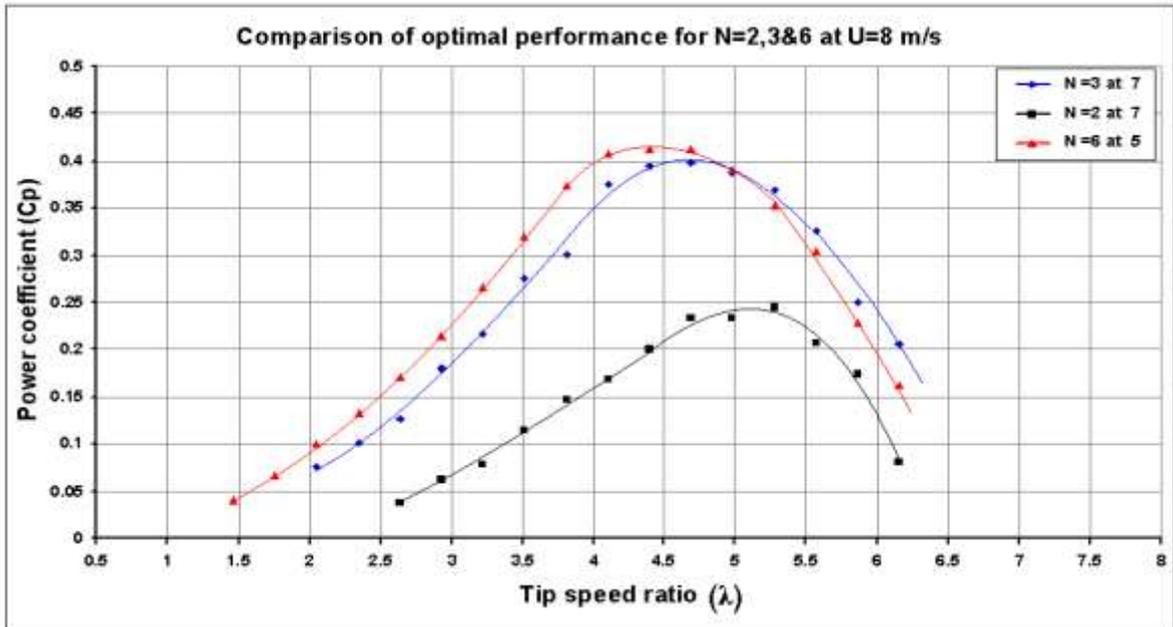
تبين عملية المقارنة في الشكل (8) أنه عند سرعة الرياح المرتفعة وبحدود $U_0=10\text{[m/s]}$ فإن أفضل أداء للتوربين يكون عند عدد الريشات 3، وقد حقق استخلاص طاقة ميكانيكية مقدارها 1350[W] عند سرعة دوران 370[rpm] ، أما التوربين ذو الريش 6 فقد حقق طاقة مستخلصة بحدود 1280[W] عند سرعة دوران 350[rpm] ، وفي التوربين بريشتين تمكن من استخلاص طاقة مقدارها 990[W] عند سرعة دوران 440[rpm] . ويتضح من ذلك أن أداء التوربين بثلاث ريشات يكون أفضل عند سرعة رياح بحدود 10[m/s] ، وقد حققت معامل طاقة قدرها 40% .

يبين الشكل (9) نتائج اختبار التوربين عند سرعة الرياح مقدارها $U_0=9\text{[m/s]}$ ، أن التوربين ذو الثلاث ريشات قد استخلص طاقة ميكانيكية مقدارها 1060[W] عند سرعة دوران مقدارها 360[rpm] بمعامل طاقة مقداره 40% .



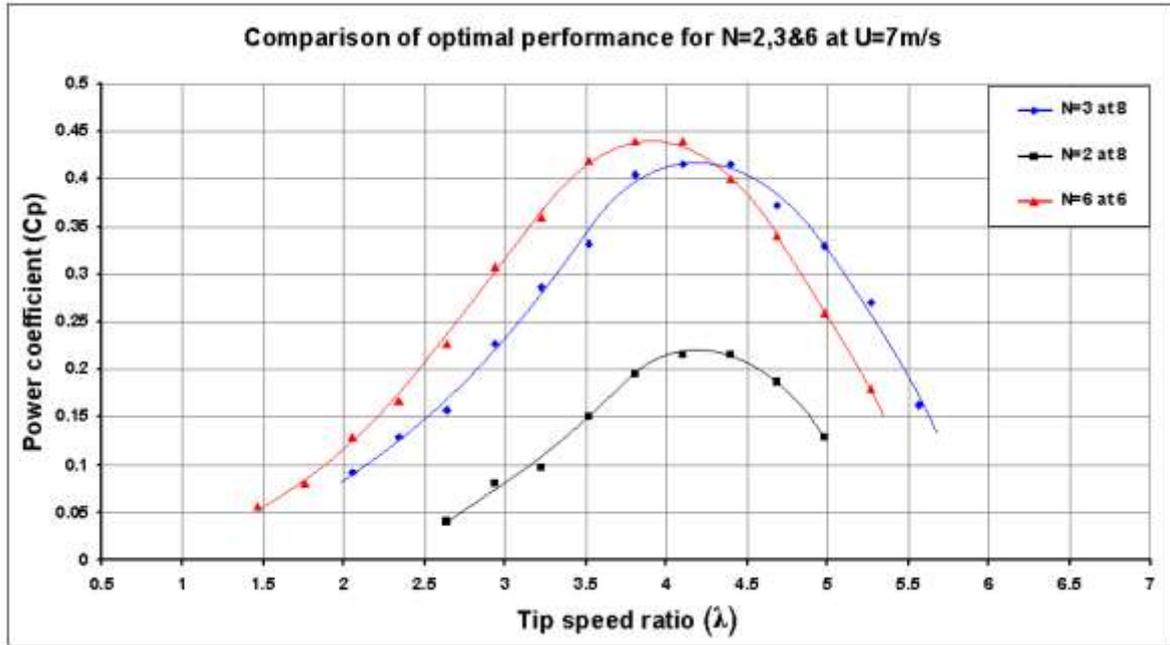
الشكل (9) مقارنة أفضل أداء لثلاثة أنواع من التوربينات N=2,3&6 عند $U_0=9\text{m/s}$.

عند سرعة الرياح $U_0=8\text{m/s}$ تقدم أداء التوربين ذي الريشات الستة في استخلاص الطاقة الميكانيكية إذ حقق طاقة مستخلصة مقدارها 770W بمعامل طاقة مقداره 42%، في حين تخلف التوربين ذو ثلاث ريشات وأنتج طاقة مقدارها 740W بمعامل طاقة 40.7%، نتائج المقارنة موضحة في الشكل (10).



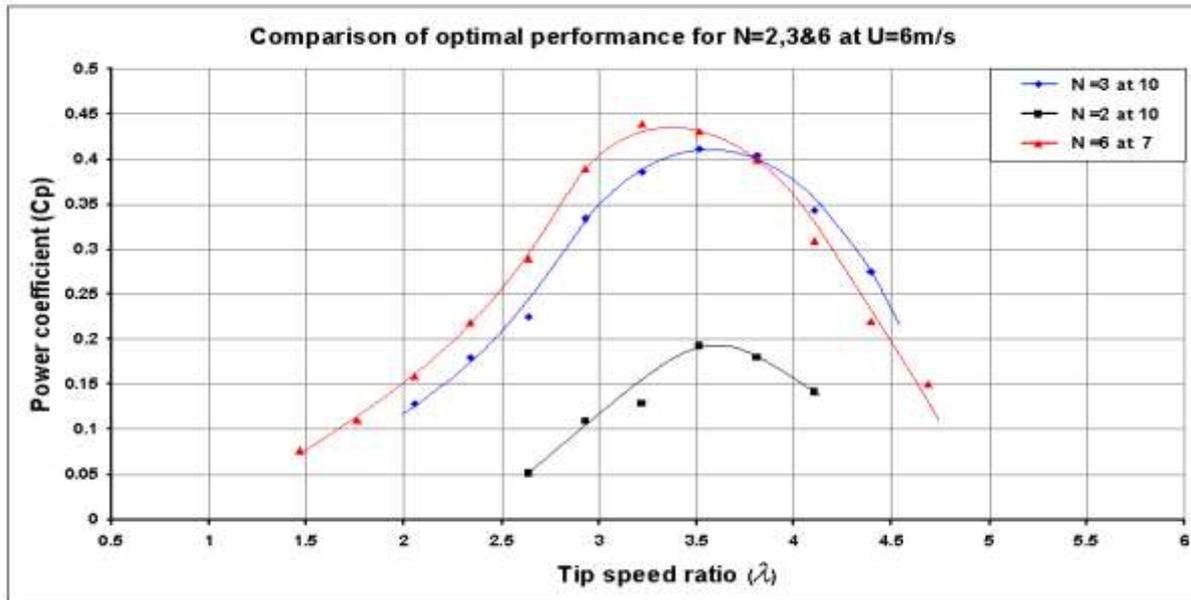
الشكل (10) مقارنة أفضل أداء للتوربينات الثلاثة N=2,3&6 عند $U_0=8\text{m/s}$.

تشير نتائج التجارب على توربينات الرياح الثلاثة للحالات $N=2,3&6$ ، إلى تقدم أداء التوربين ذي الريشات الستة على النوعين الآخرين، ويوضح الشكل (11) ثلاثة منحنيات تمثل أفضل أداء للحالات الثلاث من عدد الريشات.



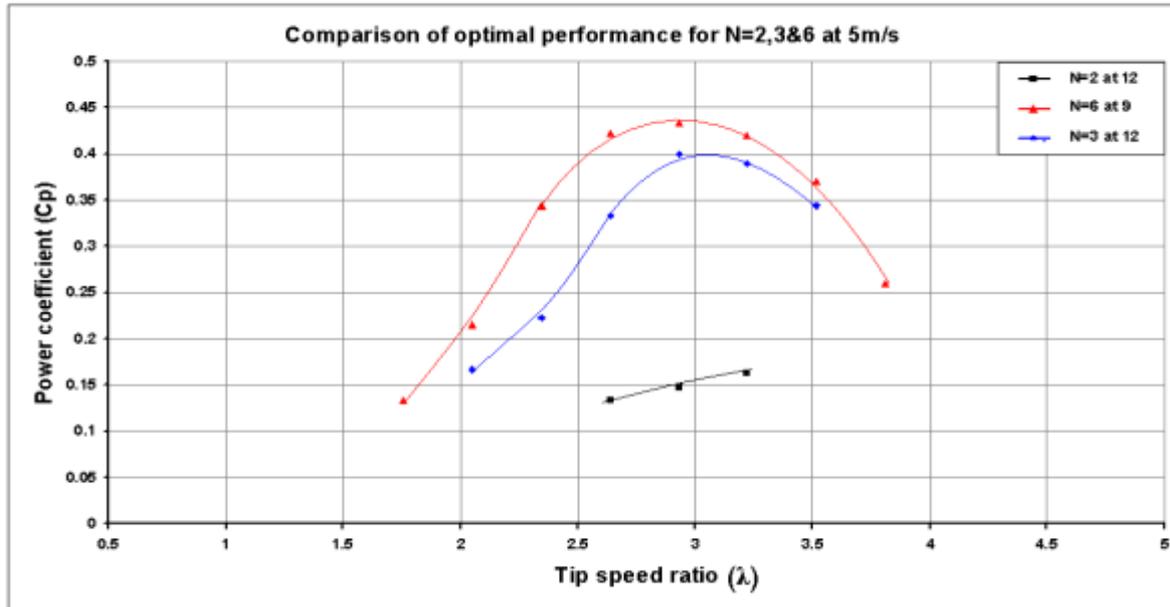
الشكل (11) مقارنة أداء التوربين للحالات عند $U_0=7\text{m/s}$ و $N=2,3&6$.

تتخفص الطاقة المستخلصة لأنواع التوربينات الثلاثة بدرجة كبيرة، يوضح الشكل (12) منحنيات معامل الطاقة مع نسبة سرعة الطرف للحالات الثلاث من عدد الريشات.



الشكل (12) مقارنة أداء التوربين للحالات عند $U_0=6\text{m/s}$ و $N=2,3&6$.

يوضح الشكل (13) منحنيات معامل الطاقة للحالات الثلاث من عدد الريشات، حيث يتبين تدني قيم (C_p) للتوربين ذي الريشتين وتوفوق التوربين ذي الريشات الست.

الشكل (13) مقارنة أداء التوربين للحالات N=2,3&6 عند $U_0=5m/s$.

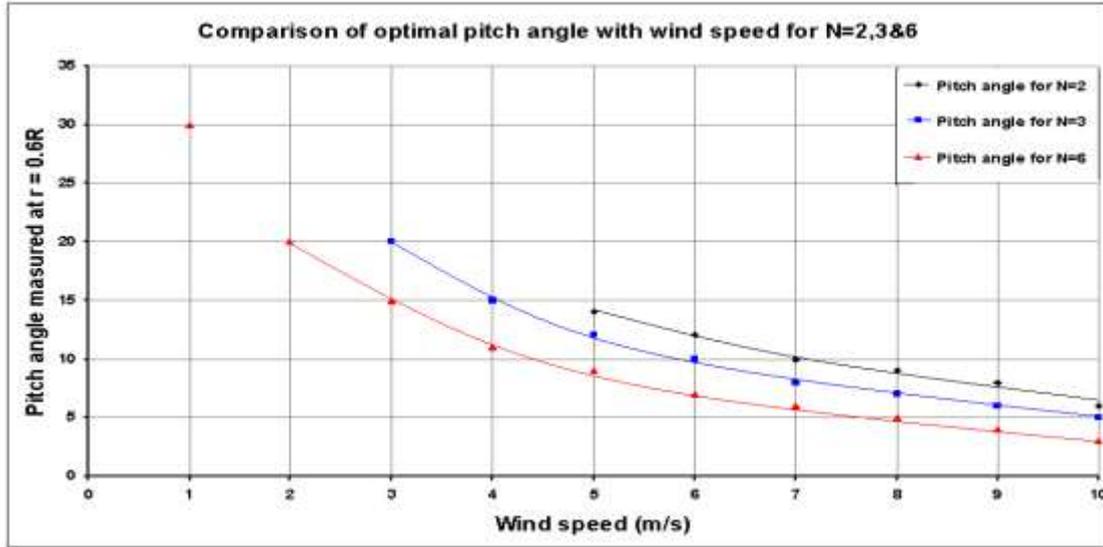
الخصائص التصميمية للتوربين لحالة N=2,3&6 ولجميع سرعات الرياح:

Design characteristic of the turbine for case N=2,3&6 and all wind speed

لقد أدت زاوية ميل الريشة دوراً كبيراً في تحديد قيم معامل الطاقة وإمكانية التوربين للإقلاع الذاتي، وتبين النتائج التي تم توضيحها سابقاً أنه لا قيم محددة تمثل حالة مثالية لزاوية ميل الريشة أو أي عامل آخر، بل تتغير قيم جميع العوامل للحالة المثلى مع تغيير سرعة الرياح أو الحمل الكهربائي المسلط على التوربين، وكذلك إذا حصل أي تغير في قيم أي عامل يؤثر على الأداء سيؤدي ذلك إلى تغير قيم العوامل الأخرى حتى مع ثبات قيمة سرعة الرياح والحمل الكهربائي، وبذلك يمكن للمصمم أن يعتمد على متغيرين فقط في تصميم منظومة السيطرة على الأداء كما هي الحال في التوربينات الصغيرة، ويكون التصميم أكثر فاعلية إذا أدخلت عوامل أخرى ولكن سيؤدي ذلك إلى تعقيد منظومة التحكم وزيادة تكاليفها كما هي الحال في التوربينات التجارية الكبيرة والتي تعمل منظومة التحكم لها وفق برنامج حاسوبي وتدخل عدداً كبيراً من البارامترات المتغيرة في عملها.

1- التحكم بزاوية ميل الريشة بدلالة سرعة الرياح:

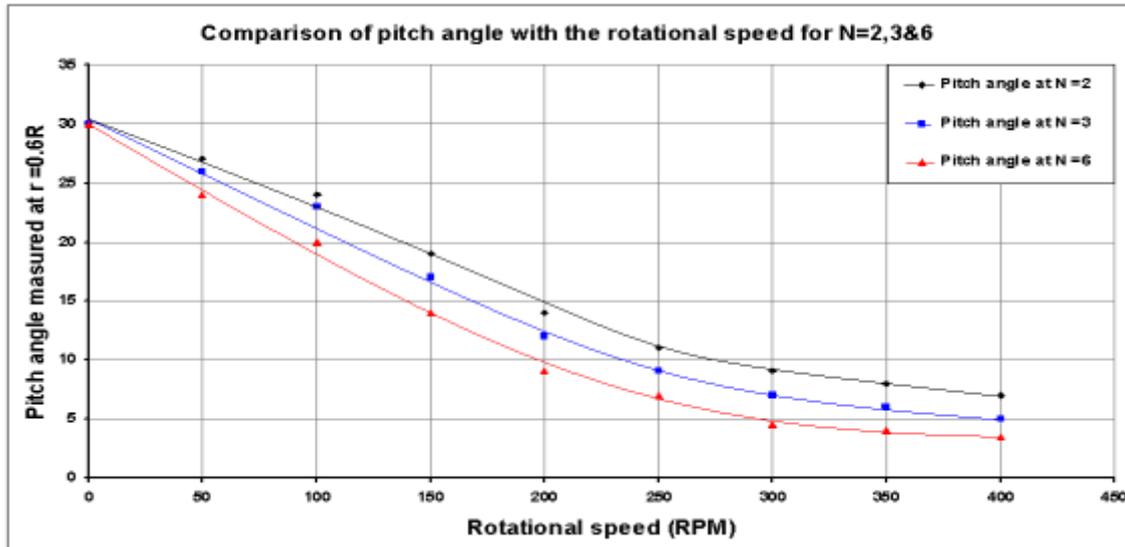
تعد سرعة الرياح من أهم العوامل التي تتحكم بقيم الطاقة المتاحة، وللاستثمار الأمثل للطاقة ضمن سرعة رياح مختلفة فلا بد من تغيير قيم زاوية ميل الريش وفق العلاقة الموضحة في الشكل (14) للأنواع الثلاثة وبحسب عدد الريشات.



الشكل (14) علاقة مثالية لزاوية ميل الريش مع سرعة الرياح لحالات ثلاث من عدد الريش.

2- التحكم بزاوية ميل الريشة بدلالة سرعة دوران التوربين:

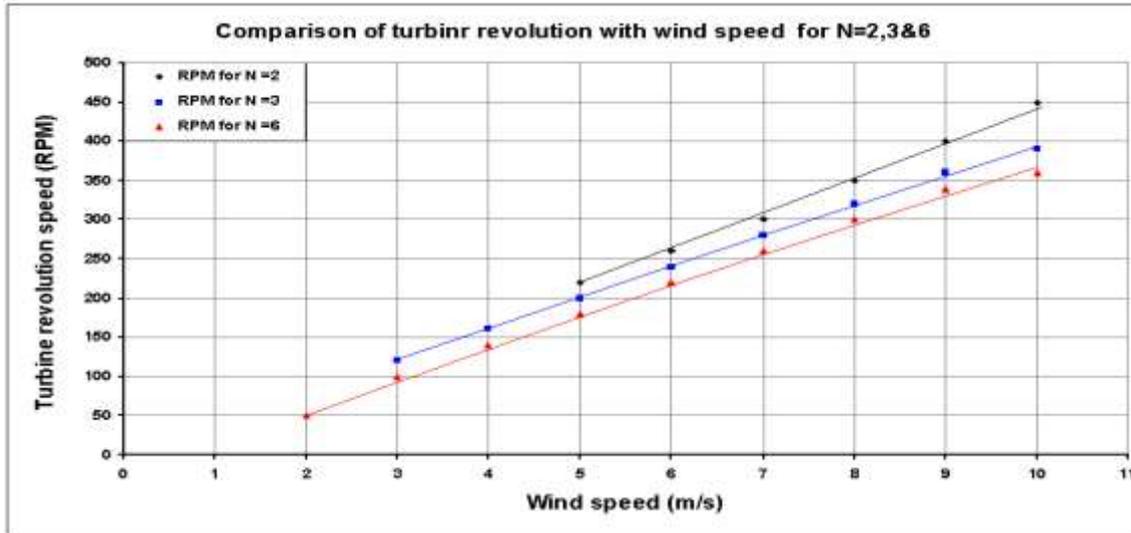
إن لسرعة دوران التوربين علاقة قوية بسرعة الرياح، وبذلك يمكن الاعتماد على سرعة الدوران لتصميم منظومة تعمل وفق مبدأ قوى الطرد المركزي للتحكم بزاوية ميل ريشة التوربين بدلالة سرعة دورانها ووفق العلاقة المبينة في الشكل (15) ولثلاثة أنواع من التوربينات بحسب عدد ريشات الدوار.



الشكل (15) علاقة زاوية ميل الريشة مع سرعة دوران التوربين لحالات ثلاثة من عدد الريشات.

3- التحكم بسرعة دوران التوربين بدلالة سرعة الرياح:

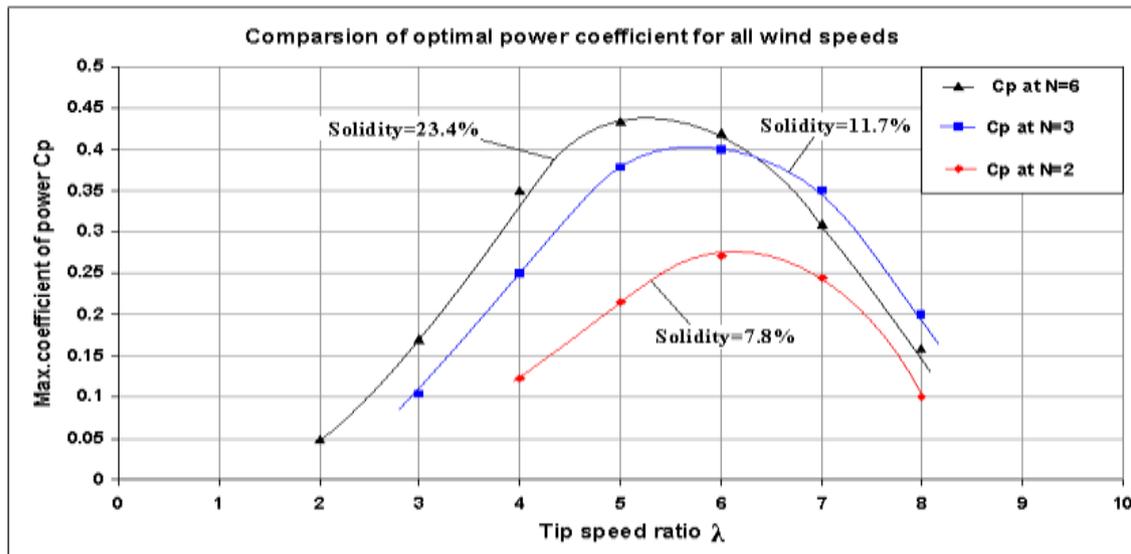
تعتمد شدة التوتر والطاقة المتولدة في المولد الكهربائي لتوربين الرياح على سرعة الدوران بشكل أساسي، ولذلك يفضل التحكم بسرعة الدوران حسب سرعة الرياح المتاحة وفق العلاقة الموضحة في الشكل (16) لثلاث حالات من عدد ريشات الدوار.



الشكل (16) أفضل علاقة لسرعة دوران التوربين مع سرعة الرياح للحالات الثلاث من عدد الريشات.

4- أداء التوربين بدلالة معامل الطاقة (C_p) ونسبة سرعة الطرف (λ) ونسبة الصلابة (σ):

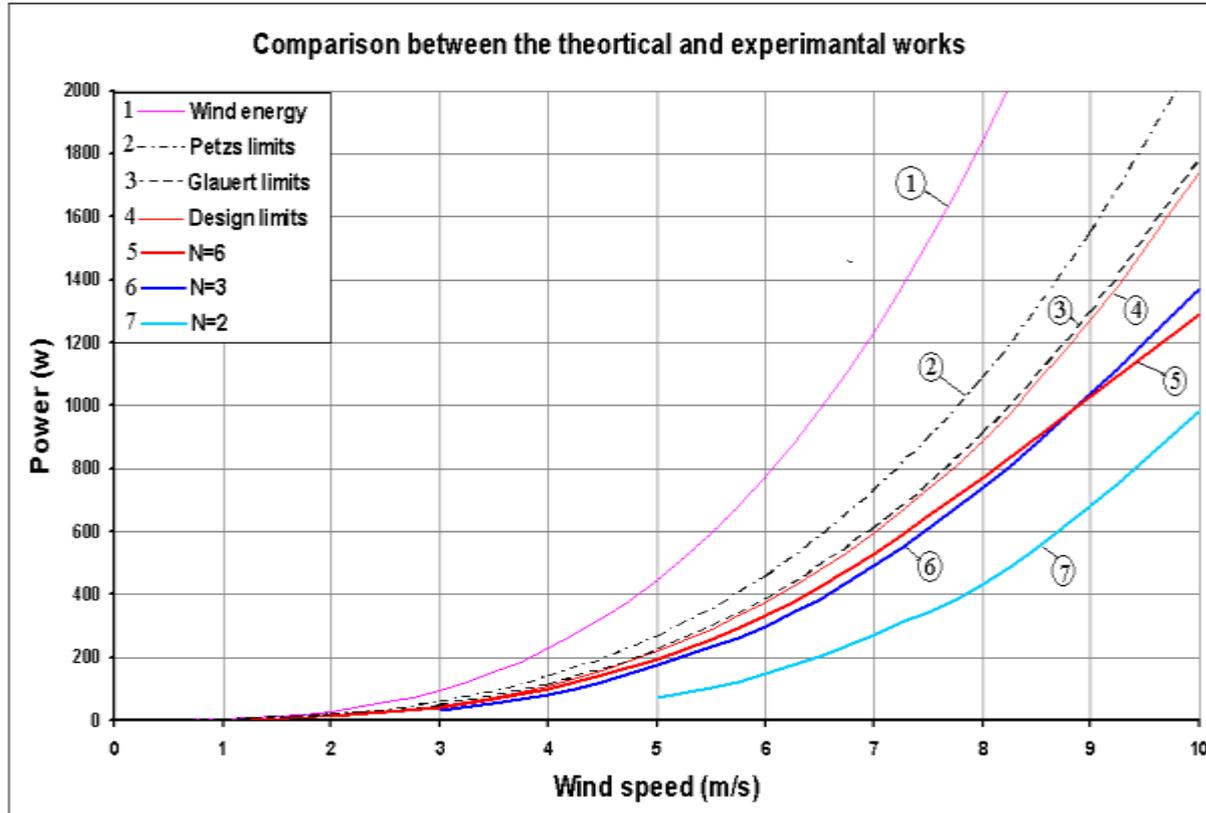
تعد نسبة سرعة الطرف (λ) عاملاً أساسياً للتحكم بأداء التوربين، لأنه يتضمن سرعة الرياح وسرعة الدوران في وقت واحد، وبذلك ستؤثر قيمه على قيم زاوية هجوم عناصر الريشة [10]. يوضح الشكل (17) علاقة معامل الطاقة بنسبة سرعة الطرف وتأثير عدد الريشات أو الصلابة على هذه العلاقة.

الشكل (17) علاقة (C_p) مع (λ) وتأثير الصلابة على هذه العلاقة.

مقارنة النتائج العملية بالجانب النظري:

إن قيمة الطاقة المتاحة في الرياح تتناسب مع مكعب سرعة الرياح، ومع كون قطر التوربين المصمم هو بحدود 2.8m، لذلك يمثل المنحني رقم (1) في الشكل (18) علاقة قيم الطاقة المتاحة في تيار الهواء المار عبر دوار التوربين مع سرعة الرياح. وحسب نظرية بيتز فان أفضل أداء للتوربين في استخلاص الطاقة لا يتجاوز 59.3% من الطاقة الكلية لتيار الهواء المار بقرص الدوار كما موضح في المنحني رقم (2). خلال عملية تصميم الريشة اختير

النموذج الذي حقق شروط الأداء والمتانة وكان عند قيم $\lambda_d = 6$ وقد حقق هذا النموذج نظرياً معامل طاقة بحدود $C_p=0.51$ ، وبذلك سيكون مقدار الطاقة النظرية المتوقع تحويلها في التوربين بحسب المنحني رقم (3). أما قيم معامل الطاقة المتحولة حسب معادلة كليبرت فهي بحدود 0.49 وقيم الطاقة المتحولة ستكون كما في المنحني رقم (4). وعملياً يمثل المنحني رقم (5) قيم الطاقة المستخلصة في التوربين ذي الست ريش، والمنحني رقم (6) للتوربين ثلاثي الريشات، وأخيراً المنحني رقم (7) لقيم الطاقة المستخلصة من التوربين ذي الريشتين.



الشكل (18) مقارنة للطاقة المستخلصة نظرياً مع القيم العملية لثلاث حالات من عدد الريشات.

ويتضح من مقارنة الطاقة المستخلصة عند سرعة الرياح التصميمية $8[m/s]$ ، أن التوربين ذو ست ريش قد حقق 86% من النتائج النظرية، وأن التوربين ذو ثلاث ريش قد حقق 83% من النتائج النظرية، وأن التوربين ذو الريشتين قد حقق 49% من النتائج النظرية.

الاستنتاجات والتوصيات:

1- تبين نتائج الاختبارات المتمثلة بمنحنيات الطاقة الكهربائية المستخلصة، أن لكل سرعة رياح هنالك سرعة دوران وزاوية ميل للريشة تحقق أفضل أداء، وقيم سرعة الدوران المثالية تتناسب طردياً بعلاقة خطية مع سرعة الرياح كما موضح في الشكل (7) والشكل (16)، وزوايا ميل الريشة تتناسب عكسياً بمنحني مع سرعة الرياح كما هو موضح في الشكل (5) والشكل (14). وباستخدام هذه العلاقات يمكن تصميم منظومة تحكم تحقق أفضل أداء لجميع سرع الرياح.

2- تبين نتائج مقارنة تأثير عدد الريشات التوربين (2 و 3 و 6) على معامل الطاقة (C_p) عند سرعات مختلفة للرياح $2 \div 10[m/s]$ ، أن التوربين ذا الريشتين لا يعمل بشكل جيد عند سرعة الرياح المنخفضة ويتحسن أدائه

مع زيادة سرعة الرياح، ولقد حقق معامل أداء متدنٍ عند سرعة رياح $10[m/s]$ مقداره 28% ، ويمكن أن يعمل أفضل من ذلك عند سرعة الرياح الأكبر من $15[m/s]$. أما توربين الرياح ذو ثلاث ريشات فقد حقق معامل أداء مقبول عند سرعة رياح $10[m/s]$ وكانت بحدود 38% . وعند سرعة الرياح دون $8m/s$ ، يغلب أداء التوربين ذي ستة ريشات على التوربين بثلاث ريشات. وهذه النتائج تؤكد حاجة التوربين لعدد أكبر من الريشات ونسبة الصلابة عند سرعة الرياح المنخفضة.

لذلك عند سرعة رياح منخفضة يفضل أن يكون عدد ريش التوربين يتراوح من 5-6 ريش، ونسبة صلابة لا تقل 15% ، كأساس لتحقيق أفضل أداء في استخلاص الطاقة وتحقيق أفضل عملية إقلاع ذاتي.

المراجع:

- [1] Bermudez, L., Velazquez, A., Matesanz, A.; "Viscous-inviscid method for the simulation of turbulent unsteady wind turbine airfoil flow," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 90 (2002) pp. 643-661.
- [2] Tangler, J. L.; "The Nebulous Art of using 2D wind tunnel results for 3D performance prediction" NREL/CP500-31243, Jan 2002.
- [3] Huyer, S.A., Simms, D.; "Unsteady aerodynamics associated with a horizontal-axis wind turbine," AIAA Journal, Vol. 34, No.7, July 1996, pp. 1410-1419.
- [4] Fuglsang, P., and Madsen, H.A.; "Optimization Method for Wind Turbine Rotors," Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics Vol. 80 (1999) pp. 191-206.
- [5] Benini, E., Toffolo, A.; "Optimal Design of Horizontal-Axis Wind Turbines Using Blade-Element Theory and Evolutionary Computation," Journal of Solar Energy Engineering, Vol. 124, Nov 2002, pp. 357-363.
- [6] Mark C. R.; Studying the Effect of Blade Pitch on Small Multi- Bladed Horizontal-Axis Wind Turbines. Master's Thesis, April 2004, Clarkson University
- [7] Jessica Swanson, and Kenneth Visser; "Improving the Efficiency of Small Wind Turbines by Optimizing Blade Number and Solidity" Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, Master's Thesis, 2006. University of Tennessee at Knoxville.
- [8] Ebert, P. R. and Wood, D. H.; Observations of the starting behavior of a small horizontal-axis wind turbine. Renewable Energy Vol. 12 pp. 245-257.(1997).
- [9] Mayer C. and Bechly M. E. Hampsey M. and Wood D. H.; The starting behavior of a small horizontal-axis wind turbine. Renewable Energy Vol. 22 pp. 411- 417. 2001.
- [10] N.S. Cetin1, M.A. Yurdusev, and A. Özdemir; "Assessment of optimum tip speed ratio of wind turbines", Mathematical and Computational Applications, Vol. 10, No. 1, pp. 147-154, 2005.