

Improved Design of Diffuser Augmented Wind Turbine Blades Using Solid Works and EES

Aya Shamoun* 

Dr. Mohammad Knnissi**

Dr. Ali Zaher***

(Received 21 / 5 / 2025. Accepted 30 / 7 / 2025)

□ ABSTRACT □

In recent years ,the realization that the world's fossil fuel supply is limited ,along with increasing environmental concerns, has led to the exploration of the increasing demand for energy. Wind energy is a renewable energy source .this research focuses on the horizontal axis wind turbine (HAWT).

This research presents an aerodynamic optimization analysis of horizontal axis wind turbines based on the BEM theory of blade element momentum . The Naca0012 wing was used to obtain the geometry of the turbine wings , and the root radius Rhub and turbine radius Rtip that achieve the best wing performance were determined, the analysis method relied on the Qblade software.

this research addressed the problem of increasing turbine efficiency in the low wind speed range was addressed through the concept of diffuser augmented wind turbines (DAWTs) . the diffuser shape was designed in solid works ,flow simulation was performed , and a software model was created to calculate the energy extracted from the wind using EES. The results showed that DAWTs achieved a quantum leap in increasing energy production and exceeding the Betz limit.

Keywords: Wind energy , DAWT(diffuser augmented wind turbine), HAWT(Horizontal Axis wind turbine)

Copyright  :Latakia University journal(Formerly Tishreen)-Syria, The authors retain the copyright under a CC BY-NC-SA 04

* Postgraduate Student (Master), Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical, Latakia University(Formerly Tishreen), Latakia, Syria.

**Professor, Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical Engineering ,Latakia University(Formerly Tishreen), Latakia, Syria.

*** Assistant Professor, Department of Mechatronics Engineering, Faculty of Mechanical and Electrical, Latakia University(Formerly Tishreen), Latakia, Syria.

تحسين تصميم شفرات العنفات الهوائية المعززة بناسر باستخدام Solid Works and EES

آيه شمعون * 

د. محمد خنيسي **

د. علي زاهر ***

(تاريخ الإيداع 2025 / 5 / 21. قَبْلُ للنشر في 2025 / 7 / 30)

□ ملخص □

في السنوات الأخيرة أدى الإدراك بأن إمداد الوقود الأحفوري في العالم محدود بالإضافة لزيادة المخاوف البيئية لاستكشاف الطلب المتزايد على الطاقة .

تعتبر طاقة الرياح من مصادر الطاقة المتجددة، يركز هذا البحث على توربينات الرياح ذات محور الدوران الأفقي (HAWT)، قدم هذا البحث تحليلاً لتحسين الديناميكي الهوائي لتوربينات الرياح الأفقية استناداً إلى نظرية BEM زخم عنصر الشفرة ، تم استخدام الجناح Naca0012 للحصول على الشكل الهندسي لأجنحة التوربين وتم إيجاد نصف قطر الجذر Rhub ونصف قطر العنفة Rtip اللذان يحققان أفضل أداء للجناح أما طريقة التحليل فتعتمد برنامج Qblade . في هذا البحث تم معالجة مشكلة زيادة كفاءة التوربينات في نطاق سرعات الرياح المنخفضة من خلال مفهوم توربينات الرياح المعززة بناسر DAWTs بحيث تم تصميم شكل الناسر ببرنامج solid works وإجراء محاكاة للتدفق Flow simulation .

في الختام تم إنشاء نموذج برمجي لحساب الطاقة المستخلصة من الرياح باستخدام EES وأظهرت النتائج أن DAWT حقق قفزة نوعية في زيادة إنتاج الطاقة وتجاوز حد بيتز

الكلمات المفتاحية: طاقة الرياح ، توربين الرياح المعزز بناسر (DAWT)، توربينات الرياح ذات محور دوران أفقي (HAWT) .

حقوق النشر :  مجلة جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - سورية، يحتفظ المؤلفون بحقوق النشر بموجب
الترخيص CC BY-NC-SA 04

* طالبة دراسات عليا (ماجستير) - قسم هندسة الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية - سورية.

** أستاذ - قسم هندسة الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية - سورية

*** مدرس - قسم هندسة الميكاترونك - كلية الهندسة الميكانيكية والكهربائية - جامعة اللاذقية (تشرين سابقاً) - اللاذقية - سورية

مقدمة:

الطاقة هي واحدة من المدخلات الأساسية للتنمية الاجتماعية والاقتصادية ، تظهر معدلات استهلاك الطاقة في بلد ما مستوى الازدهار الذي يمكن تحقيقه .

يمكن قياس الرفاهية الاجتماعية والاقتصادية من خلال مؤشر التنمية البشرية (HDI) Human Development Index الذي تم تطويره تحت رعاية الأمم المتحدة وقد وجد أن معظم الدول المتقدمة التي لديها HDI مرتفع تظهر أن استهلاك الفرد للطاقة بين 4000 إلى 9000 Kg من مكافئ النفط سنوياً ، من ناحية أخرى فإن الدول النامية تستخدم طاقة أقل للفرد حيث يستهلك الفرد أقل من 500 Kg ومع تزايد عدد سكان العالم حيث يعد النمو السكاني في البلدان النامية أسرع منه في الدول الصناعية ونتيجة لهذا النمو السكاني فإن الطلب على الطاقة يتزايد أيضاً يتم تلبية الطلب العالمي على الطاقة من مجموعة متنوعة من المصادر كالوقود الأحفوري المكون من الفحم والنفط والغاز الطبيعي لكن في السنوات الأخيرة أدى الإدراك بأن إمداد الوقود الأحفوري في العالم هو في الواقع محدود إلى جانب زيادة المخاوف البيئية لاستكشاف طرق لمواكبة الطلب المتزايد على الطاقة [8].

تعتبر كلا من الطاقة النووية ومصادر الطاقة المتجددة مثل الطاقة الشمسية وطاقة الرياح من الطاقات البديلة ويركز هذا البحث على طاقة الرياح .

تأتي معظم الطاقة المنتجة من الرياح من المزارع الريحية التي تحتوي مئات التوربينات العملاقة وكما هو الحال مع الإمداد المحدود من الوقود الأحفوري هناك عدد محدود من المواقع التي يمكن وضع هذه المزارع الضخمة عليها لذلك يتجه بعض من مصنعي توربينات الرياح إلى مزارع الرياح البحرية حيث لا يهم حجم التوربينات [10].

ويركز هذا البحث على اتخاذ منهج معاكس وجعل توربين الرياح أصغر حجماً ليكون متاحاً للتنشيط في البيئات الحضرية مما يزيد من المواقع الممكنة لطاقة الرياح والتحدي الرئيسي لتكوين توربينات الرياح في المناطق الحضرية هو انخفاض متوسط سرعة الرياح وزيادة شدة الاضطراب بسبب خشونة السطح المتزايدة وفي القسم التالي نناقش بإيجاز تاريخ تحويل طاقة الرياح إلى جانب وضعها الحالي وأفاقها المستقبلية .

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

عرضت بعض الدراسات طرق وابتكارات مختلفة تهدف لتطوير الشفرة باستخدام أجنحة من نوع NACA واعتمدت بشكل رئيسي على المحاكاة العددية باستخدام CFD [1] [2] [3] ودرس بعضها الآخر تصميم الناشر بأشكال متعددة وتحليل تدفق الهواء عبره [4] [5] [6] كان يتم في غالبية الدراسات السابقة تحليل أداء الشفرات باستخدام برامج المحاكاة التقليدية وتحليلها ضمن بيئة محاكاة تدفقية فقط واعتماداً على الدراسات السابقة سننمذّن نظرية BEM من أجل استخراج البارامترات الأيروديناميكية [7] لكن سيتم تصميم البروفائل الهوائي وتحليله باستخدام Qblade الذي يتيح دراسة تفاعلية بين الشكل الهندسي وزاوية الهجوم ومعاملات الأداء مثل C_p مما يوفر نظرة ديناميكية أكثر دقة على الأداء الهوائي للشفرة في ظروف تشغيل مختلفة كما ركز هذا البحث على دراسة تأثير الناشر بشكل موسع باستخدام Solid Works وربط طاقة الرياح المستخلصة بمساحة دوار التوربين المحاط بنشر باستخدام EES مما أتاح تحليلاً متكاملاً يجمع بين التصميم والمحاكاة النظرية والحسابات البرمجية .

أهمية البحث وأهدافه :

تتمتع سوريا بإمكانات واعدة في مجال طاقة الرياح ، حيث تتوفر في العديد من المناطق الريفية سرعات رياح مناسبة لتوليد الكهرباء مما يسهم في تخفيف العبء عن الشبكة الكهربائية العامة ونظرا لأن القدرة الكهربائية الناتجة عن العنفات الريحية تعتمد بشكل كبير على سرعات الرياح فإن تحقيق أقصى استفادة منها يشكل تحدياً تقنياً ، ومن هنا تبرز أهمية الخصائص الأيروديناميكية للعنفات في تحسين أدائها .

يهدف هذا البحث إلى تصميم ومحاكاة عنفة ريشية باستخدام Qblade و Solid Works مع دراسة تأثير الناشر الهوائي في زيادة سرعة الرياح الداخلة للتوربين وبالتالي تحسين كفاءته كما تم إعداد نموذج باستخدام برنامج EES لحساب الطاقة المستخلصة من الرياح وربطها بخصائص التصميم الأيروديناميكي .

طرائق البحث ومواده :

تم اعتماد مجموعة من البرمجيات والنماذج العددية لتحليل وتصميم توربين رياح صغير وذلك بهدف تحسين الأداء الأيروديناميكي واستخلاص طاقة أكبر من الرياح وتمثلت خطوات العمل كالتالي :

تم استخدام برنامج Qblade لتصميم شفرات التوربين اعتمادا على خصائص أيروديناميكية دقيقة وتم اختيار بروفيل جناح (Naca0012) وتحديد عدد الشفرات وطولها مع دراسة تأثير كل من نصف القطر الطرفي (Rtip)

ونصف القطر الجذري (Rhub) وتم بناء نموذج ثلاثي الأبعاد للناشر باستخدام Solid Works وفق نسب تصميمية مأخوذة من دراسات مرجعية وأجري تحليل تدفق الهواء حول الناشر باستخدام أداة Flow Simulation ضمن Solid Works وذلك لمقارنة مسارات الهواء بين التوربين التقليدي والمزود بناشر وتم استخدام برنامج EES لإنشاء نموذج عددي لحساب الطاقة المستخلصة من الرياح اعتمادا على المعادلات المرتبطة بمعامل القدرة Cp ومساحة الدوار وسرعة الرياح وأجري تحليل للتغير في الطاقة مع تغير مساحة الدوار بما يعكس تأثير التصميم على الأداء ويوضح الشكل (1) الخوارزمية المتبعة في برنامج Qblade .

يتضمن الحل العددي في هذه الدراسة حلا تكرارياً يتم فيه مساواة القوى المحسوبة باستخدام نظرية الزخم مع القوى المحسوبة باستخدام نظرية عنصر الجناح

إذ تعطي نظرية الزخم Momentum theory قوة محورية وعزم بناء على التغير في كمية الحركة [12] .

$$\text{القوة المحورية: } dF_x = \frac{1}{2} \rho v_1^2 [4\alpha(1 - \alpha)] 2\pi r dr \quad (1) \dots\dots\dots$$

$$\text{العزم: } dT = 4\alpha'(1 - \alpha) \rho v \Omega \pi r^3 dr \quad (2) \dots\dots\dots$$

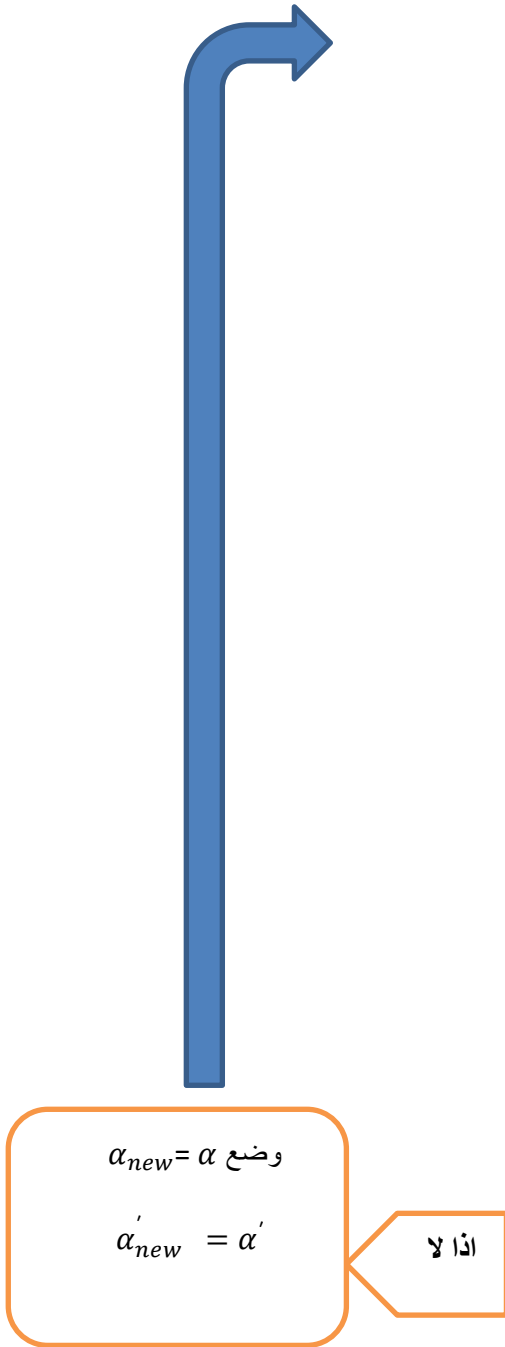
$$\text{حيث } \alpha : \text{ عامل الحث المحوري } \alpha = \frac{v_1 - v_2}{v_1}, \quad \alpha' : \text{ عامل الحث الزاوي } \alpha' = \frac{w}{2\Omega}$$

و تعطي نظرية عنصر الجناح أيضا قوة محورية وعزم بناء على القوى الهوائية على مقطع الجناح

$$\text{القوة المحورية: } dF_x = N_B \frac{1}{2} \rho w^2 (C_L \sin \beta + C_D \cos \beta) C d_r \quad (3) \dots\dots\dots$$

$$\text{العزم: } dT = N_B \frac{1}{2} \rho w^2 (C_L \cos \beta - C_D \sin \beta) C r d_r \quad (4) \dots\dots\dots$$

يتم الوصول إلى الحل عندما تتساوى القوى المحسوبة من الطريقتين مما يؤكد استقرار التصميم وتحسين الأداء الهوائي.



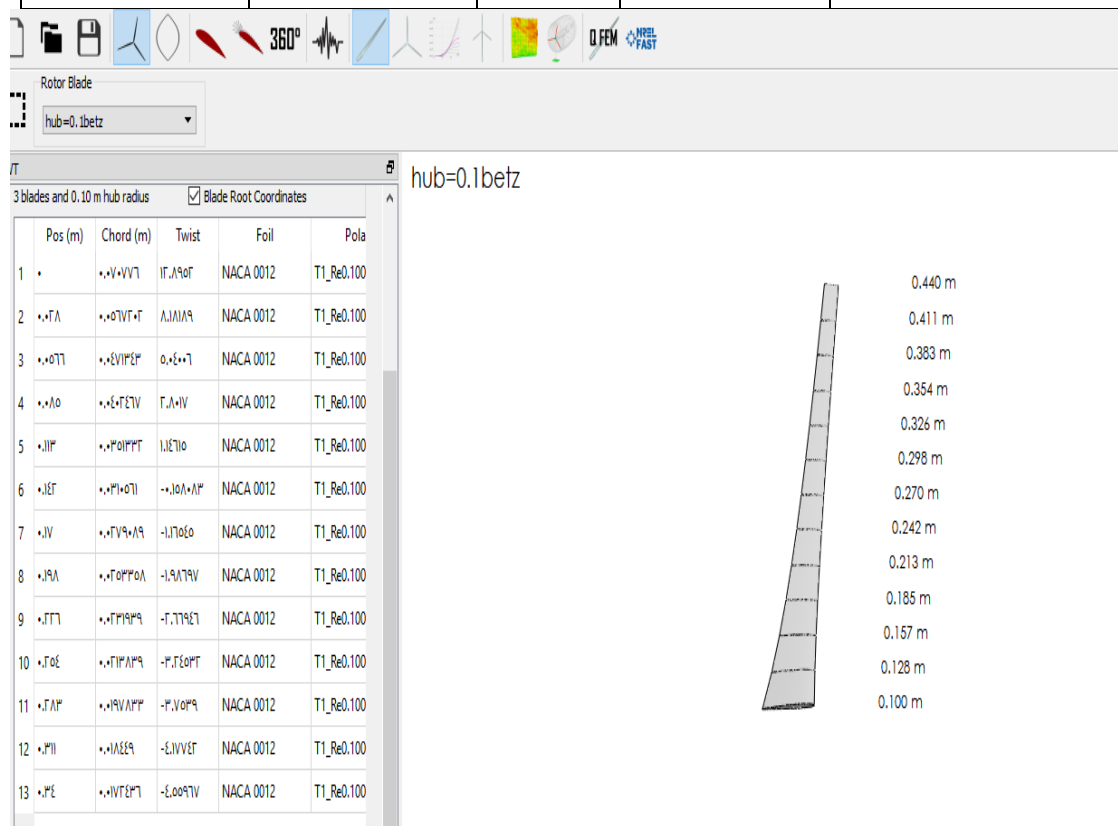
الشكل (1) خوارزمية الحل التكراري

النتائج والمناقشة :

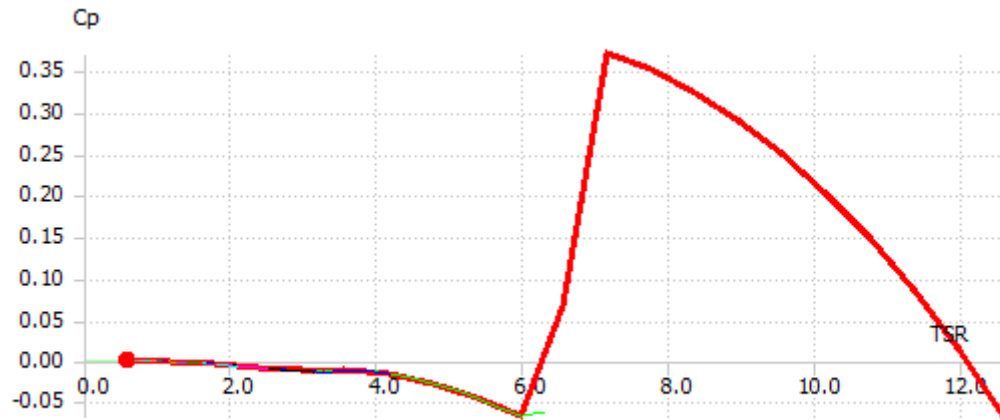
تم تصميم شفرات دوار التوربين الريحي باستخدام البروفائل Naca0012 الذي يتميز بسمك أقصى 12% ولا يملك انحناء فيجعل توزيع الضغط حول الجناح متوازن وهذا يساعد في إنتاج رفع مستقر في جميع الزوايا المختلفة، وبالاعتماد على خوارزمية BEM و على بارامترات التصميم الموضحة في الجدول (1) أظهرت النتائج أن القيمة العظمى لمعامل القدرة بلغت $C_p = 0.51$ عند سرعة رياح مقدارها $V=12\text{m/s}$ ونسبة سرعة طرفية $\text{TSR} = 7$ ونصف قطر طرفي $R_{\text{tip}}=0.34\text{m}$ ونصف قطر الجذر $R_{\text{hub}}= 0.1\text{m}$ وعدد شفرات $NB=4$ وزاوية هجوم 5° التي حققت أعلى نسبة ل C_i/C_d والتي تعتبر مقياس لتحقيق أفضل توازن بين الرفع والسحب على خلاف الدراسات الأخرى [9] التي اعتمدت زاوية الهجوم بناء على معامل الرفع C_i فقط ويوضح الشكل (2) التصميم الهندسي لشفرات التوربين باستخدام Qblade كما يوضح الشكل (3) نتائج تحليل الأداء الديناميكي الهوائي بما في ذلك تطور معامل القدرة للتصميم المقترح

الجدول (1) بارامترات تصميم العنفة

Reynolds number	Number of blade elements	TSR	V(m/s)	Number of blade
100000	13	1_15	4_25(m/s)	3-4-6

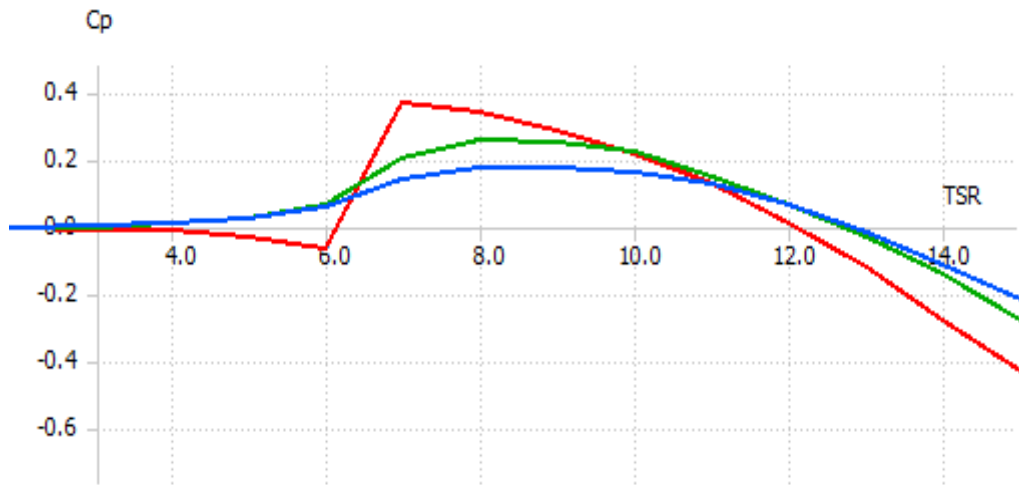


الشكل (2) التصميم الهندسي للعنفة الريحية ذات البروفائل Naca0012



الشكل (3) معامل القدرة Cp مقابل نسبة سرعة الطرف TSR لزاوية ميل 0°

تم تحليل تأثير كل من نصف القطر الجذري Rhub ونصف القطر الطرفي Rtip على الأداء الهوائي للتوربين حيث تظهر النتائج التالية أن زيادة Rhub تؤدي إلى انخفاض معامل القدرة Cp فيما تؤدي زيادة Rtip إلى تحسين واضح في قيمة Cp كما هو موضح في الشكلين (4) و (5) على التوالي .

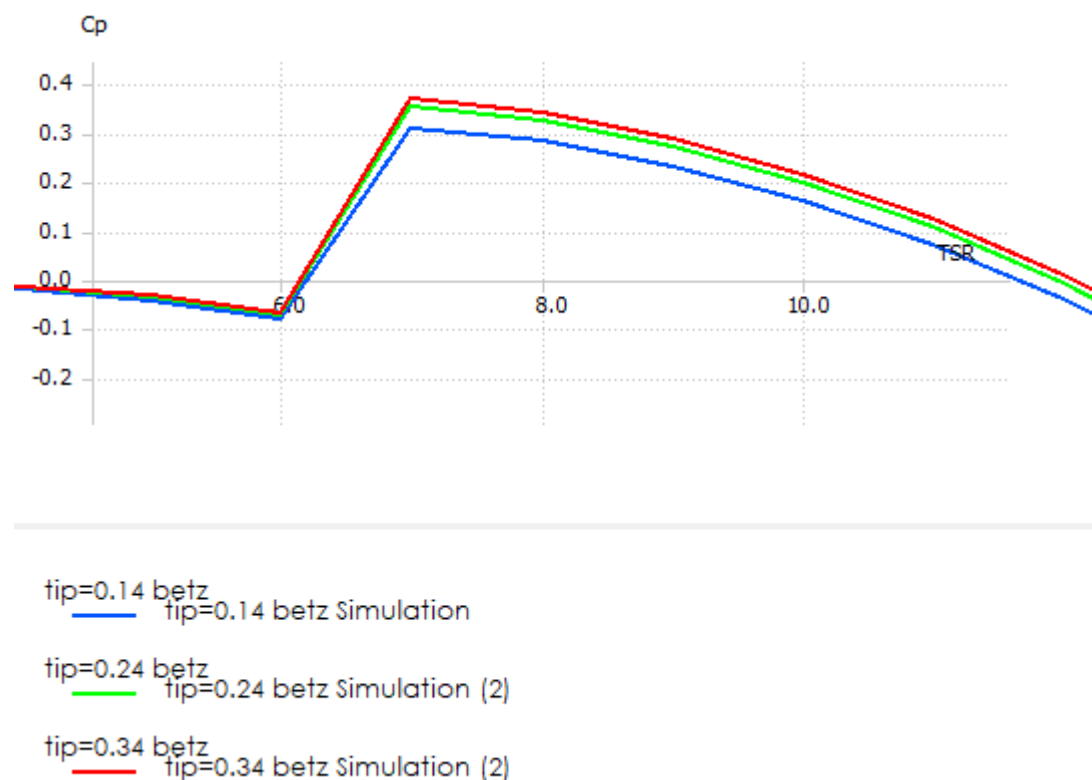


hub=0.1betz
hub=0.1betz Simulation

hub=0.4betz
hub=0.4betz Simulation

hub=0.6betz
hub=0.6betz Simulation

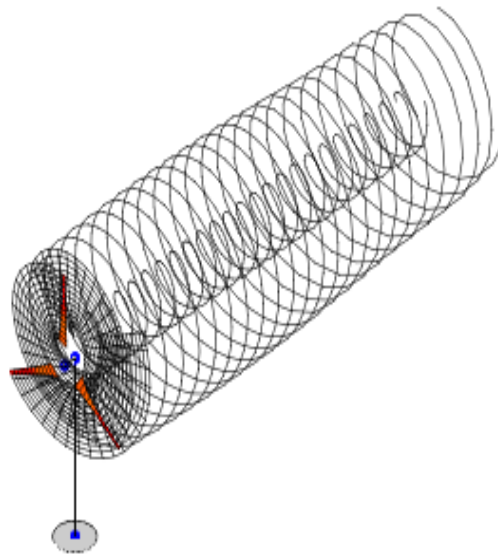
الشكل (4) محاكاة الدوار باستخدام نظرية BEM عند أنصاف قطر للجذر مختلفة



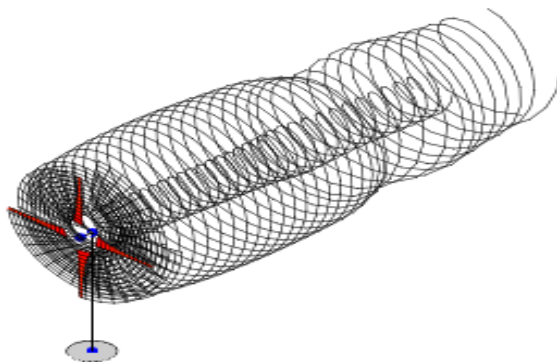
الشكل (5) محاكاة الدوار باستخدام نظرية BEM عند أنصاف قطر للتوربين مختلفة
تم اعتماد مجموعة من البارامترات الثابتة الموضحة في الجدول (2) بعملية المحاكاة عند مقارنة التوربين عند عدد شفرات مختلفة وتمت الدراسة باستخدام وحدة Nonlinear Lifting Line Simulations في Qblade

جدول (2) معاملات التشغيل

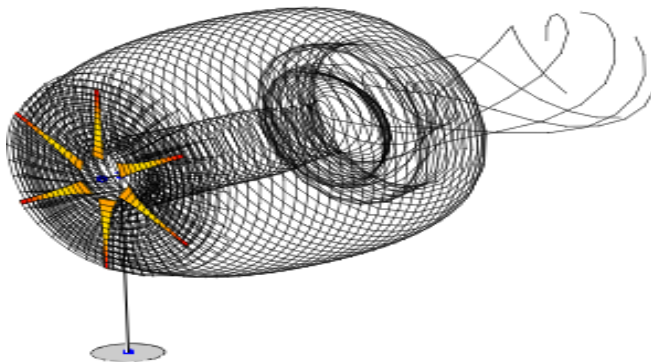
Hub-Height	Rtip	R-hub	Inflow Speed	Tip Speed Ratio	Type
0.878m	0.34	0.1	12 m/s	7	Up wind



Time: 0.32837 s
 Power: 0.0619884 kW
 Cp: 0.0967345
 V_in @ hub: 12 m/s



Time: 0.32837 s
 Power: 0.328812 kW
 Cp: 0.51312
 V_in @ hub: 12 m/s



Time: 0.32837 s
 Power: 0.23161 kW
 Cp: 0.361433
 V_in @ hub: 12 m/s

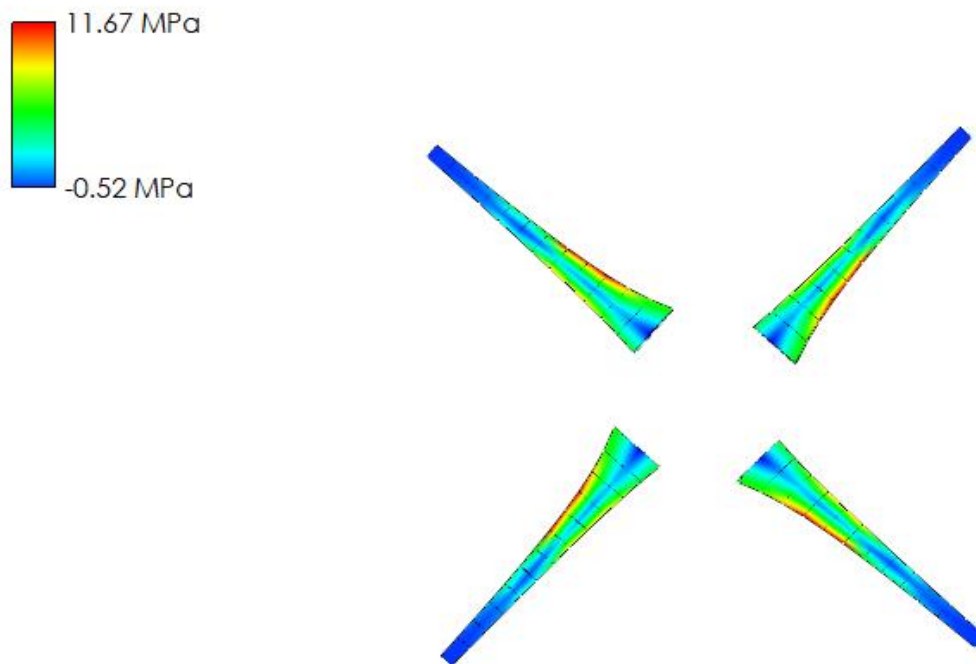
الشكل (6) وحدة محاكاة الدوامات الحلزونية في عدد أجنحة 3,4,6

ويتضح من الجدول (3) أن التوربين المزود بثلاث شفرات قد أظهر أقل أداء من حيث الطاقة المستخرجة ويعزى ذلك إلى ضيق المساحة التي يقطعها الهواء وبالتالي انخفاض كمية الهواء المتدفقة عبر التوربين و عند استخدام أربع شفرات ازدادت مساحة التقاط الهواء مما أدى لتحسين قدرة التوربين أما في حالة ست شفرات سيحدث تشبع هوائي أمام التوربين ويزداد عدد الدوامات الحلزونية كما هو موضح في الشكل (6) مما يعيق حركة الرياح بشكل حر ويؤدي لارتفاع الفقد في الذيل وانخفاض الأداء الكلي .

جدول (3) تأثير عدد الشفرات على معامل القدرة و الطاقة

NB=3	NB=4	NB=6
Cp=0.096	Cp=0.51	Cp=0.361
Power=0.0619 Kw	Power=0.32 Kw	Power=0.23 Kw

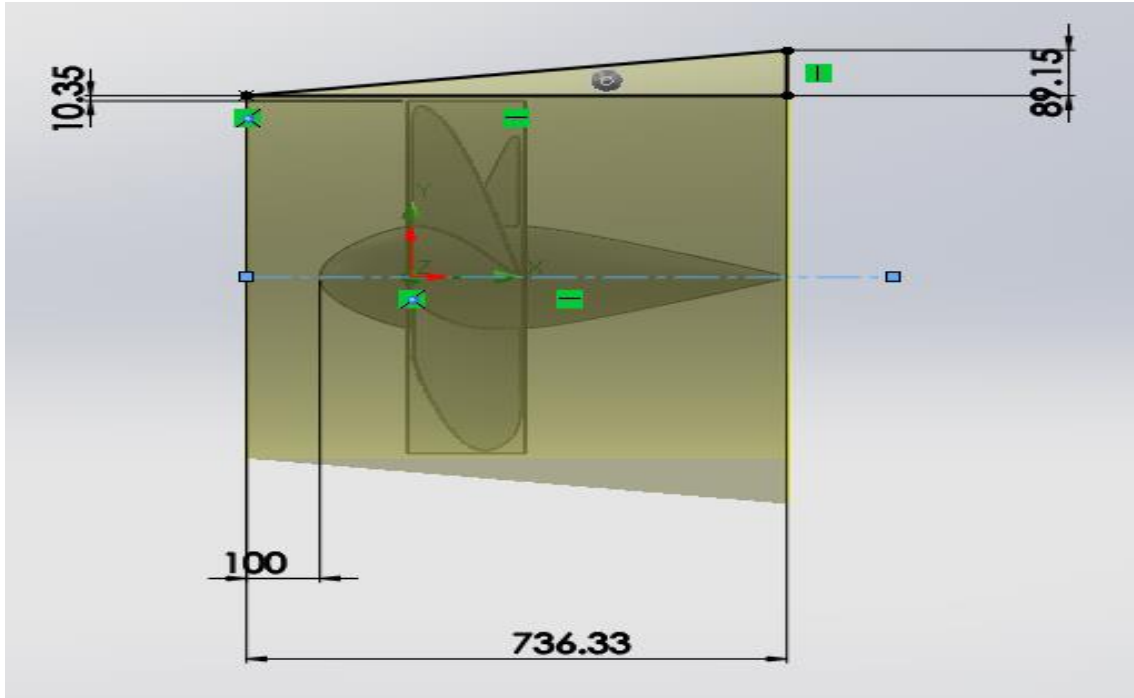
كما تم إجراء محاكاة للتحميل الستاتيكي بقيمة ابتدائية للتحميل 1N باستخدام وحدة structural blade design and analysis ،وتبين النتائج أن التحميل الأكبر بلغ 11.67MPa يتمركز عند الحواف الجانبية للشفرات بنسبة منخفض جداً كما يبين الشكل (7).



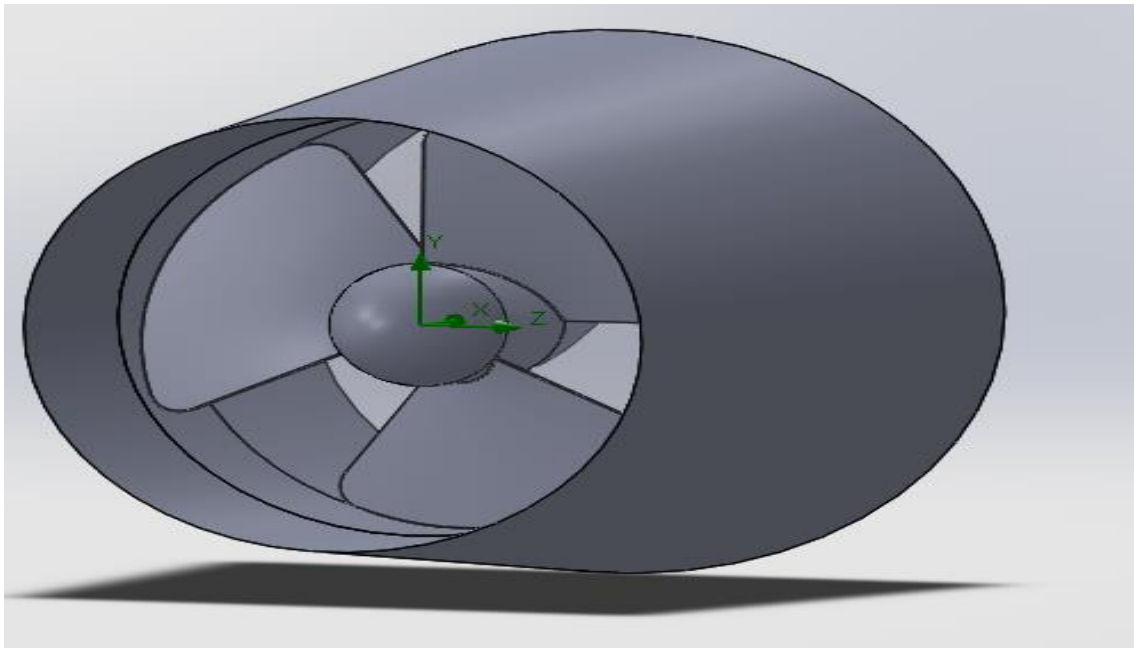
الشكل (7) تحليل الإجهاد على التوربين

تم بعد ذلك دراسة تأثير إضافة الناشر على تدفق الهواء لتوربين تقليدي إذ تم استخدام برنامج Solid Works لتصميم الناشر وفق أبعاد تصميمية مدروسة حيث بلغت نسبة قطر الفوهة إلى قطر الدوار $H/D=0.14$ ونسبة طول الناشر

إلى قطر الدوار $L/D=1.03$ ويوضح الشكل (8) تصميم الناشر 2D والشكل (9) تصميم الناشر 3D على برنامج Solid Works



الشكل (8) تصميم 2D للناشر



الشكل (9) تصميم 3D للناشر

أظهر هذا التصميم قدرة الناشر على تعزيز الأداء الهوائي بشكل واضح حيث تم الوصول إلى معامل قدرة $C_p=2.15$ $C_p(\text{betz}) >$ وتم احتساب هذا المعامل باستخدام المعادلة (5) [11]:

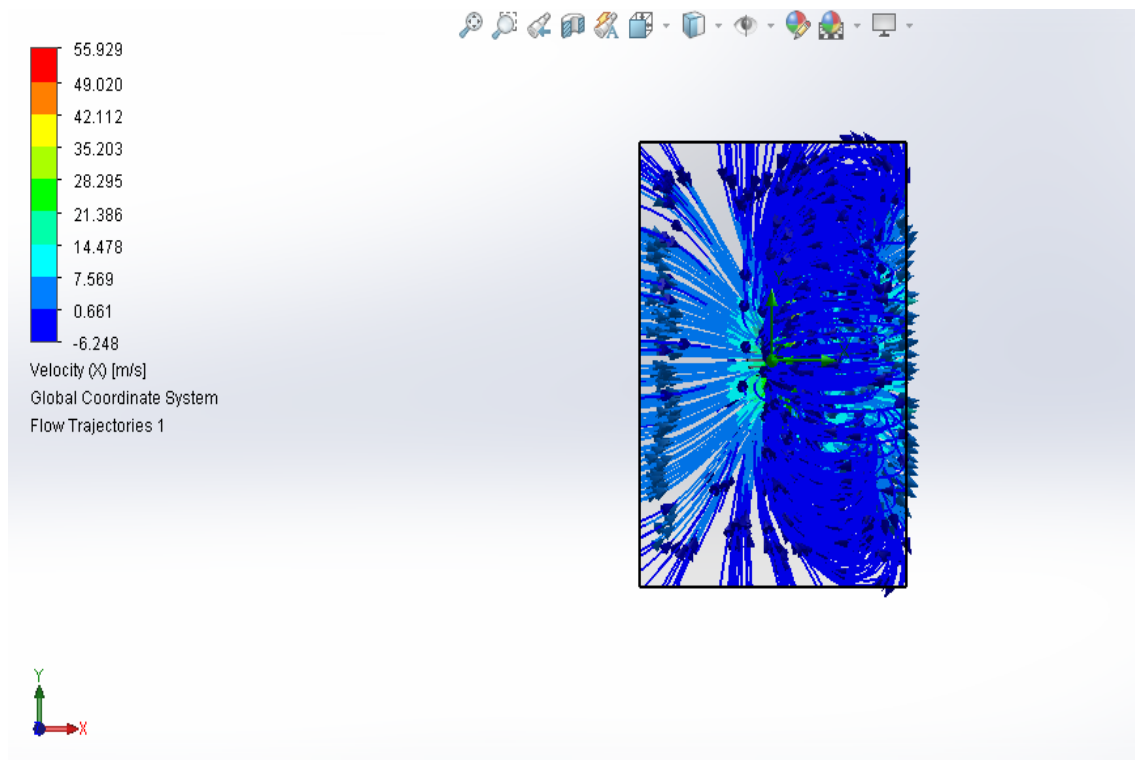
$$C_p = \beta \gamma \left(\frac{16}{27} \right) \quad (5)$$

حيث تمثل β نسبة المساحة وتحسب وفق المعادلة (6) أما γ نسبة الضغط الخلفي تحسب وفق المعادلة (7)

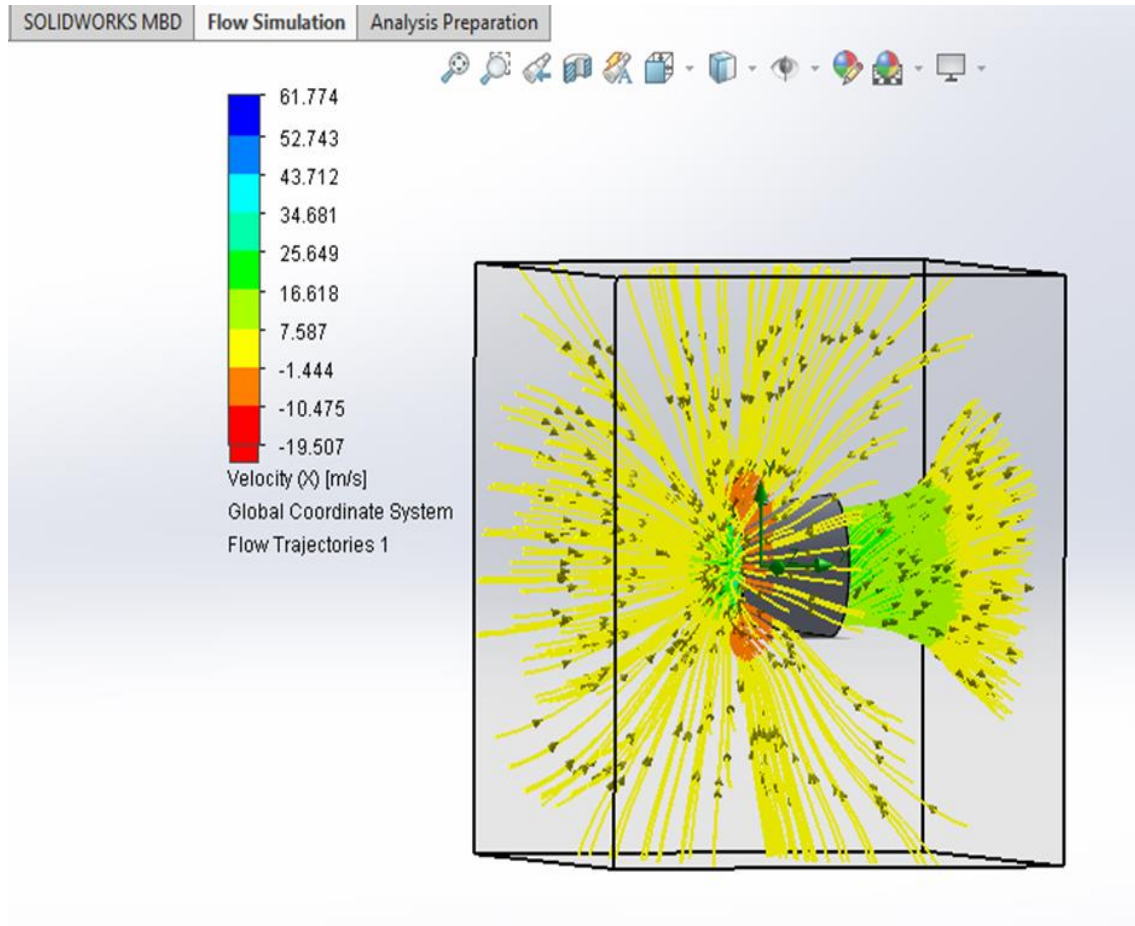
$$\beta = \frac{A_{out}}{A_{rotor}} \quad (6)$$

$$\gamma = \frac{U_{out}}{U_{\infty}} \quad (7)$$

تم إجراء محاكاة لسرعة تدفق الرياح باستخدام أداة Flow Simulation في برنامج Solid Works بهدف المقارنة لأداء توربين تقليدي مع التوربين المعزز بناشر حيث تم اعتماد نموذج الاضطراب $K - \epsilon$ لوصف تأثير الاضطرابات في الهواء على الجريان وتم استخدام الشبكة Mesh لتقسيم المجال المحيط بالتوربين لخلايا صغيرة وتمت المحاكاة على مستوى Level 3 وعند زيادة مستوى الشبكة إلى Level 4 لم تتغير قيم السرعة وهذا يدل على استقلالية النتائج تجاه الشبكة المستخدمة ، ويوضح الشكلين (10) و (11) مسارات تدفق الهواء في كلا النموذجين إذ تظهر الألوان وفق المقياس الجانبي توزيع السرعة بال m/s حيث تشير الألوان الزرقاء إلى السرعات المنخفضة والألوان الحمراء للسرعات العالية وتظهر النتائج أن التوربين المعزز بناشر ساهم في تسريع دخول الهواء عند مدخل الناشر بالإضافة إلى تنظيم أفضل لمسارات التدفق وزيادة انسيابية الهواء عبر الدوار مقارنة بالتوربين التقليدي الذي ظهرت فيه مسارات تدفق غير منتظمة وأكثر اضطراباً حيث ازدادت سرعة الرياح من 14m/s إلى 25m/s أي ازدادت السرعة بمقدار 1.78 مرة.



الشكل (10) محاكاة التدفق flow simulation للتوربين التقليدي



الشكل (11) محاكاة التدفق flow simulation للتوربين المعزز بناشر

بعد الانتهاء من التصميم على برنامج Solid Works تم استخدام برنامج EES لإنشاء نموذج برمجي الموضح في الشكل (12) لحساب الطاقة المستخلصة من الرياح عند قيم مختلفة لمساحة الدوار وفق الجدول (4) ويظهر الشكل (13) العلاقة الطردية بين مساحة الدوار والطاقة المستخلصة .

Equations Window

$$p = 1/2 \cdot \rho \cdot A_t \cdot v^3 \cdot c_p$$

$$\rho = 1.225 [\text{kg/m}^3]$$

$$A_t = 3.14 \cdot r^2 [\text{m}^2]$$

$$r = 0.34 [\text{m}]$$

$$v = 12 [\text{m/s}]$$

$$c_p = \mu \cdot \xi \cdot (16/27)$$

$$\mu = v_{\text{out}} / v$$

$$v_{\text{out}} = v \cdot (1 - \alpha)$$

$$\alpha = 1/3$$

$$\xi = A_{\text{out}} / A_t$$

$$A_{\text{out}} = 3.14 \cdot r_{\text{out}}^2 [\text{m}^2]$$

$$r_{\text{out}} = 0.893 [\text{m}]$$

Formatted Equations

$$p = 1/2 \cdot \rho \cdot A_t \cdot v^3 \cdot c_p$$

$$\rho = 1.225 [\text{kg/m}^3]$$

$$A_t = 3.14 \cdot r^2 [\text{m}^2]$$

$$r = 0.34 [\text{m}]$$

$$v = 12 [\text{m/s}]$$

$$c_p = \mu \cdot \xi \cdot \frac{16}{27}$$

$$\mu = \frac{v_{\text{out}}}{v}$$

$$v_{\text{out}} = v \cdot (1 - \alpha)$$

$$\alpha = 1/3$$

$$\xi = \frac{A_{\text{out}}}{A_t}$$

$$A_{\text{out}} = 3.14 \cdot r_{\text{out}}^2 [\text{m}^2]$$

$$r_{\text{out}} = 0.893 [\text{m}]$$

Solution

Unit Settings: SI C Pa kJ mass rad

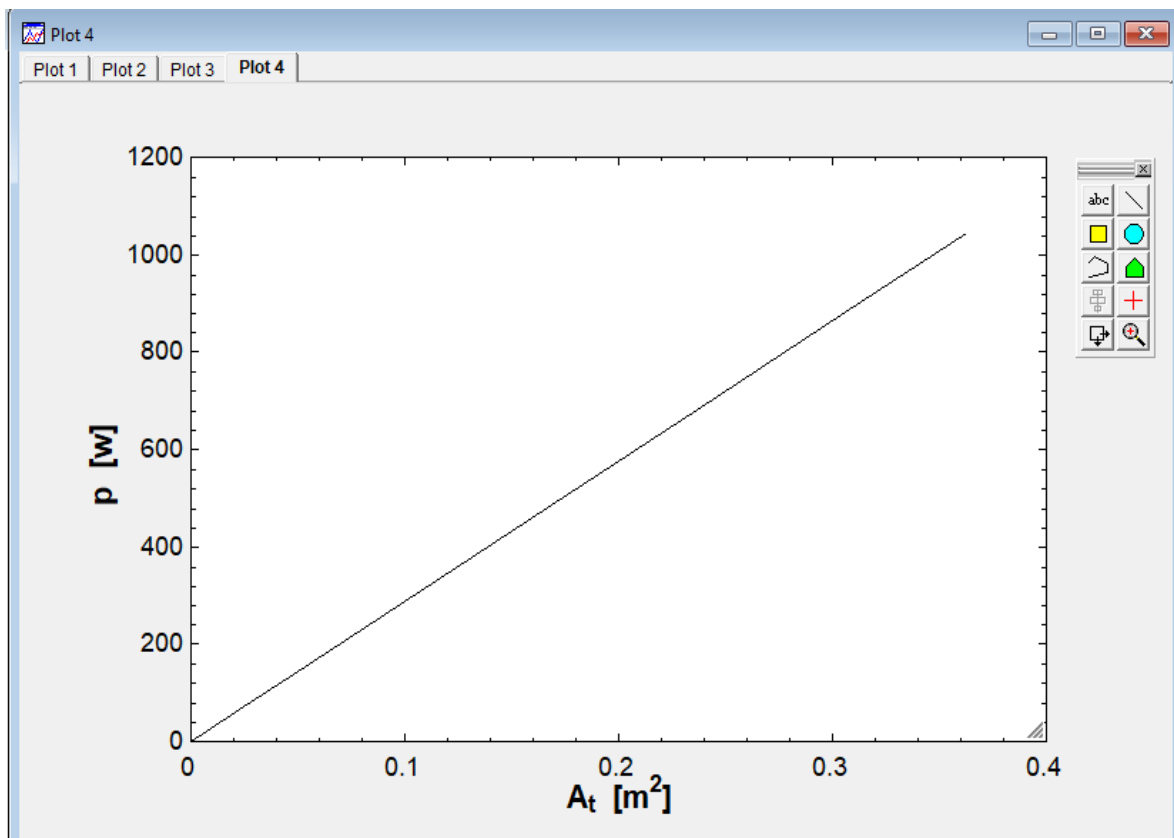
$\alpha = 0.3333$	$A_{\text{out}} = 2.504 [\text{m}^2]$	$A_t = 0.363 [\text{m}^2]$
$c_p = 2.725$	$\mu = 0.6667$	$p = 1047 [\text{w}]$
$r = 0.34 [\text{m}]$	$\rho = 1.225 [\text{kg/m}^3]$	$r_{\text{out}} = 0.893 [\text{m}]$
$v = 12 [\text{m/s}]$	$v_{\text{out}} = 8 [\text{m/s}]$	$\xi = 6.898$

الشكل (12) إنشاء نموذج برمجي لحساب الطاقة المستخلصة من الرياح

تمت دراسة تأثير نصف القطر r على الاستطاعة المستخرجة p ضمن مجال $0.01\text{m}_-0.34\text{m}$ وقد أظهرت النتائج أن القدرة تزداد مع زيادة القطر نتيجة زيادة مساحة الدوار إلا أن بعد حد معين لا تكون الزيادة فعالة أي لا تتحسن الاستطاعة بشكل يتناسب مع الزيادة بالكلفة والوزن .

الجدول (4) حساب الطاقة عند قيم مختلفة لمساحة الدوار

1..10	1 A_t [m ²]	2 p [w]	3 r [m]
Run 1	0.000314	0.904	0.01
Run 2	0.007168	20.63	0.04778
Run 3	0.02298	66.17	0.08556
Run 4	0.04776	137.5	0.1233
Run 5	0.0815	234.6	0.1611
Run 6	0.1242	357.6	0.1989
Run 7	0.1759	506.3	0.2367
Run 8	0.2365	680.9	0.2744
Run 9	0.3061	881.2	0.3122
Run 10	0.363	1045	0.34



الشكل (13) مخطط يظهر العلاقة بين مساحة الدوار والطاقة

النتائج والمناقشة:

حقّق التوربين ذو أربعة شفرات أعلى قدرة بلغت 0.32kw وأعلى معامل قدرة بلغ 0.51 وهو قريب من حد بيتز وهذا يعني أن التصميم المستخدم للتوربين (شكل الشفرات ، عدد الشفرات ، نصف قطر العنفة R_{tip} ، نصف قطر الجذر R_{hub}) كان فعالاً و يشير لكفاءة التصميم والتحسينات الهندسية التي طبّقت مقارنة مع أبحاث سابقة حيث اعتمدت بعض الدراسات تحديد زاوية الهجوم بناء على معامل الرفع C_l فقط [9] بينما اعتمدت دراسات أخرى [13] على نسبة C_l/C_d دون ربط هذه القيم بأداء التوربين ومعامل القدرة C_p بينما في هذه الدراسة تم اختيار زاوية الهجوم بناء على نسبة C_l/C_d لتحقيق أفضل أداء للجناح ولمعامل القدرة وإن استخدام الناشر وفق الأبعاد الهندسية L/D و H/D ساهم في زيادة سرعة الهواء الداخلة للتوربين بمقدار 1.78 مرة مقارنة بسرعة الرياح الحرة بينما أظهرت دراسات مثل [14] أن الزيادة في السرعة نتيجة إضافة الناشر بلغت حوالي 1.52 مرة وهذا يشير لفعالية التصميم الهندسي للناشر المستخدم في تحقيق تسريع أكبر لجريان الهواء عبر التوربين مما ينعكس على زيادة معدل تدفق الكتلة الهوائية عبر مستوى الدوار وبالتالي رفع الطاقة المستخرجة ومعامل القدرة إذ بلغ 2.62.

الاستنتاجات والتوصيات:

الاستنتاجات:

- ❖ زيادة نصف القطر R_{tip} يزيد معامل الاستطاعة C_p ويزيد العزم المطبق dT على الجناح وهذه العلاقة منطقية لأن العزم مرتبط بنصف القطر والاستطاعة بمربع نصف القطر
- ❖ الزيادة في نصف قطر الجذر R_{hub} يؤدي لإنقاص الخصائص الأيروديناميكية C_p والعزم dT وهذا راجع لنقصان طول الجناح .
- ❖ التوربين ذو أربع شفرات حقق أعلى قدرة 0.32KW وأعلى معامل قدرة 0.51 مقارنة بتوربين ذو ثلاث أو ست شفرات
- ❖ زيادة عدد الأجنحة يزيد عدد الدوامات الحلزونية مما يرفع الفقد في الذيل ويقلل الكفاءة الهوائية
- ❖ تم تحديد أعلى قيم للإجهاد على أطراف الشفرات 11.67MPa بينما كانت القيم أقل عند الجذر وهذا التوزيع منطقي لأن أطراف الشفرات تتعرض لقوى رفع وسحب أعلى بسبب السرعة الطرفية الأكبر رغم أن العزم ينتقل للجذر
- ❖ العلاقة بين زاوية الميل ومعامل القدرة غير خطية و وجد أفضل أداء عند زاوية 0° و $TSR=7$ حيث زيادة زاوية الميل تقلل من قدرة التوربين على استغلال الرياح
- ❖ تم تصميم الناشر بأبعاد $H/D=0.14$, $L/D=1.03$ وكانت تنتمي للمجال التصميمي الفعال حسب الدراسات المرجعية
- ❖ إضافة الناشر يخلق مسارات هواء منتظمة مقارنة بالتوربين التقليدي وسرعة دخول هواء أعلى 25m/s مقابل 14m/s فقط بالإضافة لزيادة معدل إنتاج الطاقة حيث تجاوز حد بيتز $C_p = 2.62 > 0.59$ مما يشير إلى كفاءة عالية
- ❖ من خلال برنامج EES تم حساب الطاقة المستخلصة و كانت العلاقة بينها وبين مساحة الدوار طردية
- ❖ استخدام برنامج Qblade وقرّ تصوراً شاملاً لأداء التوربين هوائياً و تقييم فعالية التصميم من خلال C_p واستخراج زاوية الهجوم بناء على النسبة C_l/C_d

التوصيات:

- استكشاف واختبار مواد خفيفة الوزن وذات قوة تحمل عالية لتحسين كفاءة الشفرات وتقليل الفقد الناتج عن الاحتكاك مما يساهم في رفع أداء التوربين وتقليل الكلفة
- دمج الذكاء الاصطناعي لتحليل البيانات وتوقع الأداء للتصميمات المختلفة مما يسرّع تحسين النماذج
- تحليل تأثير تصميم الشفرة على البيئة المحيطة بما في ذلك الضوضاء وتأثيرات الحركة على الحياة البرية
- من المهم إجراء دراسات طويلة الأمد لجمع بيانات الأداء تحت ظروف تشغيل مختلفة مما يساعد في تحسين التصميم وزيادة موثوقيته

References:

- [1]. N. Tenguria, N. D. Mittal, and S. Ahmed, "Investigation of blade performance of horizontal axis wind turbine based on blade element momentum theory (BEMT) using NACA airfoils," *International Journal of Engineering, Science and Technology*, vol. 2, no. 12, 2010.
- [2]. M. Eswaran, A. Dyson Bruno, and P. Emmanuel Nicholas, "Aerodynamic design and analysis of horizontal axis wind turbine (HAWT) blades using CFD," *International Journal of Engineering Research & Technology (IJERT)*, vol. 5, no. 7, 2017.
- [3]. F. Arifin et al., "Modelling design diffuser horizontal axis wind turbine," in *5th FIRST T1 T2 2021 International Conference (FIRST-T1-T2 2021)*, Atlantis Press, 2022.
- [4]. S. A. Jafari and B. Kosasih, "Flow analysis of shrouded small wind turbine with a simple frustum diffuser with computational fluid dynamics simulations," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 125, pp. 102-110, 2014.
- [5]. A. Dilimulati, T. Stathopoulos, and M. Paraschivoiu, "Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 175, pp. 179-192, 2018.
- [6]. N. A. Pambudi et al., "The performance of shrouded wind turbine at low wind speed condition," *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 260-265, 2019.
- [7]. R. L. U. de Freitas Pinto and B. P. F. Gonçalves, "A revised theoretical analysis of aerodynamic optimization of horizontal-axis wind turbines based on BEM theory," *Renewable Energy*, vol. 105, pp. 625-636, 2017.
- [8]. S. Mathew, *Wind energy: fundamentals, resource analysis and economics*, vol. 1. Berlin: Springer, 2006.
- [9]. M. H. Khalid, "CFD analysis of NACA 0012 aerofoil to investigate the effect of increasing angle of attack on coefficient of lift and coefficient of drag," *Journal of Studies in Science and Engineering*, vol. 2, no. 1, pp. 74-86, 2022.
- [10]. J. Carroll, "Diffuser augmented wind turbine analysis code," Diss., University of Kansas, 2014.
- [11]. G. J. van Bussel, "The science of making more torque from wind: Diffuser experiments and theory revisited," in *Journal of Physics: Conference Series*, vol. 75, no. 1, p. 012010, 2007.
- [12]. G. Ingram, "Wind turbine blade analysis using the blade element momentum method. version 1.1," Durham University, Durham, 2011.
- [13]. E. F. Alajmi and H. A. Alajmi, "CFD analysis of NACA 0012 aerofoils: Examining the impact of varied angles of attack on lift and drag coefficients," *International Journal of Innovative Science and Research Technology*, vol. 9, no. 9, 2024.

[14]. A. Dilimulati, T. Stathopoulos, and M. Paraschivoiu, "Wind turbine designs for urban applications: A case study of shrouded diffuser casing for turbines," *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics*, vol. 175, pp. 179-192, 2018.

قائمة الرموز :

الرمز	دلالاته	وحدته
C_p	معامل القدرة	[-]
P	الاستطاعة	[w]
ρ	الكتلة الحجمية للهواء	[Kg/m ³]
A_t	مساحة الدوار	[m ²]
CL	معامل الرفع	[-]
C_d	معامل السحب	[-]
R_{tip}	نصف قطر العنفة	[m]
R_{hub}	نصف قطر الجذر	[m]
α	عامل الحث المحوري	[-]
α'	عامل الحث الزاوي	[-]
β_P	زاوية الميل	[deg]
ϕ	زاوية الرياح النسبية	[deg]
λ_r	السرعة النسبية لحافة الشفرة	[-]
Ω	السرعة الزاوية للنظام	[rad/s]
v_{∞}	سرعة الرياح الحرة	[m/s]
v_1	سرعة الهواء قبل الدخول للتوربين	[m/s]
N_B	عدد أجنحة الدوار	[-]
v_2	سرعة الرياح عند مستوى الدوار	[m/s]
C	طول الشفرة	[m]

قائمة الاختصارات :

TSR	Tip speed ratio
BEM	Blade element momentum
DAWT	Diffuser augmented wind turbine
HAWT	Horizontal axis wind turbine
EES	Engineering equation solver