الدراسة النظرية لأهم العوامل المؤثرة في أداء ريشة دوار توربين الرياح

د. حمزة مكارم [1]

الملخص

حتى وقتنا الحاضر تستخدم بروفيلات أجنحة حاملة لريش دوار توربين الرياح طوّرت للاستخدام في أجنحة الطائرات. وهذا يبّرر عند عد سرعة الجريان، في المنطقة القريبة والبعيدة عن الصرة التي تعد~ مهمة أيروديناميكيا، تقابل سرعة الطيران للطائرات. وذلك على الرغم من أن متطلبات الجناح الحامل للريشة ليست مطابقة تماماً لمتطلبات تصميم الطائرات.

تتكوّن ريشة توربين الرياح من مجموعة كبيرة من العناصر التي يمكن تمثيلها بالسطوح الانسيابية وطاقة دوار توربين الرياح القصوى المطلوبة يمكن تحقيقها من خلال الاختيار المناسب لشكل سطوح الانسياب لذلك عرضت العوامل المؤثّرة في الأداء الأيروديناميكي للسطح الانسيابي لريشة دوار توربين الرياح اذ انَّ أداء دوار توربين الرياح يعتمد اعتماداً مباشراً على الخواص الأيروديناميكية للسطوح الانسيابية المستخدمة في تصميم الريشة.

وتطلّب ذلك بحثاً واسعاً على مصادر السطوح الانسيابية وبيانات الخصائص الأيروديناميكية لها في مكتبات بعض الجامعات المختصة والنشرات والبرامج الخاصة بالسطوح الانسيابية.

وتنطلق مبررات هذا البحث من الاهتمام العالمي المتزايد بالمشكلات البيئية التي تعدّ الطاقات المتجددة أحد حلولها.

الكلمات المفتاحية: العنفة الريحية – الأداء الأيروديناميكي – ريشة دوار العنفة الريحية – السطح الانسيابي.

[1] كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية، جامعة دمشق.

THEORETICAL STUDY OF THE MOST IMPORTANT FACTORS AFFECTING THE PERFORMANCE OF WIND TURBINE ROTOR BLADES

Dr. Makarem,H[(1)]

ABSTRACT

To date, airfoils with wind turbine rotor blades have been developed for use in aircraft wings. This is justified when the flow velocity, in the near and far-off zone, which is an aerodynamically important matter, is considered to correspond to the flight velocity. Even though the requirements of blade airfoil are not exactly the same as the aircraft design requirements.

The wind turbine blade consists of a wide range of elements which can be represented airfoils. Rotor wind turbine maximum energy required can be achieved through appropriate choice of the form of airfoil which is used to extract dynamic energy of the wind and converted into useful mechanical energy by their shape and position in blade. The theoretical study airfoils accurately and the criteria for selecting the appropriate form in addition to the study of factors affecting the performance of aerodynamic airfoil on blade rotor wind turbine in order to produce wind turbine can extract the largest amount of wind power less total cost of the system (ideal wind turbine) where the performance of rotor wind turbine depends directly on the aero properties of the airfoils used in the design of the blade.

This required extensive research on the sources of airfoils data and aero characteristics in some universities, libraries competent bulletins and programs for airfoil.

Justifications of this research immenate from the growing global interest in environmental problems, which consider renewable energies as one of the solutions.

Kyewords: Wind turbine - Aerodynamic performance - Wind turbine rotor blade - Smooth surface.

[(1)]Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Damascus University.

المقدمة:

إنَّ الهدف من العنفات الريحية هو استخلاص أكبر قدر من القدرة المخزنة في الرياح، وكل مكوَّن من مكونات العنفة يجب أن يُصمم، بشكل أقرب ما يكون إلى الكمال لتحقيق هذا الهدف.

في المراجع الألمانية يُميَّز بين تصميمين: الأول يدعى تصميم الريشة الأمثلي حسب بيتز، وفيه لا يؤخذ تأثير دوران أثر المخر بالحسبان. أمّا التصميم الثاني فهو تصميم الريش المثالي حسب Schmitz، ويأخذ تأثير دوران أثر المخر بالحسبان.

يتأثّر التصميم الأمثل بنمط العمل، أي العمل عند سرعات دوران ثابتة أو متغيرة، وكذلك بتوزع الرياح في الموقع المقصود.

في الهندسة التطبيقية تستخدم حلول وسطية وتقريبية، ومع ذلك يجب معرفة التصميم الأمثل الذي يحقق أكبر قيمة للاستطاعة.

ونظراً الى أنَّ مقاطع الريشة بالقرب من الجذر تكون عادةً سميكة لغرض المتانة والارتباط بالسرة يمكن أن يخسر حافته الخلفية ليتلاءم مع مقاطع الاتصال التي قد تكون مربّعة أو مستديرة بشكلٍ عام، فإن ذلك يؤدي إلى زيادة قوة الإعاقة، ولكن لا بدّ منه لأغراض تصميمية.

أهمية الدراسة

كما نعلم تُعدّ تكنولوجيا توليد الكهرباء من الرياح من أسهل الوسائل الحديثة وأسرعها لتوليد الطاقة الكهربائية في العالم ونظراً الى كلفتها الزهيدة وقدرتها اللامحدودة على توليد فولتية تكفي لسدّ حاجات القرى والمدن الصغيرة كحل بديل للمصادر الأخرى.

وهنا يكمن دور هذا البحث في دراسة سبل الاستغلال الأمثل لطاقة الرياح من خلال إنتاج توربين رياح يمكنه استخلاص أكبر مقدار من طاقة الرياح بأقل كلفة إجمالية للمنظومة، وذلك من خلال دراسة العوامل المؤثرة في الأداء الأيروديناميكي للسطوح الانسيابية، وتحديد الأفضل لريشة دوار توربين الرياح.

هدف الدراسة:

1- دراسة أهم السمات التي تحدّد خواص السطوح الانسيابية بافتراض أنّ عنصر الريشة يُمثّل بسطح انسيابي.

2- أدَّى تنوع تطبيقات السطوح الانسيابية إلى تنوع أشكالها، وخواصها، وعدم تحديد الأفضل، لأنّ الأفضل يتغير من تطبيق الى آخر. وفي بحثنا هذا سوف تُحَدَّدُ السطوح المناسبة لعناصر تشكيل الريشة ابتداءً من الجذر حتى طرف الريشة، وأخذ المتطلبات الأيروديناميكية وشروط العمل ومتطلبات المتانة في الحسبان.

الأسلوب البحثي ومصادر البيانات

يتخذ البحث منهجاً متكاملاً من الجانب النظري والجانب التطبيقي:

الجانب النظري: يعتمد على الدراسة العلمية والنظرية المكتبية للكتب والمراجع في بعض الجامعات المختصة، والبرامج الخاصة بالسطوح الانسيابية، وذلك من خلال عرض التصنيف الهندسي للسطوح الانسيابية، والعوامل المؤثّرة في أداء سطوح الانسياب.

الجانب التطبيقي: تحديد مجموعة واسعة متميّزة لأكثر من 200 نموذج من السطوح الانسيابية الخاصة بطرف ريشة توربين الرياح وجذرها، ومنها ستحدّد المجموعة الفضلى التي تمتلك أعلى نسبة (C_L/C_d)، أي أعلى نسبة مُعامل رفع إلى مُعامل إعاقة ودراستها، ومناقشة نتائج هذه الدراسة.

اختيار بروفيل الجناح الحامل لريش الدولاب الدائر:

تتعلق فعالية الدولاب الدائر للعنفة الريحية لحالة الدوران بسرعات كبيرة تعلقاً كبيراً بالخواص الأيروديناميكية لبروفيل الجناح الحامل المستخدم.

والباراميتر الأهم المحدد لخواص بروفيل الجناح الحامل هي نسبة قوة الرفع إلى قوة المقاومة، كما هو متوقع، فإن انخفاض هذه النسبة يؤدي الى انخفاض معامل الاستطاعة .كما يؤدي الى انزياح النقطة الموافقة لقيمة معامل الاستطاعة الأمثلي باتجاه قيمة أخفض لمعامل سرعة الحافة التصميمي، كما يلاحظ أنّ زيادة القيمة لهذه النسبة يخفض من تأثير عدد الريش في قيمة معامل الاستطاعة المولدة، والعكس صحيح

تشير المراجع بشكل قاطع إلى أنّ العامل الأكثر أهمية في تحديد المواصفات الأيروديناميكية لسطوح الانسياب هو تحقيق أكبر نسبة قوى الرفع إلى قوى الإعاقة، أو معامل الرفع إلى الإعاقة (C_L/C_d) ضمن مدى معيّن من زاوية الهجوم .[3]، [5]

مع العلم أنَّ قوة الرفع المؤثرة في عنصر السطح الانسيابي والعمودية على اتجاه سرعة الجريان النسبية W هي:

$$\delta L = C_L.\frac{1}{2}.\rho.W^2.c.\delta r \dots (1)$$

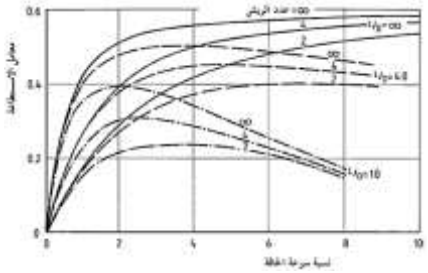
أما قوة المقاومة التي تؤثّر تأثيراً موازياً لـW فتعطى بالعلاقة:

$$\delta D = C_D.\frac{1}{2}.\rho.W^2.c.\delta r \dots (2)$$

اذ: c: طول وتر بروفيل السطح الانسيابي.

δr: طول جزء عنصر السطح الانسيابي عند نصف القطر r.

ويبيّن الشكل (1) تأثير هذه النسبة في مُعامل الاستطاعة للدولاب الدائر.



الشكل (1) تأثير نسبة قوة الرفع إلى المقاومة في المنحنى المميز للعنفة الريحية

إن الشكل الهندسي لسطح الانسياب هو المسؤول عن كيفية توزيع الضغط على سطحيه وإنَّ شكل توزيع الضغط له علاقة مباشرة بأداء سطوح الانسياب اذ انّ مُعامل الرفع هو محصلة توزيع الضغط على السطحين.

حتى الوقت الحاضر، كثير من مصممي ريشات الدوار يستعملون سطوح الانسياب المستعملة في أجنحة الطائرات، ومع أنّ المتطلبات الأيروديناميكية لسطح الانسياب ريشة الدوار تختلف عنها في تصميم جناح الطائرة، فقد طوِّرت في الوقت الحاضر في بعض المراكز البحثية نماذج كثيرة لسطوح الانسياب خاصة بتوربين الرياح. ويتضمن التصميم الناجح لسطح الانسياب أقل احتمال لحدوث ظاهرة الانفصال الطبقي، (أي ضمان بقاء الجريان حول السطح الانسيابي طبقياً متماسكاً متقارباً) على سطحه العلوي بشكل خاص.

وسيعتمد تصميم ريشة توربين الرياح على معرفة الخواص الأيروديناميكية للسطوح الانسيابية كخطوة مهمة في تحقيق الأداء الأفضل.[1]

يعتمد أداء سطوح الانسياب (الخصائص الأيروديناميكية) على عدة عوامل متداخلة، ومن أهمها:

أولاً: تأثير قيم رينولدز:

إنّ طبيعة نمط الجريان حول السطح الانسيابي محدد بقيم عدد Re اذ تؤثّر قيمه في سلوك معامل الرفع والإعاقة.

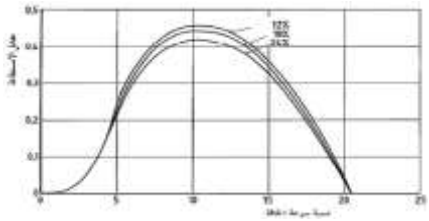
اذ انّه عند زوايا الهجوم الكبيرة سيزداد مُعامل الرفع ومُعامل الإعاقة وبعد تجاوز قيمة زاوية الهجوم الحرجة سيحدث الانفصال الطبقي اذ سينهار معامل الرفع ويزداد معامل الإعاقة بشدة، وزاوية الهجوم الحرجة هذه يعتمد مقدارها على قيمة عدد (Re). [6]

كما أنَّ هناك تأثيراً كبيراً لعدد (Re) في تحديد قيم زاوية الهجوم التصميمية لعنصر الريشة، مع العلم أنّ الحالة المثالية لزاوية الهجوم التي يتحقق عندها أكبر نسبة من (C_L/C_d) تقع قبل الزاوية الحرجة بقليل ،لأنّها ستحقق الشرط الثاني وهو $C_L > 1$.، لذلك يتطلب دراسة العوامل المؤثرة جميعها قبل تحديد زاوية الهجوم التصميمية لعناصر الريشة.[6]

ثانياً: تأثير السماكة:

لسماكة الريشات تأثير كبير في الأداء الأيروديناميكي لتوربين الرياح، اذ يزداد الأداء مع انخفاض السماكة، سماكة ريشة الدوار هو محل نزاع بين الكفاءة الأيروديناميكية ومتانة ريشات الدوار، لتحمّل إجهاد القوى الميكانيكية في أثناء عمل الدوار بمختلف ظروف التشغيل. يجاهد أصحاب الاختصاص في علم الآيروديناميك للوصول إلى أقل سماكة لريشات الدوار لتحقيق أكبر أداء ممكن لسطوح الانسياب خصوصاً عند قيم منخفضة لمعامل (Re) مع الأخذ بالحسبان متطلبات متانة الهيكل.

وفي الشكل (2) نوضّح تأثير نسبة الثخانة إلى طول الوتر بالنسبة الى الريشة على مُعامل الاستطاعة، اذ نلاحظ من الشكل أنَّ السماكة 12% تحقق أفضل ما يمكن من الناحية الأيروديناميكية[2]،[9]



الشكل (2) تأثير نسبة الثخانة إلى طول الوتر في معامل الاستطاعة

ثالثاً: تأثير شكل خط التحدّب:

إنّ نسبة انحراف خط التحدب عن خط الوتر له تأثير كبير في خواص سطح الانسياب المتمثلة بنسبة (C_L/C_d). وتبيّن الدراسة المرجعية أنّ قيمة النسبة (C_L/C_d) تنحرف إلى زاوية هجوم أقل مع زيادة قيمة التحدب. وكذلك يتبيّن أنّ النسبة (C_L/C_d) تزداد بدرجة كبيرة مع زيادة قيمة التحدب ولحدود معينة، وأنّ حالة انفصال الطبقة الحدية على السطح الانسيابي ذات الحدبة الكبرى تسبق الأنواع الأخرى ذات التحدب الأقل.

رابعاً: تأثير شكل السطح:

اتضح أنّه عند قيم (Re) المنخفضة كما هي الحال في التوربينات الصغيرة لسرعة الرياح المنخفضة، فإنَّ نسبة (C_L/C_d) تزداد مع انخفاض السماكة وزيادة الحدبة، ويُستنتج من هذه الدراسة أنّه عندما يمر الوتر أسفل السطح السفلي فإنّه يحقق الحالة المثالية في الأداء في حالة سرع الرياح المنخفضة، ولذلك يُفضّل استخدامه في توربينات الرياح الصغيرة للسرع المنخفضة، وكذلك يمكن استخدامه في الطائرات الشراعية الصغيرة الموجهة بالرادار.[2]

خامساً: تأثير خشونة السطح:

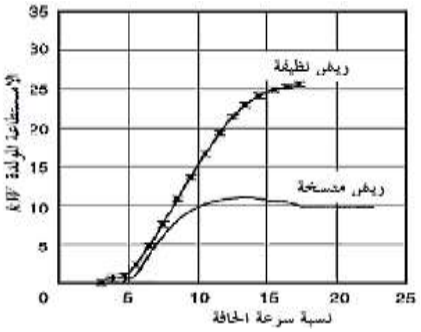
تعتمد حسابات الأداء الأيروديناميكي للسطوح الانسيابية على الخشونة القياسية التي تحدد بقيم معينة. عندما تكون درجة الخشونة كبيرة فإنّ أداء السطح الانسيابي سيقل عملياً، ونقطة انفصال الطبقة الحدية ستنحرف باتجاه زاوية الهجوم الأصغر، لذلك سيحدث

الانفصال عند سرعة رياح أقل قيمة، والنتيجة المباشرة لذلك هو انخفاض أداء الدوار ذي السطوح الخشنة.

فاختيار البروفيل المناسب يجب أن يتم بعد الأخذ بالحسبان نوعية إنهاء السطح التي يمكن الوصول اليها عند التصنيع، وكذلك التدرجات الناتجة عن تأثير البيئة خلال العمل. ومن ثمّ يجب الانتباه بشكلٍ كبير لكل من خشونة السطح، وكذلك دقة بروفيل الجناح الحامل من حيث تسامحات الشكل وتموجات السطح.

وتُعدّ البروفيلات الحاملة الصفائحية من أكثر البروفيلات حساسية لدرجة إنهاء السطح، إذ انّ أداءها عالي المستوى في حال السطح الأملس قد ينقلب إلى العكس تماماً في حال أن سطحها أصبح خشناً، والناتج مثلاً عن النخر الرملي الحاصل في أثناء العمل.

تتألف الأوساخ التي تتواجد على الريش بشكلٍ عام من الحشرات الميتة ومن جزيئات الغبار المتماسكة، وهذه الأوساخ توجد على ارتفاع 30-40 m بكميات قليلة جداً، وهذا ما يجعل العنفات الريحية الكبيرة التي يزيد ارتفاعها على الحد السابق لا تتأثّر بالأوساخ، بعكس تأثُّر العنفات الريحية الصغيرة.[1]



الشكل (3) تأثر منحنى الأداء لعنفة ريحية صغيرة بقطر 10 أمتار بالأوساخ

إنَّ المنحنيات المميزة لبروفيلات الأجنحة الحاملة مُعطاة لأجل ما يسمى الخشونة المعيارية. والصعوبة العملية تكمن بتحويل خشونات السطوح الحقيقية إلى خشونات معيارية، وهو ما يتطلب خبرة عملية. والجدير ذكره أيضاً أنّ الخشونة تؤثّر في زاوية انهيار قوة الرفع.

سادساً: تأثير زاوية الهجوم:

في حالات خاصة، وعند إقلاع توربين الرياح تقترب زاوية الهجوم لبعض عناصر طرف الريشة من 90 درجة، لذلك فإنّ تعرّف أداء السطح الانسيابي عند زاوية الهجوم الكبيرة يكون ضرورياً لتحليل سلوك إقلاع التوربين. اختبر الباحثان (Ostawari &Naik) سنة 1984 قيم معامل الرفع والإعاقة لمجموعة من السطوح الانسيابية نوع (NACA) لمدى واسع من قيم زاوية الهجوم تراوح من 5- درجة إلى 90 درجة لسطح الانسياب نوع (NACA4412). [7]

إنّ احدى النتائج المثيرة للاهتمام هو بقاء قيم C_L مرتفعة بعد حالة انفصال الطبقة الحدية عند $\alpha = 15$ درجة إلى حدود $\alpha = 60$ درجة وأكثر، وهذا يعني بقاء عمل السطح الانسيابي عند هذه الزاوية، ولكن مع معامل إعاقة مرتفع.

عند الزاوية $\alpha = 90$ درجة أي سطح انسيابي مهما كان شكله سيكون تقريباً كصفيحة ثنائية الأبعاد في مواجهة جريان بزاوية عمودية اذ يكون$C_L = 0$ و$C_d = 2$.

- **تحديد أفضل سطوح انسيابية**

هناك عدة مصادر أساسية يمكن أن نأخذ منها البروفيلات القياسية، ويمكننا الافادة من عدة برامج حاسوبية من أجل أن نحدد بدقة عنصري الجناح الحامل عند طرف ريشة العنقة الريحية وكذلك عند الجذر، ومن ثمّ تكمن مهمتنا في أن نحدد XXX من كلتا العائلتين التاليتين للطرف والجذر.

Tip Airfoil (NACA 63.XXX) Root Airfoil (FFA-W3-XXX)

من برنامج Design Foil R6.30 وهو برنامج يُعنى بتصميم البروفيلات، ويدرس كلّاً من عوامل الرفع والجر

والعزم، ومن ميزاته الرئيسة وجود موسوعة كبيرة لأشهر البروفيلات العالمية.[4]

الشكل (4) واجهة البرنامج الحاسوبي

اعتمد على البيانات الموجودة في مراجع السطوح الانسيابية الخاصة بتوربين الرياح عند قيم Re المنخفضة، ومكتبة السطوح الانسيابية لجامعة ألينوس الأمريكية.[10]

وبالاستعانة بملفات بعض البرامج التصميمية التي تحوي مقداراً كبيراً من بيانات السطوح الانسيابية، والتي تعدّ بمنزلة موسوعة كبيرة لأشهر البروفيلات العالمية، مثل:

(Design FOIL R6 DEMO, Profili-2.1, Profili-2.21, XFOIL, CompuFoil-3D)

فقد حدّدت مجموعة واسعة من نماذج السطوح الانسيابية الخاصة بطرف الريشة وجذرها وبقرابة 100 نموذج للطرف من عائلة البروفيلات نوع NACA 63 و100 نموذج للجذر من العائلة FFA-W3، وذلك لما تمتلكه من مواصفات مقاربة للفرضيات المقترحة.

ومن هذه المجموعة الواسعة حدّدت المجموعة الفضلى التي تمتلك أعلى نسبة C_L/C_D وقيماً مناسبة من معامل الرفع $CL>1$، وتتكوّن المجموعة من أفضل 5 نماذج تخص مقطع طرف الريشة كما هو موضح بالجدول (1)، وأفضل 5 نماذج تخص مقطع جذر الريشة، كما في الجدول (2).

وقد رتّبنا هذه البروفيلات حسب الجودة الآيروديناميكية لها إذ أن الجودة أو الكفاءة الآيروديناميكية (TheAerodynamic qualification) هو مقدار يدل على مدى جودة الجناح وكفاءته، ويعطى بالعلاقة: $\varepsilon = \frac{CL}{CD}$ أو K وكلما زادت (K) زادت جودة الجناح وفق الخطوات الآتية:

1- حساب $n/\sum CL$ و $n/\sum CD$ من معطيات البرنامج.

2- حساب K.

3- ترتيب البروفيلات حسب الجودة الآيروديناميكية وعندها سوف نستطيع إيجاد بروفيل الجناح الحامل الأجود آيروديناميكياً بالنسبة الى طرف الجناح، وكذلك بالنسبة الى جذر الجناح من بين النماذج المدروسة جميعها التي عددها 200 نموذج للطرف والجذر.

مع العلم أنّه تم الأخذ بالحسبان ما يأتي:

1- زاوية الهجوم الصفرية كمبدأ للقياس.

2- عدد Re سيكون ضمن المجال من 1×10^5 إلى 1×10^6 ليناسب إمكانية استخدام هذا البروفيل لريشة توربين الرياح عند السرعات الصغيرة والمتوسطة. [8]

3- سنفاضل النماذج المختارة لقيم CL/CD لمجال من زوايا الهجوم يراوح من (0 إلى+10) درجة.

الجدول (1) أفضل 5 نماذج تخص مقطع طرف الريشة

nr	Tip Airfoil Type	Max CL/CD	Ave CL/CD
1	NACA 63 - 215	80	61.84
2	NACA 63 - 218	82.0	63.55
3	NACA 63 - 221	86.1	64.82
4	NACA 63 - 415	67.9	30.72
5	NACA 63 - 418	70.5	44.62

نأخذ بروفيل الجناح الحامل موديل NACA 63 – 221، أي (العينة الثالثة) وهذه العينة تُمثِّل بروفيل الجناح الحامل لطرف ريشة العنفة الريحية المدروسة ذا الجودة الآيروديناميكية العليا.

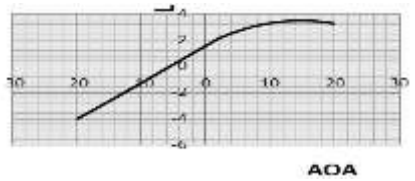
الجدول (2) أفضل 5 نماذج تخص مقطع جذر الريشة

nr	Tip Airfoil Type	Max CL/CD	Ave CL/CD
1	FFA-W3 – 222	73	55.5
2	FFA-W3 – 465	75.2	53.6
3	FFA-W3 – 425	78.3	54.4
4	FFA-W3 – 191	77.1	41.2
5	FFA-W3 - 241	81.0	62.3

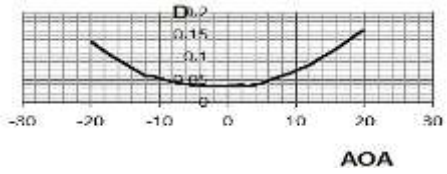
نأخذ بروفيل الجناح الحامل موديل FFA-W3-241، أي (العينة الخامسة) وهذه العينة تُمثِّل بروفيل الجناح الحامل لجذر ريشة العنفة الريحية ذا الجودة الآيروديناميكية العليا.

- **التجربة الحاسوبية:**

الهدف من هذه التجربة هو إيجاد قوة الرفع، وقوة المقاومة للريشة بعد مزج السطوح الانسيابية لكل من الطرف والجذر عند زوايا هجوم (ورود) مختلفة ضمن المجال من −20 حتى +20 درجة، وكذلك إيجاد زاوية الانهيار وقوة الرفع العظمى، وذلك باستخدام النفق الهوائي الافتراضي الحاسوبي في البرنامج design foil R6، وتوضيح ذلك بالمخططات البيانية اللازمة.



الشكل (5) تغير قوة الرفع مع زاوية الورود للبروفيل



الشكل (6) تغير قوة المقاومة مع زاوية الورود للبروفيل

النتائج

1- إنّ العامل المهم في تحديد المواصفات الأيروديناميكية لبروفيلات الأجنحة الحاملة الداخلة في بناء عناصر الريشة هو نسبة (C_L/C_d) ضمن مدى معيّن من زاوية الهجوم يراوح من 0 درجة إلى 10 درجة، ويكون ذلك لقيم محددة من عدد رينولدز (Re) ضمن المجال من 1×10^5 إلى 1×10^6. وهذا يجب أن يتحقق مع شرط $(C_L > 1)$، وبذلك نحقق أفضل أداء لدوار توربين الرياح.

2- تشير الدراسات السابقة بشكل قاطع إلى أنَّ أفضل بروفيل للسطح الانسيابي هو النموذج الذي يمكنه أن يحقق أكبر نسبة من (C_L/C_d) مع العلم أنّه تزداد قيم هذه النسبة مع زيادة عدد (Re). ولعدد (Re) علاقة مباشرة بحجم توربين الرياح وسرعة الرياح.

References

[1] Christian Bak; (2007)."Sensitivity of Key Parameters in Aerodynamic Wind Turbine Rotor Design on Power and Energy Performance" :Journal of Physics: Conference Series 75 Denmark.

[2] Christian Bak and Peter Fuglsang; March (1999)."Airfoil Characteristics for Wind Turbines" pdf. Technical University of Denmark.

[3] David Wood. "The Design and Analysis of Small Wind Turbines" 1st edition of Notes (2002), School of Engineering/ University of Newcastle NSW 2308 Australia.

[4] Design FOIL R6 Demo, Is owned by DreeseCode Software LLC: The Airfoil Archive is a collection of over 1500 airfoil coordinate files compiled by the University of Illinois (UIUC).

[5] D.M. Somers; January (2005)."Design and Experimental Results for the S825 Airfoil".

[6] F. B. Hsiao, C. Y., Lin; September (2008). Thickness effect on low aspect ratio wing aerodynamic characteristics at a low Reynolds number, Journal of Mechanics, Vol. 24, No. 3.

[7] Franck Bertagnolio; August (2001). Wind Turbine Airfoil Catalogue,: National Laboratory, Denmark.

[8] Gary L. Johnson; December (2001)."WIND ENERGY SYSTEMS". Book.

[9] H. A. Stokely; Updated February 3, (2007) SoarTech Aero. Publications, Virginia Beach VA 23451. U.S.A. Email: Soartec@aol.com.

[10] Holger Babinsky; 9 September (2003)."How do wings work": Department of Engineering, University of Cambridge, Cambridge (E-mail: hb@eng.cam.ac.uk).

Received	2018/02/28	إيداع البحث
Accepted for Publ.	2018/05/10	قبول البحث للنشر