

تأثير تصميم ريشة توربين ريحي صغير في استخلاص طاقة الرياح

الدكتور فريد أبو حامد*

(تاريخ الإيداع 27 / 2 / 2012. قُبل للنشر في 8 / 5 / 2012)

□ ملخص □

يعد تصميم ريشة التوربين العنصر الأهم في تحديد الأداء الأمثل للمولد الريحي، وقد بينت الدراسات أن معظم الطاقة المستخلصة من التوربين التي تبلغ 75% تقع عند النصف القريب من طرف الريشة، لذا يجب الاهتمام كثيراً في اختيار السطوح الانسيابية لهذا الجزء من الريشة [2]، وأن يراعى في التصميم توظيف العناصر القريبة من الطرف لتوليد الطاقة، والجزء القريب من محور الدوران لغرض زيادة عزم الإقلاع [6].

وقد بين البحث في أثناء إجراء عملية تعديل شكل الريشة لغرض تسهيل عملية التصنيع، إن التغيير البسيط في توزيع طول وتر عناصر الريشة يؤدي إلى انخفاض قليل في معامل الأداء، ولكن أي تغيير في توزيع زاوية ميل عناصر الريشة سيؤدي إلى انخفاض شديد في قيم معامل الأداء، ومن ذلك يتضح أهمية دقة التصنيع في تحسين كفاءة التوربين وتحديد الأداء الأمثل.

الكلمات المفتاحية: تصميم الريشة - توربين ريحي - كفاءة التوربين - السطوح الانسيابية.

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

Effect of Design Small Wind Turbine Blade on the Wind Power Extraction

Dr. Farid Abou hamed*

(Received 27 / 2 / 2011. Accepted 8 / 5 / 2012)

□ ABSTRACT □

Blade design is the most important element in specifying the optimal performance of the wind turbine. Studies have shown that most of the energy from the turbine, which is 75% lies at the half part close to the blade edge. Therefore, more attention must be paid when selecting the flow surfaces of this part of blade [2]. When designing, care must be taken that elements close to the edge and the part close to rotation axis should be utilized for the purpose of power generation and the increase of starting torque respectively [6].

The study has shown that when amending the shape of the blade for the purpose of facilitating the process of manufacturing a simple change in length distribution of the blade chord leads to a slight decrease in the coefficient of performance, but any change in the inclination of blade components will result in sharp decrease in the value of the coefficient of performance. This clarifies the importance of accurate manufacturing to improve the turbine efficiency and specify the optimal performance.

Key words: Blade design , wind turbine ,efficiency turbine, airfoil.

* Mechanical Engineering Department – Faculty of Mech.& Elect. Eng. Damascus University- Syria.

مقدمة:

إن ريشة التوربين تتكون من مجموعة كبيرة من العناصر التي يمكن تمثيلها بالأسطح الانسيابية، فهي تعمل على استخلاص الطاقة الديناميكية للرياح وتحويلها إلى طاقة ميكانيكية مفيدة بشكل مثالي حسب شكلها وموقعها في الريشة. لذلك تم دراسة نظرية السطوح الانسيابية بشكل دقيق وتطبيق معايير اختيار الشكل المناسب الذي يلائم شروط أداء دوار (SHAWT)، وتطلب ذلك بحثاً واسعاً عن مصادر السطوح الانسيابية وبيانات الخصائص الأيروديناميكية لها، في مكتبات بعض الجامعات المختصة والنشرات والبرامج الخاصة بالسطوح الانسيابية.

بعد تغطية المعلومات الخاصة بتصميم الريشة، فقد تم بناء نموذج رياضي خاص بتصميم الريشة، والمتمثل بتوزيع زاوية الفتل وطول الوتر على امتداد الريشة، وبعدها توضيح الخطوات الأساس لعملية التصميم بشكل مفصل، وأخيراً تم إجراء عملية تصميم مثالية لعشرة أنواع من الريش لقيم مختلفة من معامل نسبة الطرف (λ) ومقارنة خصائص النماذج المصممة لاختيار التصميم المناسب منها لاعتبارات متعددة، والتصميم المقترح كان ضمن قياسات مناسبة من ناحية الحجم تمكنا من التعامل مع المنظومة لإجراء التجارب عليها، وبعد اختيار التصميم المناسب تم اقتراح إجراء عمليات تعديل في شكل الريشة لغرض تسهيل عملية التصنيع والتعديل المقترح أخضع لعملية تقييم وبيان تأثير التعديل في الأداء قبل اعتماده.

طرائق البحث ومواده

اعتمد هذا البحث على تصميم توربين ريحي صغير بكفاءة عالية لمتوسط سرعة الرياح قدرها $\bar{U} = 5m/s$ ويتمتع بالخواص التصميمية الآتية : [8,7,4].

1. قطر دوار التوربين $D=2.8 m$
 2. سرعة الرياح التصميمية $U_{me}=8 m/s$
 3. نسبة سرعة الطرف التصميمية $\lambda_d = 6$
 4. عدد أنصال الدوار $N=3$
 5. طول وتر جذر الريشة $C_r = 0.3 m$
 6. طول وتر طرف الريشة $C_t = 0.065 m$
 7. متوسط عدد رينولدز عند مقاطع الريشة $Re=270,000$
 8. سطح الانسياب المختار لمقطع جذر هو من نوع Eppler تؤخذ خصائصه عند $Re=270,000$.
 9. سطح الانسياب المختار لمقطع الطرف هو من نوع Goe360 تؤخذ خصائصه عند $Re=270,000$.
- كما تم إجراء الحسابات التصميمية (The design calculations) [8,5,3] وفق الخطوات الآتية :
1. حساب سرعة دوران التوربين.
 2. تقسيم الريشة إلى 10 عناصر مقطع الجذر يحمل الرقم 1 وطرف الريشة الرقم 10.
 3. حساب قيم المسافة من المحور إلى موقع العنصر على امتداد الريشة r_i .
 4. حساب قيم نسبة سرعة الموقع لعناصر الريشة $\lambda_{r,i}$.
 5. تحديد قيم $\phi_{r,opt}$ لجميع عناصر الريشة.
 6. تثبيت قيم $\alpha_{i,design}$ و $C_{L,design}$ و C_d وإدخال التعديل على C_L .

7. حساب قيم زاوية الميل لجميع عناصر الريشة θ_i .
 8. حساب معامل الخسارة، مع ملاحظة العنصر الأخير يحسب لـ $r=0.95R$.
 9. حساب طول وتر عناصر الريشة.
 10. حساب معامل القدرة لعناصر الريشة لتخمين كفاءة التصميم نظرياً.
 11. جمع إسهامات معامل قدرة عناصر الريشة واستخراج قيمة (C_p) .
- وقد تم إجراء هذه الدراسات والاختبارات في كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة دمشق.

أهمية البحث وأهدافه

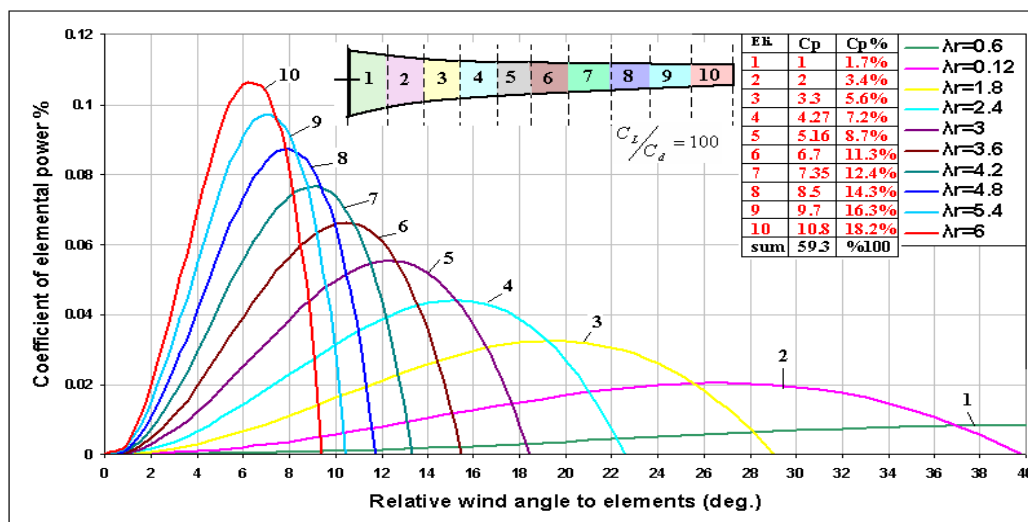
إنّ عملية تصميم الريشة المثالي لدوار توربين الرياح تعني إدخال جميع البارامترات المؤثرة في الأداء في عملية التصميم. وتصميم الريشة المثالي يعني توزيع طول وتر السطوح الانسيابية وزوايا الفتل على امتداد طول الريشة بشكل يلائم قيمة نسبة سرعة الطرف التصميمية، التي تحقق من خلال الدوار أعظم قيم معامل طاقة ممكنة للتوربين. لذلك يجب أن نحدد أولاً علاقة معامل طاقة الدوار بـ (λ) لكي تحسب قيمة (λ_d) التي عندها يحقق الدوار أعظم معامل طاقة، وعندها ستنسب جميع بارامترات تصميم الريشة إلى (λ_d) .

كما يبدو من المعادلة (1)، إن معامل الطاقة (C_p) يعتمد على قيمة الزاوية (ϕ) ، ونسبة السرعة المحلية (λ_r) ، ونسبة الانزلاق (C_d / C_L) ومعامل خسارة طرف الريشة (F) ، وللحصول على أعظم قيمة ممكنة لـ (C_p) حسب هذه المعادلة، يكون ذلك ممكناً فقط إذا كانت معامل الطاقة لجميع عناصر الريشة بقيمتها العظمى. وبكلام آخر، قيمة التكامل في المعادلة يجب أن تكون الأكبر في جميع عناصر الريشة، لكي نحصل على أعظم مجموع لمعامل الطاقة.

بعد اختيار نوع السطح الانسيابي، فإن قيم نسبة الانزلاق (γ) الموجودة في المعادلة ستكون معروفة ونختار قيمة معامل الرفع (C_L) وقيمة زاوية الهجوم المثالية (α_d) المرافقة لها. والمتغيرات الباقية في تعبير المعادلة وهي الزاوية (ϕ) والنسبة (λ_r) ، معامل خسارة الطرف (F) يعتمد أيضاً على هذين المتغيرين بعد تحديد عدد ريشات التوربين.

$$C_p = \frac{8}{\lambda^2} \int_{\lambda_h}^{\lambda} F \cdot \sin^2 \phi (\cos \phi - \lambda_r \sin \phi) (\sin \phi + \lambda_r \cos \phi) \left[1 - \left(\frac{C_d}{C_L} \right) \cot \phi \right] \lambda_r^2 d\lambda_r \quad (1)$$

تم حل هذه المعادلة ببرنامج $(Excel)$ لقيم 0.014 ، 0.025 ، 0.01 و $\lambda = 6$ ، والنتيجة المتمثلة بعلاقة (C_p) لعناصر الريشة بدلالة الزاوية (ϕ) ولقيم مختلفة من (λ_r) موضحة في الشكل (1).



الشكل (1) علاقة معامل قدرة العنصر إلى الزاوية (ϕ) لقيم مختلفة (λ_r).

مجموعة النتائج في الشكل (1) تعطينا صورة واضحة للعلاقة الفريدة بين معامل طاقة عنصر الريشة مع الزاوية (ϕ)، ونسبة السرعة المحلية (λ_r).

يوضح الشكل أن إسهام عنصر الطرف الرقم (10) هو بحدود 18% من قيم معامل الطاقة الكلية للريشة، بينما إسهام عنصر الجذر الرقم (1) هو بحدود 1.7%، وهذا يعني أن معظم الطاقة المنتجة في التوربين حوالي 75% تقع عند النصف القريب من الطرف، ولذلك يجب الاهتمام كثيراً في اختيار السطوح الانسيابية لهذا الجزء من الريشة، وكذلك يمكن توظيف العناصر القريبة من محور الدوران لغرض زيادة عزم الإقلاع [6].

كذلك من الشكل (1) تمكنا من تحديد قيم أعظم معامل استطاعة لعناصر الريشة وما يرافقها من قيم أفضل

زاوية نسبية للرياح (ϕ_{opt}) ولمختلف نسبة السرعة المحلية (λ_r).

النتائج والمناقشة

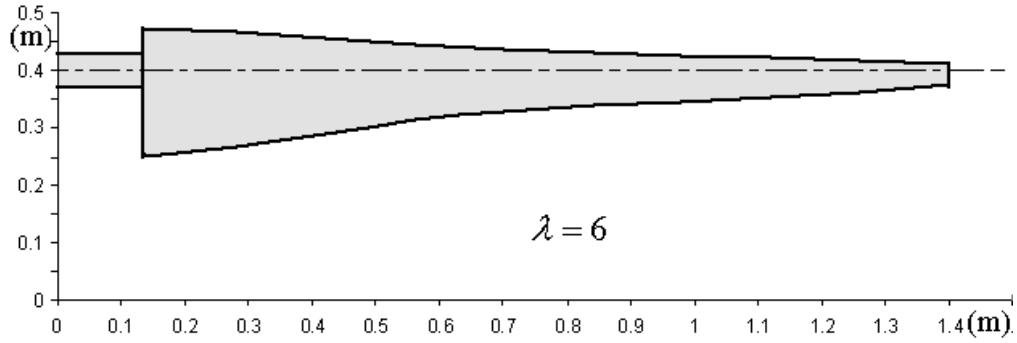
أهم مشكلة يمكن أن تواجه المصمم هي عدم إلمامه بتأثير جميع البارامترات في الأداء إذ يؤدي ذلك إلى اتخاذ قرارات تصميمية غير صحيحة، مما يستوجب بذل جهد أكبر في تحليل النتائج والمعطيات للوصول إلى التصميم الناجح [3,1].

تم استخدام برنامج (Excel) في تصميم الريشات، كما تم الحصول على مجموعة من المعطيات التجريبية تم تضمينها ضمن جداول وأشكال بيانية تبين التصميم الأمثل للريشة لقيم مختلفة من λ وسرعة الدوران وتحديد قيمة معامل القدرة لعناصر الريشة (Cp) في كل حالة واختصاراً للجداول والأشكال نبين بعض هذه النتائج كما هو مبين بالجدول (1) والشكل (2) لحالة $\lambda = 6$ وسرعة الدوران 330 rpm .

جدول (1) تصميم الريشة لحالة ($\lambda = 6$) وسرعة الدوران 330rpm.

C_{p_i} %	Elem	r_i m	λ_r	$\phi_{r,opt}$	$\alpha_{i,design}$	θ_i	$C_{L,design}$	F_i	C_i/R
0.8212	1	0.14	0.6	39.36	6	33.36	1.2	1	0.2212
2.0424	2	0.28	1.2	26.53	6	20.53	1.2	0.99999	0.2
3.233	3	0.42	1.8	19.37	6	13.37	1.2	0.99998	0.1662
4.385	4	0.56	2.4	15.08	6	9.08	1.2	0.99988	0.1293
5.49	5	0.7	3	12.29	6	6.29	1.2	0.999444	0.1075
6.5562	6	0.84	3.6	10.35	6	4.35	1.25	0.9976	0.0914
7.5436	7	0.98	4.2	8.928	6	2.928	1.25	0.9899	0.0820
8.2966	8	1.12	4.8	7.845	6	1.845	1.25	0.96	0.0702
8.0476	9	1.26	5.4	6.994	6	0.994	1.25	0.835	0.0546
7.1	10	1.4	6	6.308	6	0.308	1.25	0.67	0.0396

$$C_p = 53.5\%$$

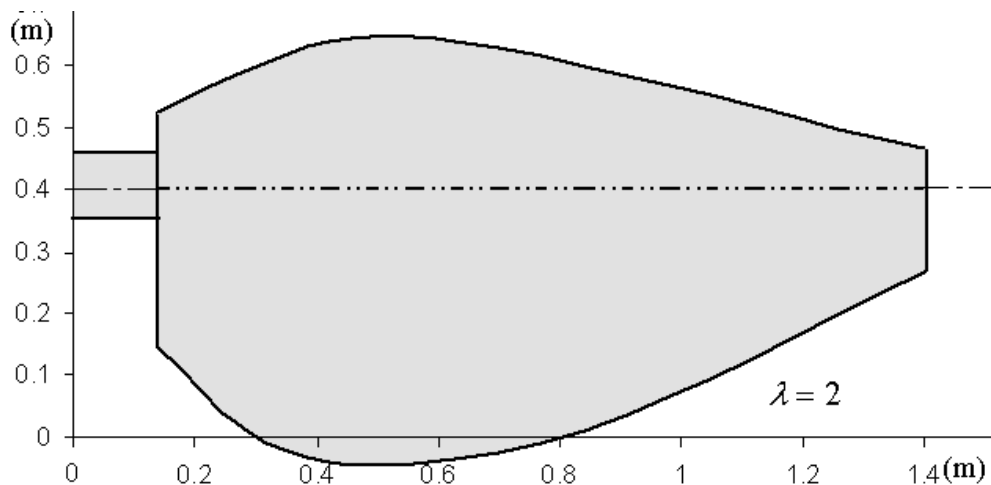
الشكل (2) الشكل الأمثل للريشة لحالة $\lambda = 6$

وكذلك بدلالة معطيات الجدول (2) والشكل (3) لحالة $\lambda = 2$ وسرعة الدوران 110 rpm

جدول (2) تصميم الريشة لحالة ($\lambda = 2$) وسرعة الدوران 110rpm.

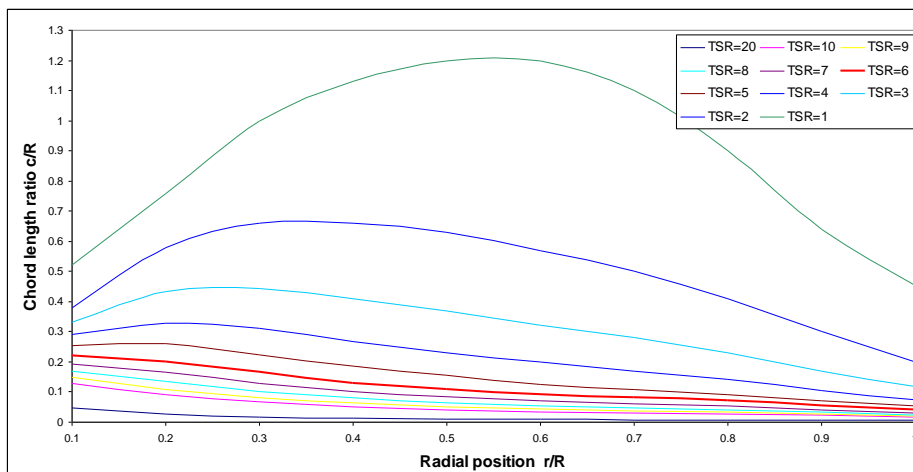
C_{p_i} %	Elem.	r_i m	λ_r	$\phi_{r,opt}$	$\alpha_{i,design}$	θ_i	$C_{L,design}$	F_i	C_i/R
0.41	1	0.14	0.2	52.5	6	46.5	1.2	1	0.38
1.33	2	0.28	0.4	45.5	6	39.5	1.2	0.9999	0.58
2.46	3	0.42	0.6	39.4	6	33.4	1.2	0.997	0.66
3.63	4	0.56	0.8	34.2	6	28.2	1.2	0.988	0.66
4.75	5	0.7	1	30	6	24	1.2	0.97	0.6
5.7	6	0.84	1.2	26.5	6	20.5	1.25	0.93	0.57
6.39	7	0.98	1.4	23.7	6	17.7	1.25	0.87	0.5
6.57	8	1.12	1.6	21.3	6	15.3	1.25	0.77	0.41
5.73	9	1.26	1.8	19.4	6	13.4	1.25	0.59	0.3
4.78	10	1.4	2	17.7	6	11.7	1.25	0.44	0.2

$$C_p = 41.75$$

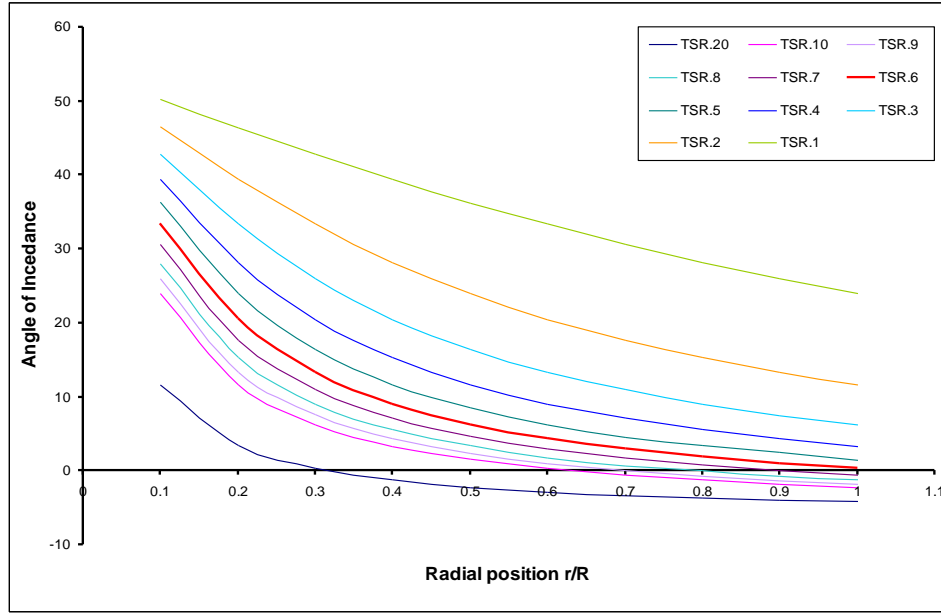


الشكل (3) الشكل الأمثل للريشة لحالة $\lambda = 2$

يوضح الشكل (4) توزيع طول وتر مقاطع الريشة حسب بعدها عن محور الدوران، دون أبعاد نسبة إلى طول نصف القطر.

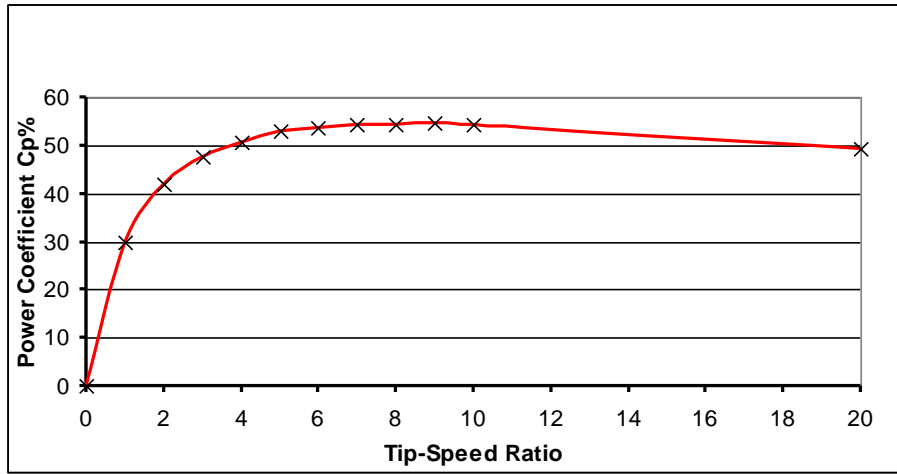


الشكل (4) توزيع طول وتر السطح الانسيابي على امتداد طول الريشة لقيم مختلفة من λ .
كذلك توزيع زاوية الفتل على امتداد طول الريشة لقيم مختلفة من (λ) . موضحة بالشكل (5).



الشكل (5) توزيع زاوية فتل الريشة المصممة.

وأخيراً حساب قيم معامل الطاقة المتوقعة لقيم مختلفة من نسبة سرعة الطرف (λ) موضحة بالشكل (6)، من هذا الشكل يمكن ملاحظة أن نسبة سرعة الطرف تحقق أعلى أداء ضمن مدى يتراوح من 6 إلى 9.



الشكل (6) علاقة معامل الطاقة مع نسبة سرعة الطرف.

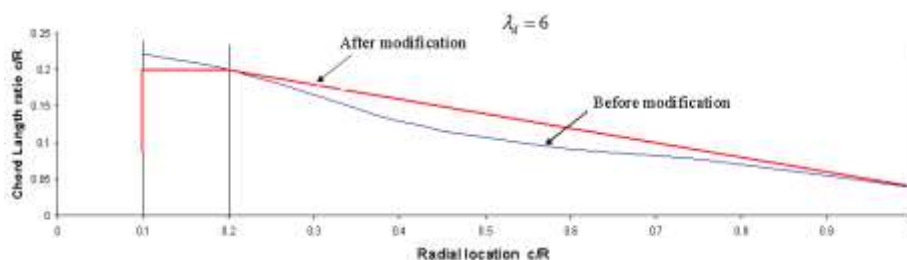
1- تعديل الشكل الهندسي للريشة Modification of Blade Geometry

يعد شكل الريشة الذي تم تصميمه سابقاً هو الأمثل في استخلاص طاقة الرياح، ولكن هنالك اعتبارات أخرى يجب أن تؤخذ بالحسبان، ومنها: أثناء التحميل العالي للريشة المصممة ويسبب حدوث بعض التشوهات المرنة عالية فإن أداء الدوار عموماً سينخفض. وأكثر من ذلك عندما تعمل الريشة المصممة عند نسب سرعة طرف مختلفة عن تلك التي اعتمدت في التصميم، فإنها لن تعمل بشكل مثالي لمعظم الوقت. وكذلك فإن شكل الريشة المتمثل بتوزيع طول الوتر وزاوية الفتل على امتداد الريشة يكون معقداً يصعب تصنيعه بالإمكانات المتوافرة، وإذا أمكن أن نجعل علاقة طول الوتر وزاوية الفتل ذات علاقة خطية على امتداد الريشة يكون أفضل لأغراض إدخال عوامل المتانة ولتسهيل

عملية التصنيع وخفض كلفة الإنتاج، بشرط أن نحافظ على معامل الطاقة قريباً من الحالة المثالية التي اكتسبتها الريشة المصممة [7,1].

2- تعديل توزيع طول الوتر Modification of Chord-length Distribution

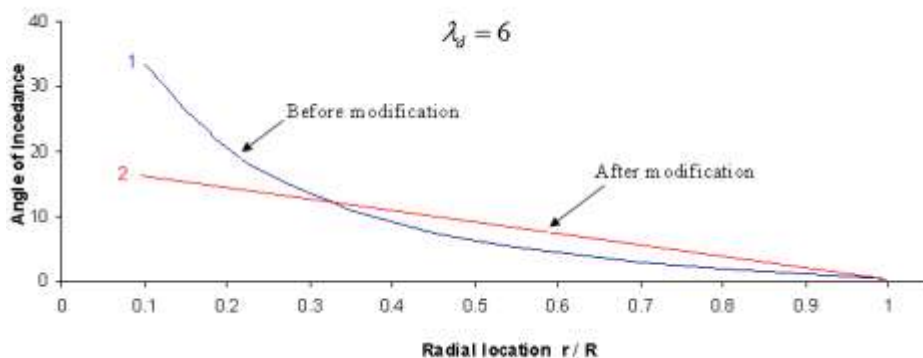
إن علاقة طول وتر الشكل الانسيابي على امتداد الريشة ليست بعلاقة خطية، بالقرب من طرف الريشة لا يتغير طول الوتر كثيراً باتجاه الجذر ولكن بالقرب من الجذر فإن طول وتر الريشة يزداد بسرعة كما هو موضح بالشكل (7). وإذا أمكن تعديل شكل الريشة المصممة، ليصبح مسلوباً خطياً. مع المحافظة على بقاء مساحة الريشة ثابتة. كذلك يجدر أن نتذكر بأن معظم الطاقة المتولدة تكون بأجزاء الريشة الواقعة بين $r/R=0.5$ إلى $r/R=0.9$. وأن الطاقة التي تولدها عناصر الجذر قليلة جداً ولا تزيد عن 4% من الطاقة الكلية، وتقتصر أهميتها على توليد عزم الإقلاع. وعند العودة إلى معادلة الطاقة (1)، لا نجد ذكراً لطول وتر عناصر الريشة فيها، بل تتأثر بمعامل الانزلاق (D/L) الذي يدخل تأثير طول الوتر فيه بنسبة (AR)، لذلك يكون التأثير المباشر قليلاً. كذلك يؤثر طول الوتر على معامل (Re)، بشكل كبير، لهذا السبب يمكن أن نجري بعض التعديلات البسيطة، ونجعل الريشة مستقيمة من الطرف عند ($r=R$) لغاية الجزء ($r=0.25R$) أن يبقى طول الوتر ثابتاً من ($r=0.25R$) لغاية ($r=0.13R$) من خلال هذا التعديل فإن شكل الريشة يبدو اختياره جيداً. الشكل (7) يوضح شكل الريشة قبل التعديل وبعده، لحالة ($\lambda = 6$).



الشكل (7) مخطط يوضح توزيع طول الوتر قبل التعديل وبعده

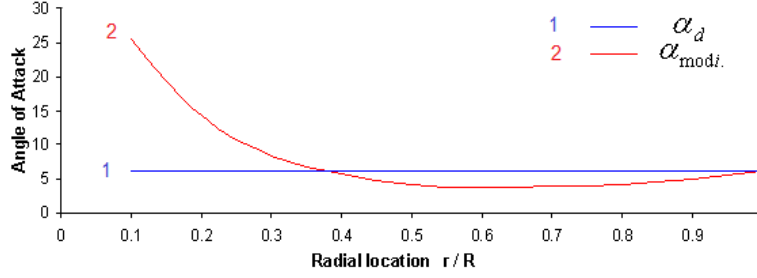
3- تعديل توزيع زاوية الفتل Modification of Twist distribution

عند تحليل توزيع زاوية الفتل لشكل الريشة المصممة، ومن الشكل (9) يمكن ملاحظة أن الريشة المصممة تنتقل بقوة عند الجذر كما يحدث لطول الوتر. ولهذا السبب يستحسن تعديل توزيع زاوية فتل الريشة لاعتبارات صناعية، لتكون علاقة توزيع زاوية الفتل على امتداد طول الريشة خطية كما هو موضح بالخط الأحمر (2) في الشكل (8).



الشكل (8) اقتراح تعديل توزيع زاوية الفتل على امتداد طول الريشة.

توزيع زاوية فتل الريشة المعدلة الذي يحافظ على أقل تغير في زاوية الهجوم على امتداد الريشة وخصوصاً عند الجزء الفعال من الريشة. إن هذا التعديل سيؤدي إلى تغير في زاوية الهجوم التصميمية كما موضح بالمنحني ذي اللون الأحمر (2) في الشكل (9).

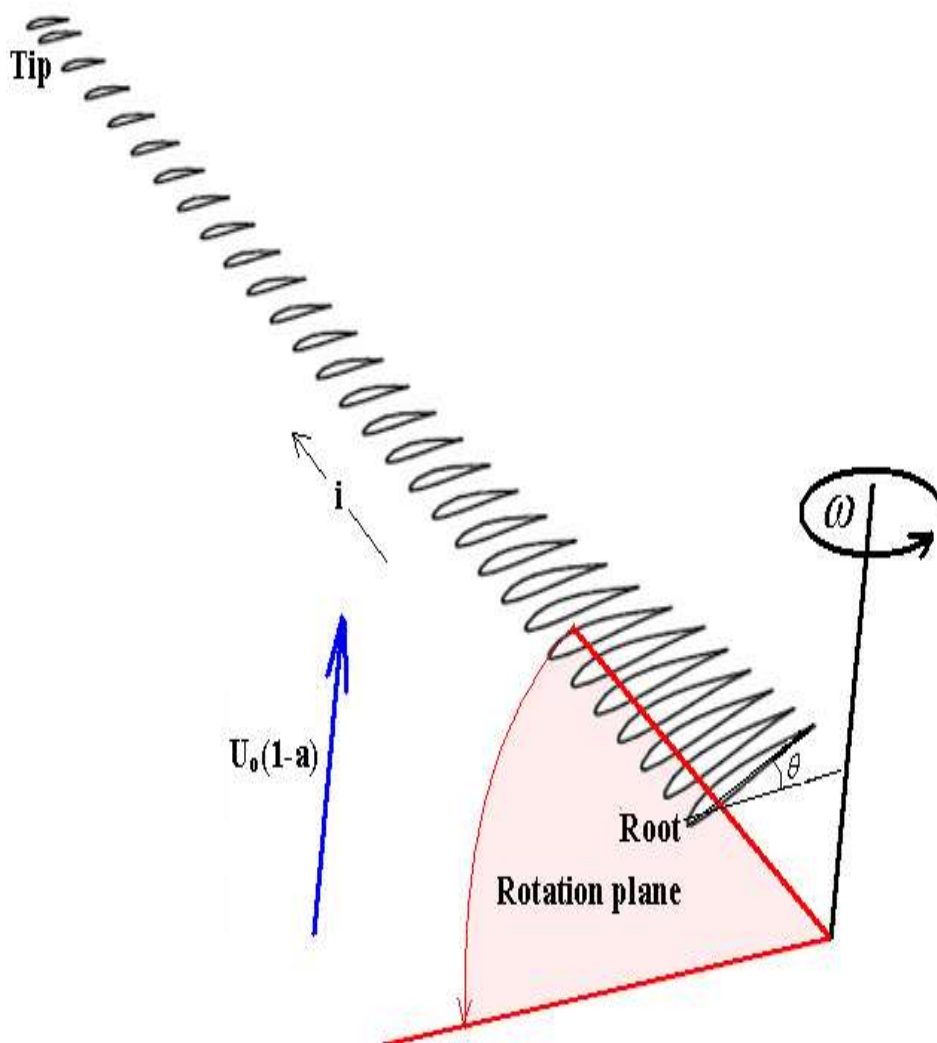


الشكل (9) حالة تعديل زاوية الفتل تبين توزيع زاوية الهجوم على امتداد الريشة.

بسبب تعديل زوايا فتل الريشة فإن أجزاءً كبيرة من جذر الريشة ستعمل عند زاوية هجوم كبيرة، وذلك سيؤدي إلى فشل في أداء جذر الريشة، وبخاصة في عملية الإقلاع، وكذلك يوضح المنحني الأحمر (2) انخفاض زاوية الهجوم عن القيمة التصميمية من درجة إلى درجتين عند الجزء الفعال لإنتاج الطاقة، وذلك لانخفاض قيم (C_L) وارتفاع قيم (γ) مما يؤثر في أداء دوار التوربين.

لذلك فإن عملية تعديل شكل الريشة المصممة يمكن تقسيمها إلى جزأين:

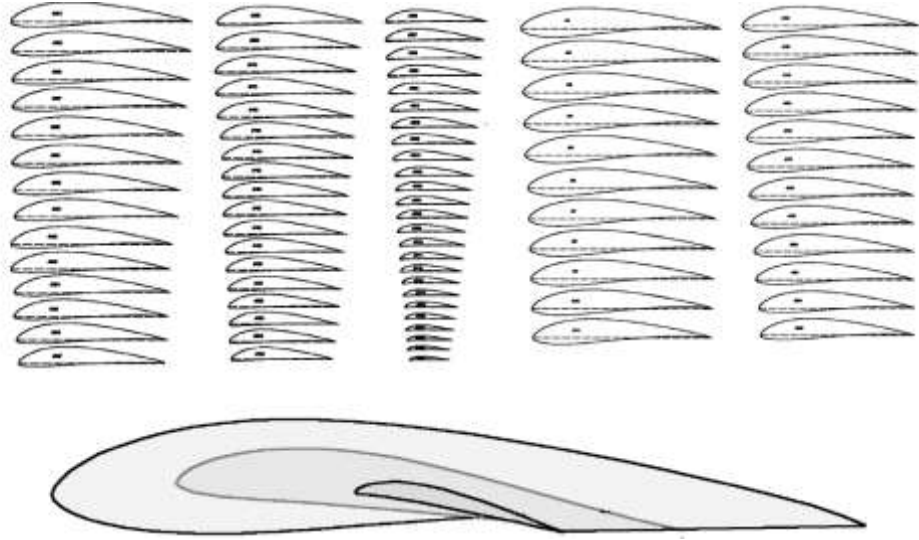
1. إمكانية إجراء عملية تعديل طول الوتر على امتداد الريشة، كما هو موضح بالشكل (7) وخصوصاً لقيم (λ) المرتفعة حيث تقترب العلاقة التصميمية من الخط المستقيم، إن حساب معامل طاقة دوار ثلاثي الريشات معدلة يؤدي إلى انخفاض معامل الطاقة بنسبة 2% فقط وهي قيمة مقبولة.
 2. لا يفضل إجراء عملية تعديل على توزيع زاوية فتل الريشة، لأنها ستؤثر في قابلية الدوار للإقلاع وخصوصاً عند سرعة الرياح المنخفضة، وهي من أهم شروط الأداء الأمثل في عمل توربين الهواء عند السرعة المنخفضة. وكذلك قد يؤدي تعديل توزيع زاوية الميل إلى انخفاض معامل القدرة بنسبة مقدرها 12%، وهي نسبة لا يمكن قبولها، ولذلك لا يفضل إجراء عملية التعديل على توزيع زاوية فتل عناصر الريشة.
- يوضح الشكل (10) الشكل النهائي لتوزيع طول الوتر وزاوية الميل لعناصر الريشة.



الشكل (10) الشكل النهائي لتوزيع طول الوتر وزاوية ميل عناصر الريشة.

واستناداً لما سبق يمكن تقسيم تكنولوجيا إنتاج ريشة توربين الرياح إلى جزأين: أولاً- حسابات قوى الإجهاد الميكانيكي واختيار المواد المناسبة لبناء الريشة وتحديد سمك طبقة المواد المركبة لبناء الريشة. ثانياً- عملية إنتاج الريشة، (لا مجال في هذا البحث للتطرق إلى التفاصيل).

وبيّن الشكل (11) مجموع الأشكال الانسيابية المصنعة كما بيّن الشكل (12) عناصر الريشة المصنعة من ألواح الخشب المضغوط.



الشكل (11) : مجموع الأشكال الانسيابية المصنعة لريشة التوربين الريحي



الشكل (12): عناصر الريشة المصنعة من ألواح الخشب المضغوط (MDF) بسماكة 1.4 سم

الاستنتاجات والتوصيات

1. مولدات الطاقة الريحية الصغيرة هي منظومات عملية قابلة للتطبيق على المستوى الشخصي وتعد كمنظومة اقتصادية يمكن أن تساعد في تقليل الاعتماد الكامل على طاقة الشبكة الوطنية في استهلاك الطاقة الكهربائية. وقد أثبتت الدراسة العملية أن بناء هذه المنظومة وفق أسس علمية هو عمل يمكن انجازه، وهو غير مكلف ومثمر مقارنة مع المصادر الأخرى للطاقت المتجددة، وإن عدم استثمارها في مناطق تتوفر فيها طاقة مقبولة للرياح هي خسارة لا تعوض.
2. بينت الدراسة النظرية أن معظم الطاقة المستخلصة في التوربين وبحدود 75% تقع عند النصف القريب من طرف الريش، ولذلك يجب الاهتمام كثيراً في اختيار السطوح الانسيابية لهذا الجزء من الريشة، وكذلك يمكن

- توظيف العناصر القريبة من الطرف لتوليد الطاقة والجزء القريب من محور الدوران لغرض زيادة عزم الإقلاع. ويتم ذلك بالحفاظ على رشاقة معظم أجزاء الريشة، وتكون الزيادة في طول الوتر وزاوية الميل لجزء بسيط من الريشة بالقرب من الجذر، وبزيادة قليلة في العزم الناتج من جذر الريشة يمكن زيادة عزم إقلاع التوربين. بالإضافة إلى زيادة طول وتر جذر الريشة يمكن زيادة عدد ريشات التوربين كأحد الحلول الإستراتيجية لزيادة العزم الأيروديناميكي للإقلاع.
3. يعدُّ اختبار السطوح الانسيابية في بناء الريشة هو المفتاح الذي يحدد أداء التوربين. وإن العامل الأكثر أهمية في تحديد المواصفات الأيروديناميكية لسطوح الانسياب الداخلة في بناء عناصر الريشة هو نسبة (C_L / C_d) ضمن مدى معين من زاوية الهجوم يتراوح من $(3^\circ - 12^\circ)$ ، ويكون ذلك لقيم محددة من عدد رينولدز (Re) يحددها حجم التوربين ونسبة سرعة الطرف التصميمية (λ_d) لعناصر الريشة، وهذا الشرط يجب أن يتحقق مع شرط $(C_L > 1)$ ، وبذلك سنضمن أهم شرط لتحقيق أفضل أداء لدوار توربين الرياح.
4. يعتمد أداء السطوح الانسيابية على قيم معامل رينولدز (Re) ، حيث تزداد قيم النسبة (C_L / C_d) مع زيادة عدد (Re) ، ولعدد (Re) علاقة مباشرة بحجم التوربين وسرعة الرياح، لذلك فإن التوربين الكبير يكون أكبر كفاءة من التوربين الصغير، وقد تصل قيم أداء التوربين الكبير لأكثر من 0.48، بينما لا يتعدى أداء التوربين الصغير عن 0.42، ولذلك تكون كلفة إنتاج وحدة الطاقة للتوربين الصغير كبيرة مقارنة بالتوربين الكبير.
5. أثناء دراسة السطوح الانسيابية المناسبة لسرعة الجريان المنخفضة تبين أن أفضل أداء يتحقق مع السطوح الانسيابية الرقيقة ذات الجريان الطبقي، ويحقق هذا النوع أفضل أداء إذا مر الوتر أسفل السطح السفلي للشكل الانسيابي، وبذلك سيولد هذا النوع قوى رفع مزدوجة على سطحه باتجاه واحد. وهذا النوع يكون مناسباً فقط للتوربين الصغير عند سرعة الرياح المنخفضة، ويمكن استعمال هذا النوع كذلك في صناعة الطائرات الصغيرة الموجهة لاسلكياً.
6. أثناء إجراء عملية تعديل شكل الريشة لغرض تسهيل عملية التصنيع، اتضح أن التغيير البسيط في توزيع طول وتر عناصر الريشة يؤدي إلى انخفاض قليل في معامل الأداء، ولكن أي تغيير في توزيع زاوية ميل عناصر الريشة سيؤدي إلى انهيار قيم معامل الأداء، ومن ذلك يتضح أهمية دقة التصنيع حيث أن أي خطأ في توزيع زاوية ميل الريشة أثناء مرحلة التصنيع سيؤدي إلى انخفاض شديد في معامل أداء التوربين.

قائمة الرموز والمصطلحات

A مساحة الدوار الموجهة للرياح m2.
Cd مُعامل الإعاقة.
CL مُعامل الرفع.
CP مُعامل الطاقة.
Cp مُعامل الضغط.
CT مُعامل قوة الدفع على الدوار.
F مُعامل خسارة الطرف.
mi نسبة تكرار سرعة الرياح.

عدد ريشات الدوار .	N
طول الريشة m.	R
المسافة من المحور إلى موقع العنصر على امتداد الريشة m.	r
سرعة الرياح التصميمية m/s.	U _{me}
متوسط سرعة الرياح m/s.	\bar{U}
سرعة هواء الجريان الخلفي m/s.	U _w
زاوية الهجوم deg.	α
زاوية الهجوم التصميمية deg.	α_d
معامل الانزلاق الأيروديناميكي.	γ
زاوية ميل الريشة (زاوية السقوط) deg.	θ
زاوية ميل عنصر الريشة deg.	θ_i
نسبة سرعة الطرف التصميمية.	λ_d
نسبة سرعة الطرف للموقع.	λ_r
معدل انحراف سرعة الرياح عن المتوسط m/s.	σ
زاوية الورود (زاوية الرياح النسبية) deg.	ϕ
زاوية الورود المثالية deg.	ϕ_{opt}
توربين رياح صغير ذو محور أفقي.	SHAWT

المراجع

1. David Molenaar; *Cost effective design and operation of variable speed wind turbines*. Copyright c_2003. February 2003.
2. E. Ferrer and X. Munduate; *Wind turbine blade tip comparison using CFD*: Journal of Physics: Spain, 2007.
3. Karin Ahlund; *Investigation of the NREL NASA/Ames Wind Turbine Aerodynamics Database*: Scientific report, June 2004.
4. Lakshmi N. Sankar; *Computational Studies of Horizontal Axis Wind Turbines*: Report Submitted to the National Renewable Energy Laboratory. Prepared by Georgia Institute of Technology, June 28, 2001.
5. 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, 2005, pp. 147-154.
6. Selig M. S.; *A 3-D Stall-Delay Model for Horizontal Axis Wind Turbine Performance Prediction*. Proc. 1998 ASME Wind Energy Symposium. 36th AIAA Aero., 1998.
7. Tony Burton; *Wind energy hand book* : John Wiley & Sons, LTD, 2001.
8. T. S. Bhatt; *The Evolution of Wind Power Technology—a Review*, IE(I) Journal—ID Vol. 84, May 2003.