

Improved Aerodynamic Design of Small Wind Turbine Blades

Dr. Rami George*
Dr. Badr Aldeen Abdeen**
Owais Mohamad Issa***

(Received 20 / 11 / 2023. Accepted 25 / 3 / 2024)

□ ABSTRACT □

The research aims to improve the aerodynamic design small Horizontal-Axis-Wind-Turbine blades to work at low wind speeds and at low flow of Reynolds number through testing the improvement method based on the use of two different airfoils along the length of the blade with the aim of increasing the capacity coefficient where the final shape of the improved blade is made of the two airfoils SD7062 and NACA23012.

In this research, we followed an analytical methodology based on modeling and simulation whereby an algorithm depends on the blade's element momentum theory BEMT was formed to extract the ideal aerodynamic parameters of the blades due to the design conditions.

At the beginning, two blades of each profile were designed separately based on the BEMT algorithm, and their performance was analyzed within the range of an assumed wind speed (7-4) V=m/s and the range of tip velocity ratio $\lambda=[1-10]$, after that the two airfoils modified blade was designed and its performance was and its performance was analyzed at the same previous circumstance.

We performed an aerodynamic simulation of the enhanced two_ profiles blade in the ANSYS program using the CFD methodology depending on the possibility coefficient, the turbulence model (Shear Stress Transport) **k- ω sst** was selected.

The simulation results in MATLAB, ANSYS and QBLADE program showed that the capacity coefficient of the improved two airfoils blade was 0.42 at a wind speed of 7m/s and a tip speed ratio of $\lambda = 7$, while it was 0.38 for the turbine with the NACA23012 airfoil, and 0.35 for the turbine with the SD7062 airfoil, hence, the results of the modeling and simulation in the three programs were matched.

Keywords: Power coefficient; BEMT, CFD , tip-speed ratio, Reynolds, airfoil

Copyright



:Tishreen University journal-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Assistant Professor, Department of Mechanical Power Engineering - Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University - Lattakia – Syria.

** Professor, Mechanical Power Engineering Department, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Tishreen University, Lattakia, Syria.

*** Postgraduate Student (Master) – Department of Wind Energy- Faculty of Mechanical and Electrical Engineering - Tishreen University - Lattakia, Syria. owaismohamadissa@gmail.com

تحسين التصميم الأيروديناميكي لشفرات التوربينات الريحية الصغيرة

د. بدر الدين عابدين*

د. رامي جورج**

أويس محمد عيسى***

(تاريخ الإيداع 20 / 11 / 2023. قُبِلَ للنشر في 25 / 3 / 2024)

□ ملخص □

يهدف البحث الى تحسين التصميم الأيروديناميكي لشفرات التوربينات الريحية الصغيرة أفقية المحور للعمل عند سرعات رياح منخفضة وعند تدفق منخفض لرقم رينولدز وذلك من خلال اختبار طريقة التحسين القائمة على أساس استخدام بروفيلين مختلفين على امتداد الشفرة بهدف زيادة معامل القدرة حيث أن الشكل النهائي للشفرة المحسنة تكون من البروفيلين SD7062 و NACA23012.

اتبعتنا في هذا البحث منهجية تحليلية قائمة على النمذجة والمحاكاة حيث تم تشكيل خوارزمية تعتمد على نظرية دفع عنصر الشفرة BEMT لاستخراج البارامترات الأيروديناميكية المثالية للشفرات في ظروف التصميم.

في البداية تم تصميم شفرتين من كل بروفيل على حدى اعتمادا على خوارزمية BEMT وتم تحليل أدائهما ضمن مجال سرعة رياح مفترضة $V = (4-7)m/s$ و مجال نسبة سرعة طرف $\lambda = [1 - 10]$ ، بعد ذلك صممت الشفرة المحسنة ذات البروفيلين وتم تحليل أدائها عند نفس الظروف السابقة.

أجرينا محاكاة أيروديناميكية للشفرة المحسنة ذات البروفيلين في برنامج ANSYS باستخدام منهجية CFD بالاعتماد على معامل الاستطاعة، تم اختيار نموذج الاضطراب $k-\omega$ sst (Shear Stress Transport).

بينت نتائج المحاكاة في برنامج MATLAB و ANSYS و QBLADE أن معامل قدرة الشفرة المحسنة ذات البروفيلين 0.42 عند سرعة رياح $7m/s$ ونسبة سرعة طرف $\lambda = 7$ ، بينما كان 0.38 للشفرة ذات البروفيل NACA23012 و 0.35 للشفرة ذات البروفيل SD7062 حيث تطابقت نتائج النمذجة والمحاكاة في البرامج الثلاث.

الكلمات المفتاحية: معامل القدرة، BEMT، CFD، نسبة سرعة الطرف، رينولدز، بروفيل.



حقوق النشر : مجلة جامعة تشرين- سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب الترخيص

CC BY-NC-SA 04

* مدرس- قسم هندسة القوى الميكانيكية - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية- سورية.

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

*** طالب دراسات عليا (ماجستير طاقة رياح) - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة تشرين - اللاذقية سورية.

owaismohamadissa@gmail.com

مقدمة:

يزداد الاهتمام في الآونة الأخيرة بمسألة الموارد المتجددة للطاقة الكهربائية، وفي ظل تزايد الاعتماد والطلب على الطاقة الكهربائية تبرز الحاجة للبحث عن مصدر متجدد يمكن الاعتماد عليه وغير ملوث للبيئة، وكذلك تقليل الاعتماد على الشبكة الكهربائية العامة والحصول على نوع من الاستقلالية الكهربائية قدر الإمكان، حيث تشكل طاقة الرياح مثلاً جيداً ويمكن الاعتماد عليه.

تعتبر طاقة الرياح واحدة من مصادر الطاقة المتجددة الواعدة، حيث يزداد الاهتمام في الآونة الأخيرة بمسألة الموارد المتجددة للطاقة الكهربائية، وفي ظل تزايد الاعتماد والطلب على الطاقة الكهربائية تبرز الحاجة للبحث عن مصدر متجدد يمكن الاعتماد عليه وغير ملوث للبيئة، وكذلك تقليل الاعتماد على الشبكة الكهربائية العامة والحصول على نوع من الاستقلالية الكهربائية قدر الإمكان، حيث تشكل طاقة الرياح مثلاً جيداً ويمكن الاعتماد عليه، يؤثر تصميم الشفرة بشكل حاسم على الطاقة التي يتم استغلالها من طاقة الرياح. وبالفعل يتم تشكل الرياح بسبب الاختلافات في الضغط الجوي. يتفاوت تدفق الرياح في السرعة والأنماط في جميع أنحاء العالم ويتأثر أيضاً بالفرق في التضاريس والمساحات المائية والغطاء النباتي [1].

يتم في الوقت الحاضر توليد الكهرباء باستخدام توربينات الرياح، تعمل الطاقة الحركية الناتجة عن الهواء على تحريك شفرات التوربين مما يتسبب في تدوير دوار المولد وبالتالي توليد الطاقة الكهربائية. يرتبط أيروديناميك التوربينات الريحية بهندسة شفراتها ويتدفق الجريان الذي يحدد نوعه رقم رينولدز عليها. وتعد التوربينات الريحية ذات المحور الأفقي (HAWT) الأكثر استخداماً في التطبيقات التجارية.

يتم تصنيف توربينات الرياح وفقاً للاستطاعة المتولدة حيث تعتبر توربينات الرياح التي تقل قدرتها عن 50 kw بالانفقات الريحية الصغيرة [2].

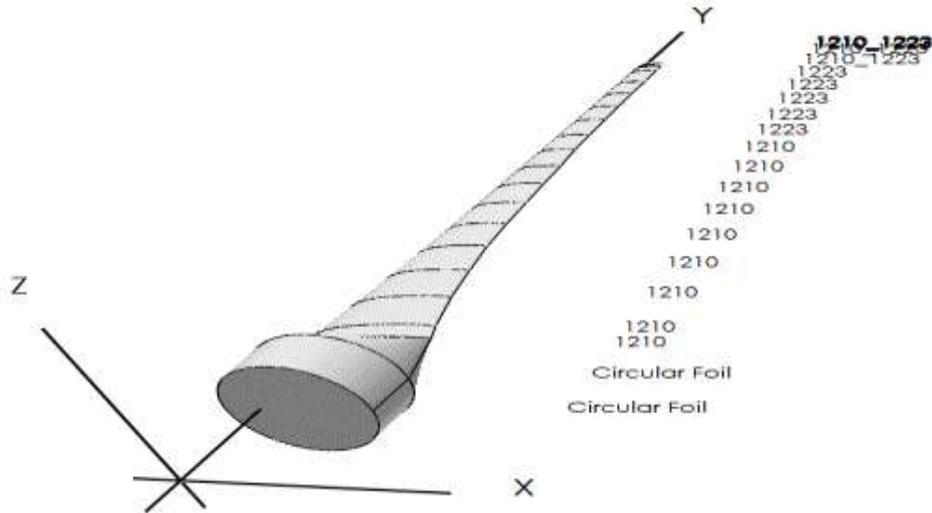
الهدف من استخدام توربينات الرياح الصغيرة هو تزويد المباني بالطاقة الكهربائية، والتي قد تكون مرتبطة بالشبكة العامة أو لا تكون مرتبطة. أفادت الرابطة العالمية لطاقة الرياح أن طاقة الرياح المثبتة عالمياً زادت 52.552 GW، مما يجعل إجمالي الطاقة المتولدة 539.291 GW. يمثل هذا العدد الكبير 5 % من الطلب العالمي على الكهرباء، مع تسجيل الدنمارك رقماً قياسياً مع 43 % من استهلاك الطاقة التي تغطيها توربينات الرياح [3].

تعتبر التوربينات الريحية الصغيرة المنخفضة التكلفة وبسيطة التصنيع ذات تأثير حاسم في استخراج الطاقة في المناطق الريفية والسكنية، وتعتمد كفاءة الدوار فيها بشكل أساسي على بروفيل الشفرة الذي يقوم بزيادة فرق الضغط على جانبي الشفرة لتخفيض سرعة الرياح القادرة على توليد العزم الأيروديناميكي المطلوب، يمكن تحسين هذا العزم ومعامل القدرة من خلال زيادة قوة الرفع ونسبة قوة الرفع للجر. تعاني توربينات الرياح الصغيرة من تدفق جريان ذو رقم رينولدز منخفض بسبب صغر سطح الشفرة وانخفاض سرعة الرياح على عكس التوربينات الكبيرة التي يتم وضعها في أماكن توفر الرياح عالية السرعة. الشفرة هي المكون الرئيسي لتوربينات الرياح وهي التي تستخرج الطاقة من الرياح، وتسهم أيضاً بنسبة (20-25) % من الميزانية الإجمالية لتوربينات الرياح [4].

أجريت العديد من الدراسات السابقة التي كانت تهدف لتحسين شفرات التوربينات الريحية الصغيرة سنذكر بعض طرق التطوير للشفرات والنظريات الأساسية المعتمد عليها في مثل هذه الدراسات والتي ستكون أساساً لبحثنا ودراستنا.

عرضت بعض الدراسات طرق وابتكارات مختلفة تهدف لتطوير الشفرة ومادة صنعها مثل اجراء تجويف في الشفرة، تحليل أنواع متعددة للأخشاب واختيار الأفضل كمادة صنع بالإضافة لنموذج الشفرة المرنة التي حققت مردود أعلى عند نفس شروط التجربة بالمقارنة مع نموذج الشفرة الصلبة، كان الهدف من هذه الدراسات تقليل عطالة الشفرة وتقليل زمن إقلاعها لزيادة فعالية التوربينات الصغيرة في مناطق سرعة الرياح المنخفضة [5,6,7]. ودرس بعضها الآخر تحسين المواصفات الأيروديناميكية بهدف رفع معامل القدرة من خلال التحكم بزوايا ميل الشفرة وطول الوتر، ونسبة سرعة الطرف المناسبة، وزاوية الهجوم المثالية بالإضافة لاختيار البروفيل الأمثل للشفرة وإجراء دراسات مقارنة ومراجعات مكثفة للبروفيلات وتحليل بارامترات الرفع والجر لتحديد البروفيلات الأفضل والمناسبة لعمل العنفات الريحية الصغيرة والتي تعمل عند رينولدز منخفض [8,9,10,11,12,13,14].

كان يتم في غالبية الدراسات السابقة اختيار بروفيل معين ومن ثم يتم استخدام نظرية BEMT من أجل استخراج البارامترات الأيروديناميكية للحصول على أفضل توزيع لزوايا القتل وطول وتر الشفرة، بينما في بحثنا الحالي سنستخدم بروفيلين مختلفين في شفرة واحدة، وذلك بناء على الدراسة المرجعية [15] والتي اتبعت منهجية مختلفة في التحسين الأيروديناميكي، حيث يهدف هذا التصميم الى تحسين أداء عنفة ريحية أفقية المحور للحصول على معامل قدرة (CP) أعلى من 40% عند سرعة منخفضة للرياح تبلغ 5m/s حيث تم استخدام بروفيلين مختلفين والشفرة في الإصدار النهائي بشكل أساسي من قسمين مختلفين ينتميان إلى جنيحات S1210 و 1223S وفق الشكل (1).



الشكل (1) الشفرة ذات البروفيلين

واعتماداً على الدراسات السابقة سنعمد على نظرية BEMT كأساس للتصميم وسنتوسع بطريقة استخدام بروفيلين في شفرة واحدة، حيث الغاية من هذه الدراسة هو رفع معامل قدرة توربين الرياح بناء على استخدام بروفيلين مختلفين في شفرة واحدة.

أهمية البحث وأهدافه:

تتوافر في سوريا العديد من المناطق الريحية الواعدة، إذ تتوفر في غالبية أريافنا سرعات رياح كافية لتوليد الكهرباء، وتقليل الاعتماد على الشبكة الكهربائية العامة، وبالنظر لكون الاستطاعة الكهربائية التي يمكن استخلاصها من العنفات الريحية تتأثر بسرعة الرياح بشكل أساسي، فإن هناك صعوبة في استخلاص الحد الأقصى الممكن من طاقة الرياح وتحويلها إلى طاقة كهربائية، لذلك تلعب المواصفات الأيروديناميكية للعنفة دوراً مهماً في تصميم العنفة.

يهدف البحث لتحسين معامل القدرة CP لتوربين ريحي صغير ذو محور أفقي للعمل عند سرعات رياح منخفضة باستخدام بروفيلين مختلفين في الشفرة وذلك عند مجال سرعة الرياح 4-7 m/s عند رقم رينولدز منخفض 100000 $Re =$ ومجال نسبة سرعة طرف $\lambda = [1 - 10]$

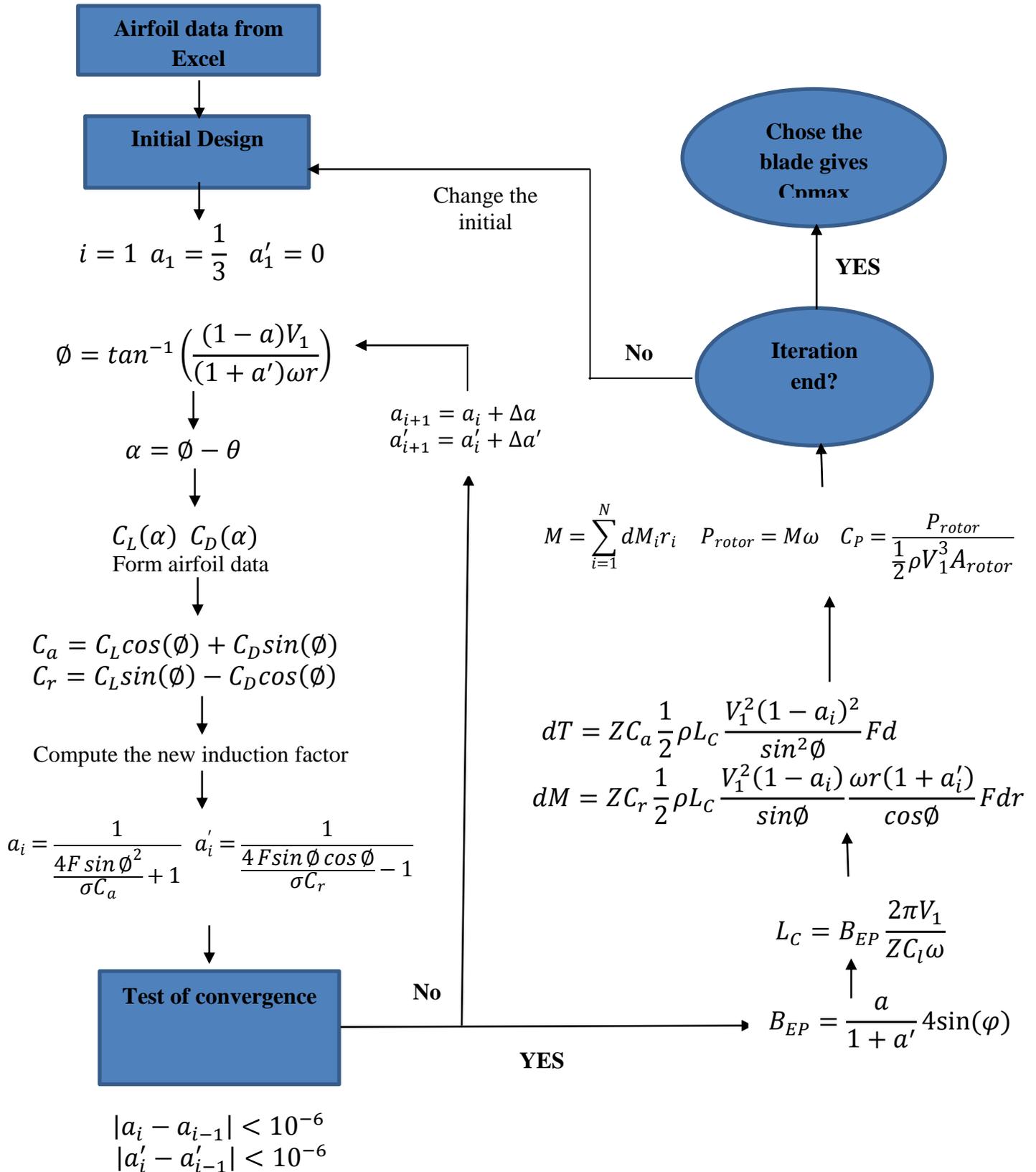
طرائق البحث ومواده:

تم في هذا البحث اعتماد المنهج التحليلي للحصول على النتائج، تم استخدام برنامج MATLAB من أجل الحصول على الحل الأمثل للشفرات المصممة حيث اتبع في هذا البحث طريقة اختيار بروفيلين مختلفين في الشفرة بهدف زيادة معامل القدرة، خوارزمية الحل الأمثل للشفرة كانت اعتمادا على نظرية دفع عنصر الشفرة BEMT وأخذ بعين الاعتبار ضياعات الحافة التي تعد أحد العوامل المؤثرة في معامل القدرة Cp ويبين الشكل (2) مخطط الخوارزمية المتبعة في هذه الدراسة. في البداية تم اختيار البروفيلين SD7062 و NACA23012 وحللت معاملتهما الأيروديناميكية بتقنية Xfoil واستخرجت بارامترات معاملات الرفع Cl والجر Cd عند $Re=100000$ وهذه القيم ضرورية كدخل للخوارزمية بالإضافة الى بارامترات التصميم الأساسية لدوار العنفة الريحية المبينة في الجدول (1).

الجدول (1) بارامترات دخل الخوارزمية:

TSR	No.of blade	D(m)	V(m/s)	r/R(m)	Re	No.blade element
1-10	3	2	4-7	0.1	100000	11

الشكل (2) خوارزمية التصميم

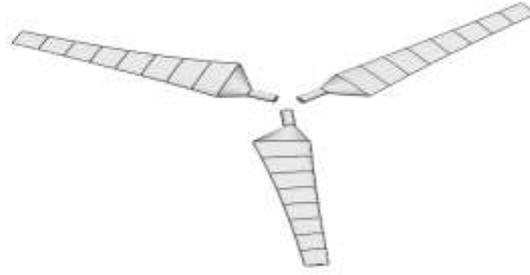


تم استخدام برنامج QBLade لتصميم الشفرات أحادية البروفيل والشفرة ذات البروفيلين، كما تم استخدام برنامج ANSYS من أجل التحليل سلوك الجريان الأيروديناميكي على الشفرة المحسنة ذات البروفيلين وذلك للتأكد من جودة التصميم الجديد واختبار أدائه ولمعرفة توزيع خطوط الضغط والسرعة والاجهادات.

النتائج والمناقشة:

1- تم تصميم شفرات دوار العنفة الريحية ذات البروفيل NACA23012 وفق خوارزمية BEMT وتبين أن معامل القدرة الأعظمي لها هو $CP_{MAX}=0.35$ عند سرعة رياح 7 m/s ونسبة سرعة طرف 6 وزاوية هجوم 5° ، الشكل (3) يوضح التصميم باستخدام برنامج QBLADE.

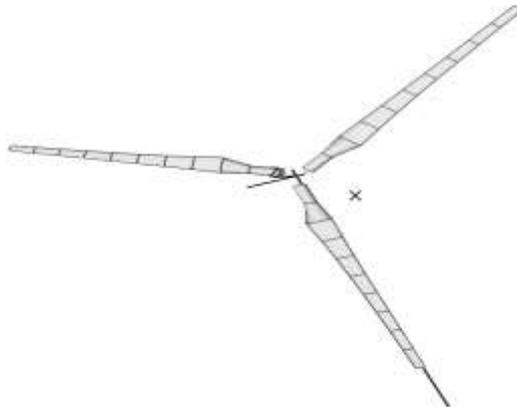
NACA23012-f



الشكل (3) دوار العنفة الريحية ذات البروفيل NACA23012

2- تم تصميم شفرات دوار العنفة الريحية ذات البروفيل SD7062 وفق خوارزمية BEMT وتبين أن معامل القدرة الأعظمي لها هو $CP_{MAX}=0.38$ عند سرعة رياح 7 m/s ونسبة سرعة طرف 8 وزاوية هجوم 6° ، الشكل (4) يوضح التصميم باستخدام برنامج QBLADE.

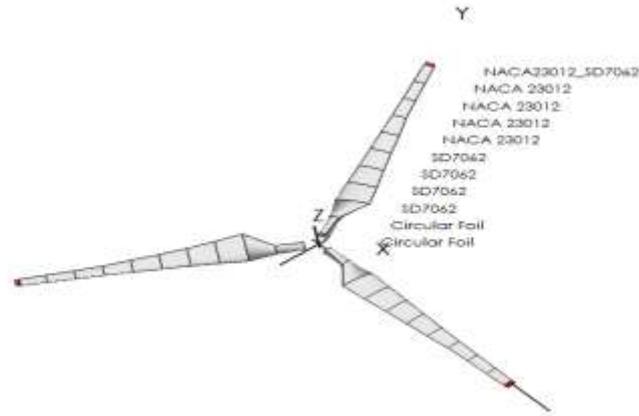
SD7060



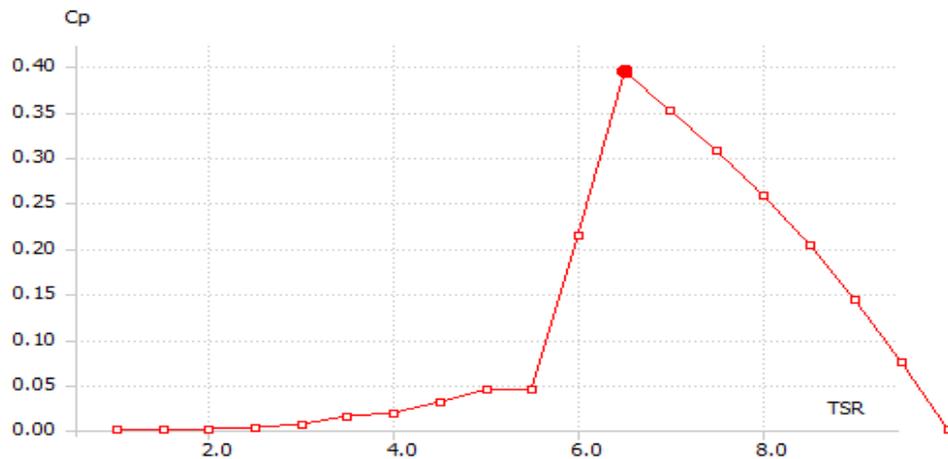
الشكل (4) دوار العنفة الريحية ذات البروفيل SD7062

3- تصميم الشفرة ذات البروفيلين المختلفين SD7062 و NACA23012 تم وفق خوارزمية التجميع والتشكيل التي تقوم على أساس اختيار أفضل عناصر الشفرة التي تعطي أعلى معامل قدرة كما طبقت خوارزمية BEMT لحساب البارامترات المثلى للتصميم كطول الوتر وزاوية الفتل لكل عنصر من عناصر الشفرة وبالنتيجة النهائية حصلنا على الشفرة المحسنة المصممة من بروفيين مختلفين بمعامل قدرة أعلى من الشفرات ذات البروفيلات الأحادية حيث بلغ CP=0.42 عند سرعة رياح 7 m/s ونسبة سرعة طرف 7 وزاوية هجوم 5.5°، الشكل (5) يوضح التصميم باستخدام برنامج QBLADE والشكل (6) تحليل أداء التصميم الجديد ومعامل القدرة.

blade interpolate-f

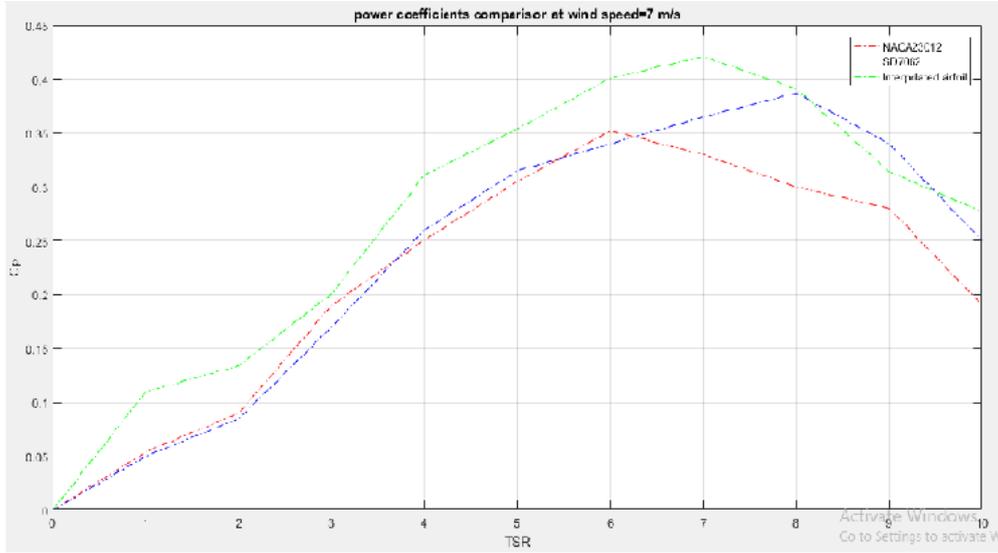


الشكل (5) دوار العنفة الريحية ذات البروفيلين SD7062 و NACA23012

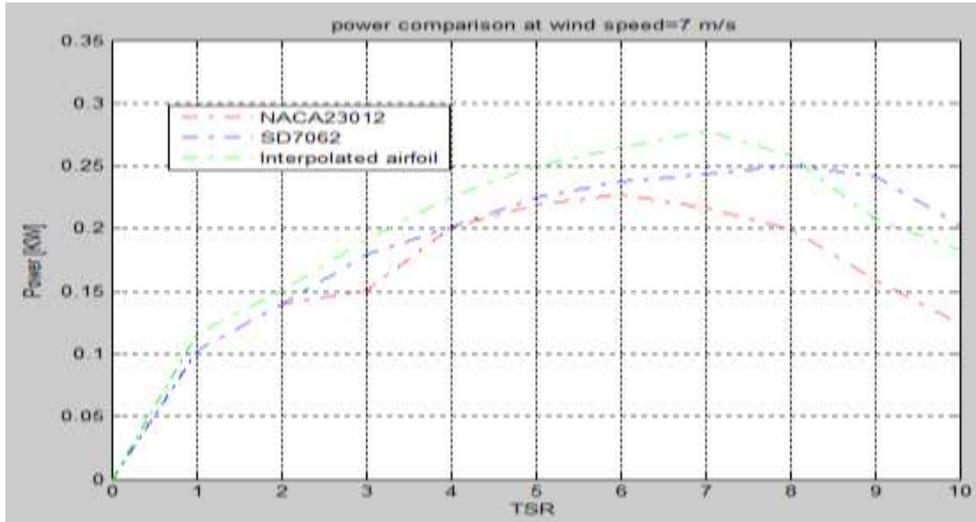


والشكل (6) تحليل أداء التصميم الجديد ومعامل القدرة.

كما يظهر برنامج MATLAB الفرق بين معامل قدرة العنقات الثلاثة بالنسبة لسرعة الطرف حيث يظهر تفوق العنقة ذات البروفيلين وذلك في الشكل (7) ويظهر الشكل (8) منحنيات الاستطاعة بالنسبة لنسبة سرعة الطرف TSR.



الشكل (7) الفرق بين معامل قدرة التوربينات الثلاثة



الشكل (8) الفرق بين استطاعات التوربينات الثلاثة

أعطت العنقة ذات البروفيلين أعلى معامل استطاعة عند نسبة سرعة طرف 7 وسرعة رياح 7 m/s ونلاحظ تقارب نتيجة محاكاة برنامج MATLAB مع QBLADE حيث بلغ معامل القدرة $C_p \approx 0.42$ مما يدل على صحة استخدام هذه الطريقة.

نلاحظ عند نسبة سرعة طرف 9 تفوق العنقة ذات البروفيل SD7062 ولكن معامل القدرة ينخفض الى ما دون 0.25 ومن المعروف أن نسبة سرعة الطرف المثالية تكون ضمن مجال من 5 الى 8.

4- محاكاة التدفق في برنامج ANSYS : صممت شفرات دوار العنقة ذات البروفيلين باستخدام منهجية CFD بالاعتماد على معامل الاستطاعة من خلال الدراسة النظرية وجدنا أن المعيار الأساسي التي تقوم عليها منهجية

التصميم هي حساب قيمة C_p المناسبة ورسمها مع معامل نسبة سرعة الطرف λ وسوف يتم حساب معامل الاستطاعة من المعادلة (1) حيث C_m معامل العزم الكلي للشفرات.

$$C_p = C_m \lambda \dots\dots\dots(1)$$

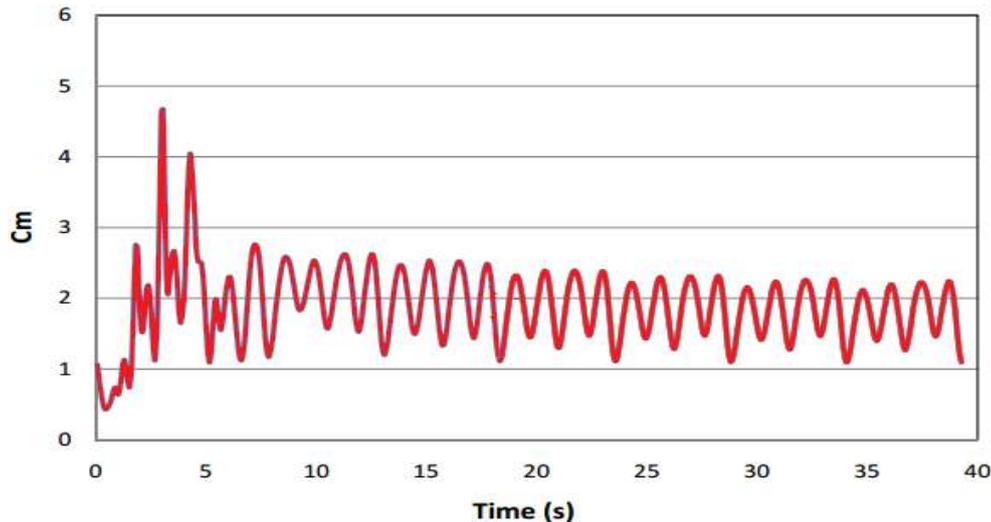
يسمح برنامج Fluent بالحصول على القيمة الفورية لمعامل العزم C_{mi} لكل شفرة من العنفة وفق المعادلة (2)، وبما أننا مهتمون بالاستطاعة الكلية للعنفة فإن العمل مع معامل العزم الكلي يكفي، وإجمالي معامل العزم هو مجموع معامل العزم لكل شفرة لذلك بالنسبة إلى العنفات ذات الشفرة n تكون قيمة معامل العزم الكلي للعنفة هي:

$$C_m = \sum_i^n C_{mi} \dots\dots\dots(2)$$

يبين الشكل (9) مثلاً لمعامل العزم الكلي للعنفة حيث يظهر سلوك حالة متغيرة مع الزمن عابرة بعد التقارب مع نمط دوري يتكرر لكل دورة كاملة من العنفة. من أجل الحصول على كفاءة العنفة، يتم حساب متوسط القيم المختلفة لمعامل العزم وفق العلاقة (3):

$$\overline{C_m} = \frac{\sum_t C_m}{\#samples} \dots\dots\dots(2)$$

وبمجرد الحصول على معامل العزم المتوسط يتم حساب معامل كفاءة العنفة (معامل الاستطاعة) من المعادلة (1).

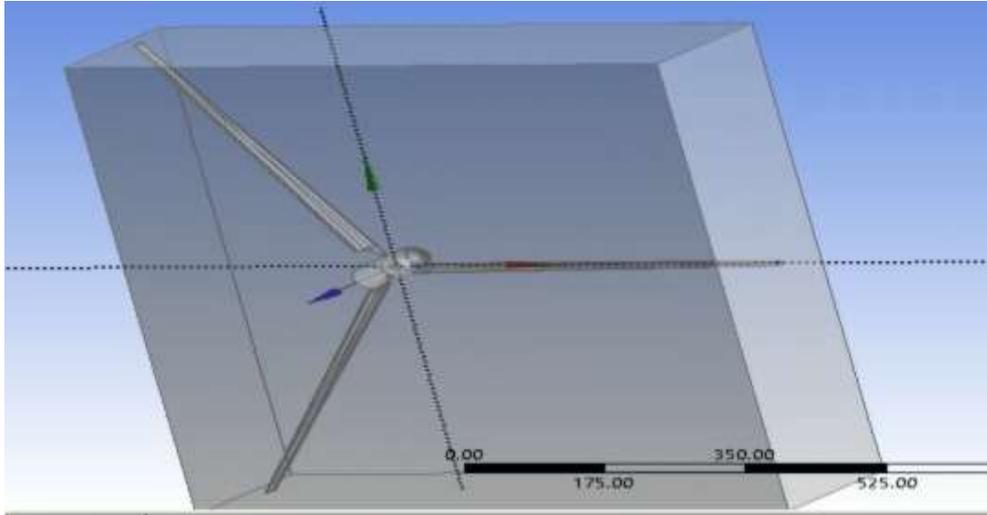


الشكل (9): معامل العزم الكلي للعنفة

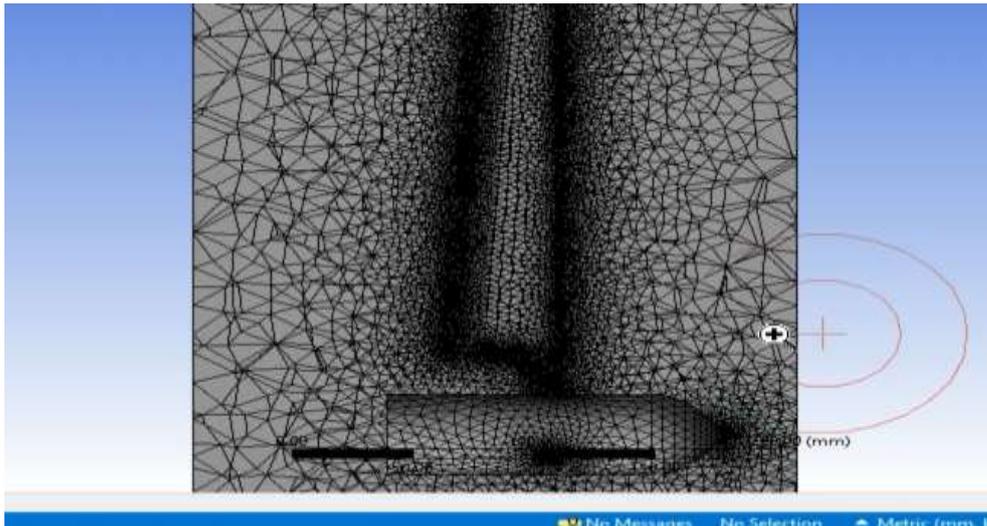
تم لاحقاً رسم دوار العنفة ذات البروفيلين SD7062 و NACA23012 في برنامج ANSYS باستخدام بيئة Design Modeler وبعتماد القيم والبارامترات نفسها المستخدمة في QBlade فكانت النتيجة وفق الشكل (10) كما تم تحديد مجال الجريان بهدف دراسة مجال الهواء المحيط بالعنفة وفق الشكل (11) كما حددت شبكة التقطيع mech حيث بلغ عدد العناصر 328356 وعدد العقد 92102 وفق الشكل (12).



الشكل (10): دوار العنفة ذات البروفيلين SD7062 و NACA23012 في برنامج ANSYS



الشكل (11) العنفة مع مجال الجريان

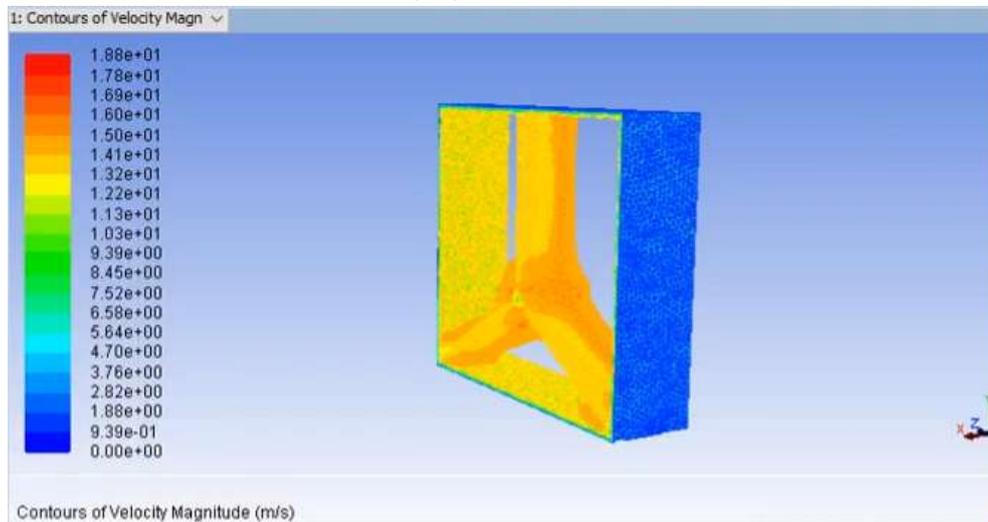


الشكل (12) مقطع من شبكة التقطيع للعنفة

تم في العمل الحالي اختيار نموذج الاضطراب (Shear Stress Transport) $k-\omega$ SST والذي يجمع بين العديد من العناصر المرغوب بها، وقد تم اعتماد Solver وهو **implicit** على أساس الضغط ثنائي البعد، وهو جيد بالنسبة للجريانات الغير قابلة للانضغاط والغير مستقرة.

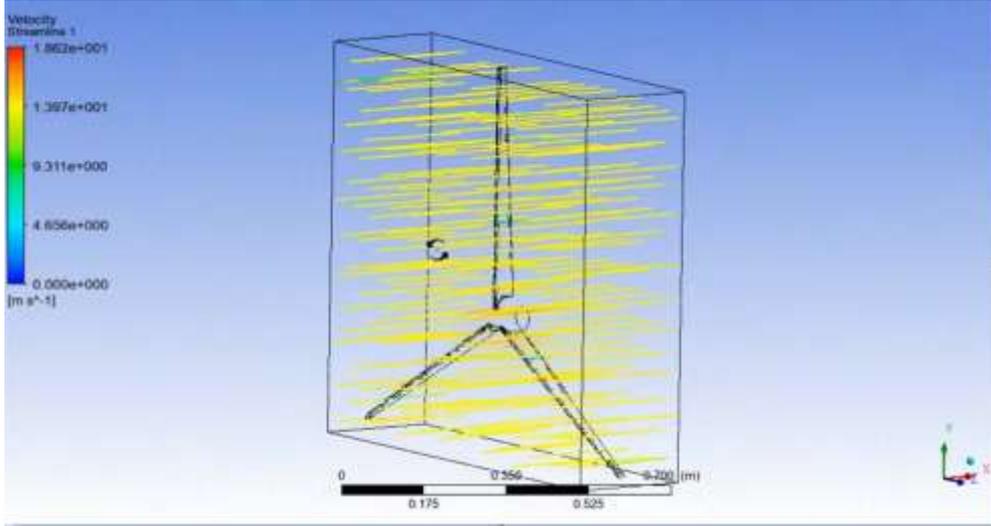
وجدنا نتيجة استخدام برنامج Matlab، وبرنامج Qblade أن الشفرة الناتجة عن الدمج تعطي اعلى معامل استطاعة عند سرعة رياح $V = 7 \text{ m/sec}$ ، و نسبة سرعة عند الحافة $\lambda = 7$ ، والهدف من النمذجة في هذه المرحلة هو تحليل عددي للسلوك الأيروديناميكي للعنفة، لذلك قمنا للتأكد من نتائج المرحلة السابقة بتصميمها، وتمت المقارنة من خلال دراسة تغيرات معامل الاستطاعة مع نسبة سرعة الطرف.

تم تنفيذ نمذجة كاملة اعتماداً على جريان غير مستقر باستخدام نموذج RANS لثلاثة شفرات للدوار التي منشأها البروفيل المدمج (interpolate_NACA23012,Sd7062) ونسبة السرعة عند حافة الشفرة تعطي كما رأينا بالمعادلة $\lambda = \frac{\omega R}{V}$ ، وقد تم إجراء مسح لمجال قيم هذا المعامل من $\lambda = 1$ حتى $\lambda = 11$ ، وتم إجراء نمذجة كاملة مع $Re = 1 \times 10^5$ فكان كنتور السرعة للعنفة يعطى بالشكل(13).



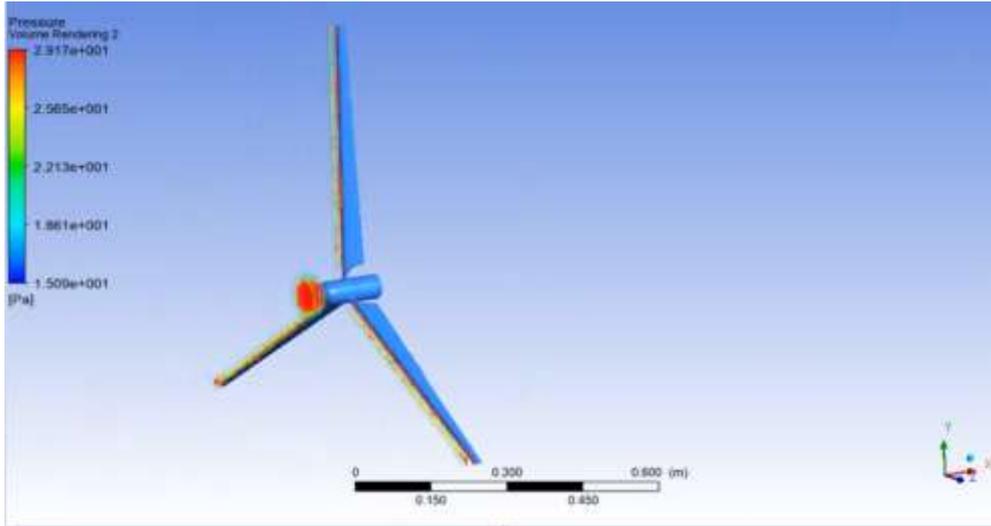
الشكل(13): كنتور السرعة للعنفة

نلاحظ من الشكل (13) أن اضطراب جريان منخفض وهو مؤشر على عنفة هوائية عالية الفعالية، كما أن توزع السرعة متدرج ومنظم على طول العنفة وهذا مؤشر على تصميم جيد للعنفة، أما خطوط تيار الهواء على طول العنفة تعطي بالشكل (14).



الشكل (14): خطوط تيار الهواء على طول العنفة

نلاحظ من الشكل السابق عدم تشكل دوامات (vortex) لأننا عند تصميم الشفرة في MATLAB تم أخذ معامل تصحيح ضياعات الطرف tip loss factor بعين الاعتبار، ويعطى توزيع الضغط على طول العنفة بالشكل (15).



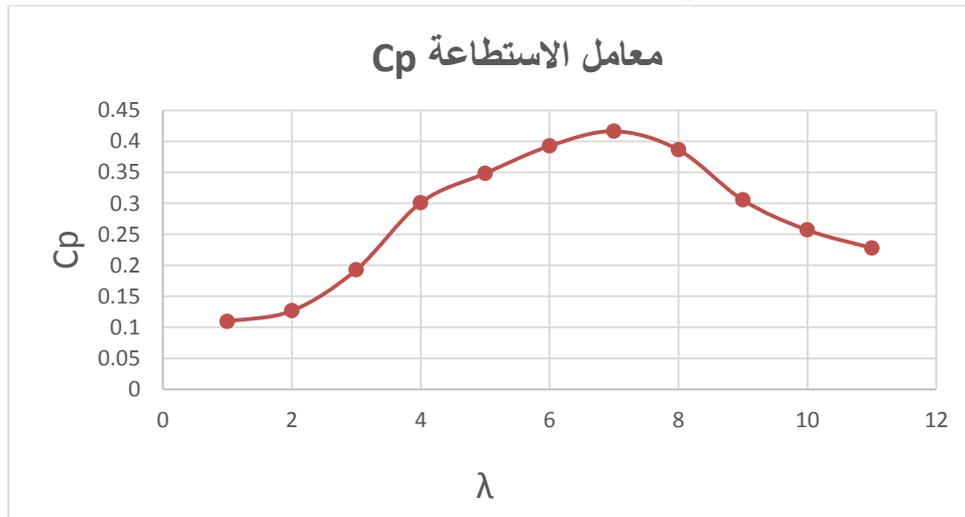
الشكل (15): توزيع الضغط على طول العنفة

نلاحظ من الشكل (15) أن توزيع الضغط الأعظمي يقع حول حافة الشفرة الأمامية leading edge وهذا مؤشر على تصميم جيد للشفرة، لأن الضغط يكون أعظمي حول الجزء من الشفرة الذي يتلقى الهواء في البداية. تم استخلاص قيم معامل العزم C_m من برنامج Ansys-Fluent، حيث أن كل قيمة لمعامل العزم تمثل (حل) على برنامج Fluent، وإن قيم معامل الاستطاعة الموافقة ونسبة سرعة الطرف مبينة في الجدول (2)، وقمنا برسم تغيرات معامل الاستطاعة كتابع لنسبة سرعة الطرف وفق الشكل (16).

الجدول (2) فيم معامل الاستطاعة والعزم بالنسبة لنسبة سرعة الطرف:

C_m	λ	C_p
0.1095	1	0.1095
0.06335	2	0.1267
0.064233	3	0.1927
0.0753	4	0.3012
0.06972	5	0.3486
0.06545	6	0.3927
0.057286	7	0.4165
0.048313	8	0.3865
0.033933	9	0.3054
0.0257	10	0.257
0.020727	11	0.228

وقمنا برسم تغيرات معامل الاستطاعة مع نسبة السرعة عند الحافة وفق الشكل:



الشكل (16): معامل الاستطاعة مع نسبة سرعة الطرف

نلاحظ من خلال الجدول أن العنفة تقدم أعلى معامل استطاعة (0.4165) من أجل سرعة رياح $7 m/s$ ونسبة سرعة $TSR \approx 7$ ، كما نلاحظ هناك توافق بين نتائج التي حصلنا عليها في Matlab، و Qblade مع نتائج النمذجة العددية في Ansys-Fluent.

الاستنتاجات والتوصيات:

نستنتج من الدراسة التحليلية السابقة:

1. تم في هذا العمل تصميم وتحسين شفرة توربين ربحي ذو محور أفقي (ذو بروفيلين) يعمل عند رينولدز منخفضة نسبياً $Re=100000$ ومجال سرعة رياح منخفض نسبياً m/s (4-7). ويمكننا اقتراح دراسة أثر استخدام بروفيلين على الأداء في حالات سرعات الرياح العالية والتوربينات ذات شفرات أطول، ويمكن دراسة أثر استخدام بروفيلين على الأداء في حالات سرعات الرياح العالية والتوربينات ذات شفرات أطول
2. إثبات إمكانية استخدام بروفيلين مختلفين في شفرة واحدة وتوافقت النتائج في برنامج MATLAB و ANSYS و QBLADE.
3. الأخذ بعين الاعتبار ضياعات الطرف للشفرة المصممة، كان لها تأثير حاسم على معامل القدرة بالإضافة لانخفاض الاضطراب عند طرف الشفرات كما أظهرتها محاكاة التدفق في برنامج ANSYS، ويمكننا اقتراح دراسة أثر الضياعات عند الصرة أيضاً.
4. لم تعطي المحاكاة أي نقطة ضعف في منطقة التحول من بروفيل لآخر وذلك بفضل المحاكاة في برنامج QBLADE كما أكدت محاكاة التدفق في ANSYS عدم اضطراب الجريان في تلك المنطقة من الشفرة مما يدل على الانسيابية وجودة التصميم.
5. أعطى التوربين ذو البروفيلين معامل قدرة $CP \approx 0.42$ عند سرعة رياح $7 m/s$ ونسبة سرعة طرف 7 وهو معامل جيد بالمقارنة مع الدراسات السابقة حيث أعظم معامل قدرة تم الوصول له في عنفة ربحية هو 0.45.

References:

- [1]. P.GOPI, T. BALUSAMY, S. PALANISAMY, P. RAJ SHANO. *Experimental Analysis of a natural convection mode solar dryer integrated with heat storage unit.* Advances in Natural and Applied Sciences. 2017, Vol. 11, 461-467.
- [2]. AYMEN EL KHADRAOUI, SALWA BOUADILA, SAMI KOOLI, ABDELHAMID FARHAT, AMENALLAH GUIZANI. *Thermal behavior of indirect solar dryer: Nocturnal usage of solar air collector with PCM.* Journal of Cleaner Production, 2017, Vol. 148, 37- 48.
- [3]. NESSIM ARFAOUI, SALWA BOUADILA, AMENALLAH GUIZANI. *A highly efficient solution of off-sunshine solar air heating using two packed beds of latent storage energy.* Solar Energy, 2017, Vol. 155, 1243-1253.
- [4]. S. S. KRISHNANANTH, K. KALIDASA MURUGAVEL. *Experimental study on double pass solar air heater with thermal energy storage.* Journal of King Saud University – Engineering Sciences, 2013, Vol. 25, 135-140.
- [5] Abolfazl Pourrajabian & el.Renewable Energy. *Aero-structural design and optimization of a small wind turbine blade.* 2016, Vol 87.No. 3, 837-848.
- [6] Abolfazl Pourrajabian & el.Renewable and Sustainable Energy Reviews. *Choosing an appropriate timber for a small wind turbine blade: A comparative study.* 2019, Vol.100 .No 2,1-8.
- [7] David W . *Performance Analysis of a Small Wind Turbine Equipped with Flexible Blades.* 2019, Vol 132 .No3.
- [8] Xinzi Tang & el. Procedia.vol *A Direct Approach of Design Optimization for Small Horizontal Axis Wind turbine blade.* 2015, Vol.36,12-16.

- [9] P.A. Costa Rocha & el. ENERGY. *The Effects of Blade Pitch Angle on the Performance of Small-scale Wind Turbine in urban environments*. 2018, vol 148.No. 4, 169-178.
- [10] Sanaa EI Mouhsine & el. Procedia MANUFACTURING. *aerodynamics and structural analysis of wind turbine blade*. 2018, Vol,22 .No,747-756.
- [11] A. Suresh & S. Rajakumar. Materials Today: Proceedings. *Design of small horizontal axis wind turbine for low wind speed rural applications*. 2019 Vol .
- [12] N. Karthikeyan & el. *Review of aerodynamic developments on small horizontal axis wind turbine blade*. 2015.,Vol 42 .No 2.
- [13] Meng-Hsien Lee & el. *Experiments and numerical simulations of the rotor-blade performance for a small-scale horizontal axis wind turbine*. 2016, Vol 149.No .
- [14] Chang-Chi Huang & el. *Optimal design of protuberant blades for small variable-speed horizontal axis wind turbine-experiments and simulations*. 2016, Vol 114.No 10.
- [15] H. Muhsen & el. *Small Wind Turbine Blade Design and Optimization*. 2019, Vol 29 NO 12.