

دراسة تأثير زاوية ميل الشفرات (β) على منحنيات الأداء الميكانيكي للعنفة الريحية من خلال المحاكاة الحاسوبية باستخدام (Matlab)

د. فادي إسكندر علي*

د. عزيز رزق الحزوري**

(تاريخ الإيداع ٢٠٢٥/١٠/١ . قُبل للنشر في ٢٠٢٥/١٢/١٧)

□ ملخص □

تقدم هذه الدراسة محاكاة حاسوبية لدراسة تأثير زاوية ميل الشفرات β على أداء أنظمة العنفات الريحية باستخدام برنامج Matlab/Simulink. من خلال دراسة أهم مخرجات الأداء الميكانيكي للعنفة الريحية والتي تتمثل بمعامل الأداء C_p واستطاعة الخرج و العزم الميكانيكي للدوار. تشير نتائج المحاكاة إلى التأثير الوثيق بين قيم β ومؤشرات الأداء للعنفة الريحية. حيث تبين من خلال المحاكاة أن زيادة زاوية ميل الشفرات تؤدي لتقليل معامل الاستطاعة وبخاصة عند السرعات الأعلى للرياح. بالإضافة لذلك يقل كل من استطاعة الخرج والعزم الميكانيكي عند زيادة زاوية ميل الشفرات. بشكل عام، القيمة العظمى لاستطاعة العنفة الريحية تتحقق عند قيم محددة من سرعة الرياح و λ التي توافق سرعة دوران محددة لدوار العنفة وقيمة عظمى لمعامل الأداء C_p .
كلمات مفتاحية: زاوية ميل الشفرات، معامل الاستطاعة، عنفة ريحية، العزم الميكانيكي

*أستاذ مساعد- قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة- كلية الهندسة التقنية-جامعة طرطوس.

**دكتور- قسم هندسة تقانات الطاقات المتجددة- كلية الهندسة التقنية-جامعة طرطوس.

Studying the effect of blade pitch angle (β) on the mechanical performance curves of a wind turbine using Matlab simulation

Dr. Eng. Fadi Al*

Dr. Eng. Aziz Al-Hazouri**

(Received 1/10/2025 . Accepted 17/12/2025)

□ ABSTRACT □

This study presents a computer modeling and simulation to investigate the effect of the blade pitch angle (β) on the performance of wind turbine systems using Matlab/Simulink. The most important mechanical performance outcomes of the wind turbine were studied, namely the coefficient of performance (C_p), output power, and rotor torque. The simulation results demonstrated a close relationship between β values and the wind turbine performance parameters. The most important results of the computer simulations indicate that increasing the blade pitch angle leads to a decrease in the power coefficient, especially at higher wind speeds. Furthermore, both the output power and mechanical torque decrease with increasing blade pitch angle. In general, the maximum power output of a wind turbine is achieved at specific values of wind speed and (λ), which correspond to a specific rotational speed of the turbine rotor and a maximum performance coefficient (C_p).

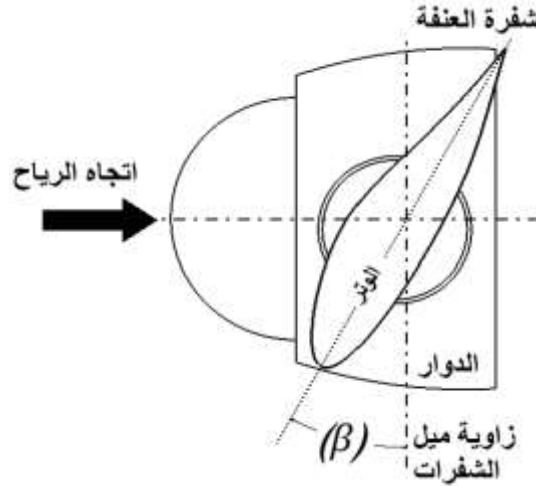
Keywords: Blade pitch angle, power coefficient, wind turbine, mechanical torque

*Assistant professor, Department of Renewable Energy Technologies Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartous University.

**Dr, Department of Renewable Energy Technologies Engineering, Faculty of Technical Engineering, Tartous University.

١-مقدمة

تُعَدُّ طاقة الرياح عنصرًا أساسيًا في قطاع الطاقة المتجددة، ومع تزايد الجهود المبذولة للحد من انبعاثات الكربون، أصبح تحسين أداء توربينات الرياح أولوية قصوى. صُممت توربينات الرياح لتحويل الطاقة الحركية للرياح إلى طاقة ميكانيكية، وتلعب زاوية ميل شفرات التوربين دورًا حاسمًا في تحسين كفاءة عملية التحويل هذه [1]. تتكون توربينات الرياح عادةً من دوار ذي شفرات، وقمرة تحتوي على المولد، ونظام تحكم في زاوية الميلان للشفرات. صُممت شفرات الدوار لالتقاط طاقة الرياح، وحُيِّنت ديناميكيتها الهوائية للعمل بكفاءة عند سرعات رياح محددة. يضبط نظام التحكم في الميلان زاوية الشفرات لتنظيم سرعة الدوار والطاقة الناتجة، مما يساعد على منع التلف الميكانيكي في ظروف الرياح العاتية. مع ازدياد سرعة الرياح، يجب على التوربين ضبط زاوية الميلان لتجنب السرعة الزائدة التي قد تؤدي إلى عطل ميكانيكي. من ناحية أخرى، في سرعات الرياح المنخفضة، يُساعد ضبط زاوية الميلان التوربين على التقاط المزيد من الطاقة من خلال زيادة المساحة السطحية الفعالة للريش [2]. تعتمد الطاقة التي يولدها توربين الرياح بشكل كبير على زاوية الميلان. مع ازدياد سرعة الرياح، غالبًا ما يُضبط ميل شفرات التوربين لتقليل الزاوية، مما يقلل الرفع الديناميكي الهوائي، وبالتالي سرعة الدوار. تُساعد آلية التحكم هذه على الحفاظ على ثبات خرج الطاقة، وتمنع الأضرار الناجمة عن السرعات الزائدة للدوار. على العكس، عند سرعات الرياح المنخفضة إلى المتوسطة، تُضبط زاوية الميل لزيادة الرفع الديناميكي الهوائي، مما يُعزز التقاط الطاقة إلى أقصى حد [3]. أُجريت تجارب على تشغيل نموذج توربين رياح صغير بزاوية ميل شفرات قابلة للتعديل وطرق التحكم الأمثل بها. تبين نتائج القياسات التي أُجريت لهندسة الشفرات المختارة بأن الطرق العملية للتحكم في توربينات الرياح الكبيرة ليست مثالية للتوربينات الصغيرة والصغيرة جدًا ويمكن أن يؤدي استخدام آلية بسيطة لتغيير زاوية ميل الشفرات اعتمادًا على سرعة دوران التوربين إلى زيادة كفاءة التوربين في نطاق أوسع من سرعات الرياح [4]. تؤثر زاوية الميل أيضًا على تحميل الشفرات، والذي يُشير إلى توزيع القوى الديناميكية الهوائية على الشفرات. يمكن أن تؤدي زوايا الميل غير الصحيحة إلى تحميل غير متساوٍ، مما يتسبب في تآكل غير متساوٍ للشفرات، وربما يقلل من عمر التوربين بسبب ظاهرة التعب [5]. يساعد الحفاظ على زاوية ميل مثالية على تقليل هذا التآكل ويحسن الكفاءة التشغيلية الإجمالية للتوربين. في الوضع المثالي، تكون الشفرات متساوية في الكتلة، وموقع مركز الثقل، والشكل، والبنية. ونتيجةً لذلك، تتقاطع محاور جذور الشفرات مع محور الدوار في نفس النقطة. تسمى الزاوية بين خط الوتر للشفرة بالنسبة لمستوى الدوران للشفرات بزاوية ميل الشفرات (Pitch angle) ورمزها (β) ، كما هو موضح في الشكل (1)، وهذه الزاوية تعتبر ضبط ميكانيكي يحدد الاتجاه الفيزيائي للشفرة مع اتجاه الرياح لتحقيق الأداء الأمثل للعنفة الريحية [6].

الشكل (١) زاوية ميل الشفرات (Pitch angle) ورمزها (β)

مما سبق، تُعدّ زاوية الميلان للشفرات عاملاً حاسماً في تحديد أداء توربينات الرياح، إذ تؤثر على إنتاج الطاقة وكفاءتها وعمر مكوناتها. ومن خلال تعديل زاوية الميلان للاستجابة لظروف الرياح المتغيرة، يُمكن للتوربينات زيادة التقاط الطاقة إلى أقصى حد مع تقليل الإجهاد الميكانيكي إلى أدنى حد. يقدم هذا البحث نموذجاً حاسوبياً للتنبؤ بأداء العنفة الريحية فيما يتعلق بالاستطاعة والعزم الميكانيكي عند تغيير زاوية ميل الشفرات مما يساهم في تطوير وزيادة موثوقية نظام التحكم في العنفات.

٢- مشكلة البحث وأهميته

تكمن المشكلة في أن سرعة الرياح تكون متغيرة مع الزمن وغالياً يكون بروفائل سرعة الرياح متذبذباً بشكل غير منتظم. كذلك يمكن حدوث قفزات مفاجئة بمطالات مختلفة في سرعة الرياح الامر الذي يؤثر بشكل كبير على أداء العنفة الريحية. لذلك تعتبر زاوية ميل الشفرات من أهم العوامل التي تحدد أقصى طاقة يمكن حصادها من الرياح بواسطة العنفة الريحية. تحليل تأثيرات الزاوية β يتيح لنا تحديد وفهم سلوك مؤشرات الأداء المختلفة في أنظمة طاقة الرياح، مما يسمح بتطوير أنظمة التحكم في عنفات الرياح وتطوير أداء العنفات الريحية كمصدر للطاقة النظيفة.

٣- هدف البحث

تهدف هذه الدراسة الى تقديم تحليل وتقييم لتأثير زاوية ميل الشفرات β على أداء أنظمة العنفات الريحية، والتي تتناول الخصائص الفعلية لعنفات الرياح كدالة معامل الأداء C_p واستطاعة الخرج وعزم الخرج للعنفة الريحية. تم استخدام برنامج Matlab/Simulink لتمثيل النماذج الرياضية للعنفة الريحية. تهدف الدراسة كذلك الى محاكاة تأثير زاوية ميل الشفرات β (ضمن المجال من ٠ الى ٥ درجات) على العزم الميكانيكي للعنفة الريحية تحت شروط تذبذب الرياح. في هذا البحث تم التركيز على مؤشرات الأداء الميكانيكية للعنفة الريحية ولم يتم التطرق الى نموذج التحكم كونه خارج موضوع البحث.

٤- الموديلات الرياضية للعنفة الريحية:

٤-١ الاستطاعة وعزم الدوران:

الاستطاعة وعزم الدوران هما مؤشران مختلفان باختلاف سرعة الرياح ويميزان أداء عنفات الرياح. كمية الطاقة التي يلتقطها الدوار تحدد الاستطاعة المنتجة، بينما يحدد حجم علبة التروس عزم الدوران. تلتقط عنفة

الرياح الطاقة من الهواء المتحرك وتحولها إلى طاقة ميكانيكية دوارة ثم تحول لاحقاً إلى طاقة كهربائية. يؤثر كل من كثافة الهواء، ومعامل الاستطاعة، وسرعة الرياح، ومساحة الدائرة التي تمسحها شفرات الدوار على الطاقة المولدة، كما هو موضح في المعادلة التالية [7]:

$$P = 0.5\rho C_p A V^3 \quad [W] \quad (1)$$

حيث:

P: الاستطاعة الميكانيكية للعنفة الريحية (Watt).

ρ : كثافة الهواء (kg/m^3).

C_p : معامل الأداء.

A: مساحة الدائرة التي تمسحها ريش الدوار (m^2).

V: سرعة الرياح (m/s).

يعطى العزم الميكانيكي لدوار العنفة الريحية كما يلي [7]:

$$T = \frac{P}{\omega_{Rotor}} = \frac{0.5\rho C_p A V^3}{\omega_{Rotor}} \quad [N.m] \quad (2)$$

حيث:

T: العزم الميكانيكي لدوار العنفة الريحية (N.m).

ω_{Rotor} : السرعة الزاوية لدوار العنفة الريحية (rad/s).

٤-٢ نسبة سرعة الطرف للشفرة (λ):

نسبة سرعة الطرف للشفرة (The tip speed ratio (TSR)) هي قيمة لابعدية تمثل نسبة سرعة طرف شفرة عنفة الرياح إلى سرعة رياح التيار الحر. تُعدّ هذه النسبة عاملاً أساسياً في الكفاءة الايروديناميكية (الديناميكا الهوائية) للعنفة، حيث يتمتع كل تصميم للعنفة بنسبة TSR مثالية تُنتج عندها أقصى طاقة. معادلة نسبة TSR هي السرعة المماسية لطرف الشفرة مقسومة على سرعة الرياح كما يلي [7]:

$$TSR = (\text{سرعة طرف الشفرة}) / (\text{سرعة الرياح})$$

وهذه النسبة تعتبر أساسية لتحسين إجمالي إنتاج الطاقة لعنفة الرياح. يعبر عن هذه النسبة بالرمز (λ) كتمثيل

للسرعة النوعية للعنفة. بالتالي تصبح العلاقة كما يلي:

$$\lambda = \omega_{Rotor} * R / V \quad (3)$$

حيث:

λ : السرعة النوعية (نسبة سرعة طرف شفرة عنفة الرياح إلى سرعة رياح التيار الحر).

ω_{Rotor} : السرعة الزاوية لدوار العنفة (rad/s)

R: طول الشفرة للعنفة (نصف قطر الدوار) (m)

V: سرعة الرياح (m/s).

٤-٣ معامل الأداء C_p :

إن أقصى طاقة يمكن تحقيقها من الرياح بواسطة دوار عنفة مثالي ذي شفرات لا نهائية في ظل ظروف

مثالية هي ٥٩,٣% من الطاقة المتاحة في الرياح، كما أثبت العالم بيتز (Betz)، ويُعرف هذا الحد باسم حد

بيتر. صممت عنفات الرياح بحيث تحتوي على شفرتين أو ثلاث شفرات لأسباب هيكلية واقتصادية، وبالتالي، فإن كمية الطاقة التي يمكن الحصول عليها تقترب من حوالي ٥٠% من الطاقة المتاحة من الرياح. يعد معامل الاستطاعة C_p أحد أهم معايير تقييم أداء عنفات الرياح، كما حددته اللجنة الكهروتقنية الدولية (IEC) في توصيتها [8]. يشير معامل الأداء (C_p) إلى العلاقة بين إنتاج الطاقة الفعلي والطاقة المتاحة في الرياح المتدفقة نحو شفرات العنفة [9].

في الواقع، معامل الأداء C_p هو دالة تتعلق بالسرعة النوعية λ وزاوية ميل شفرات العنفة β . يختلف هذا المعامل من عنفة لأخرى. طُوّرت تقريبات عددية لحساب المعامل C_p ، واقتُرحت مُعادلات مُختلفة. في هذا البحث نستخدم المعادلة التحليلية التالية والتي تعتبر من أكثر المعادلات دقةً [10,11]:

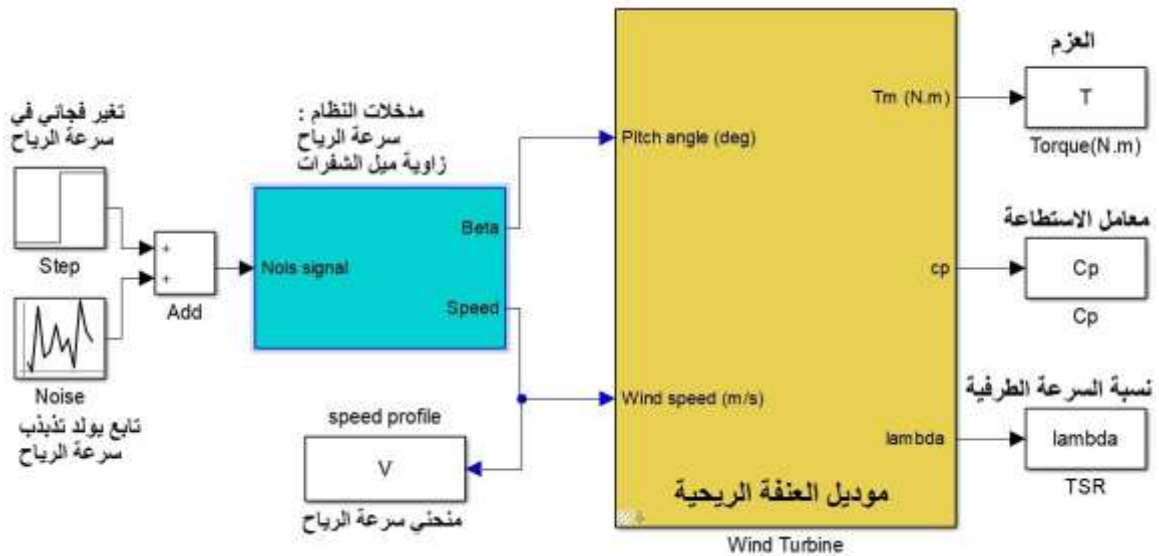
$$C_p = 0.5 \left(\frac{116}{\lambda_i} - 0.4\beta - 5 \right) e^{-\frac{21}{\lambda_i}} \quad (4)$$

حيث:

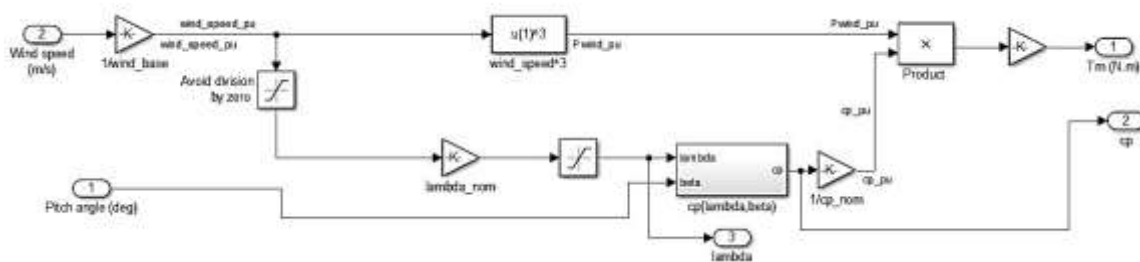
$$\frac{1}{\lambda_i} = \frac{1}{\lambda + 0.08\beta} - \frac{0.035}{\beta^3 + 1}$$

٥- النماذج الصندوقية للعنفة الريحية باستخدام Matlab/Simulink:

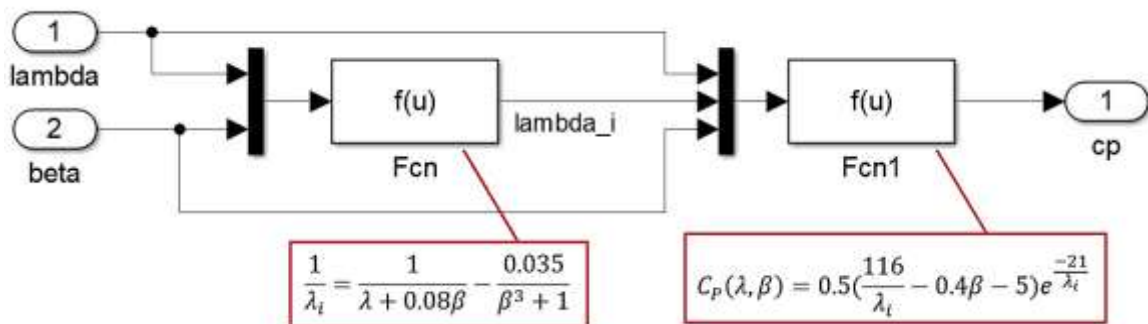
يمثل الرسم التخطيطي الصندوقي الموضح في الشكل (2) نموذج المحاكاة الحاسوبية الكاملة للعنفة الريحية. ويحصل عليه عن طريق نمذجة المعادلات الرياضية المعروضة سابقاً وإعادة تجميعها باستخدام Matlab/Simulink. تمت المحاكاة على عنفة ريحية قياسية أستطاعتها الاسمية 1.5 MW (يمكن تغييرها إلى أي قيمة) مصممة لتعمل عند سرعة رياح أساسية قدرها 12m/s. قطر الدوار 70m وعدد الشفرات ٣. الإقلاع يتم عند سرعة رياح 4m/s بينما يتم إيقاف العنفة بالمكابح عند سرعة رياح كبيرة 25m/s لحمايتها من التكرس. مدخلات النموذج هي سرعة الرياح مقاسة بالـ m/s والزاوية β مقاسة بالدرجات. تمت دراسة منحنيات الأداء عند الحالة المستقرة. أما من أجل العزم يتم إضافة تابع يولد تذبذب في سرعة الرياح وتابع آخر يولد قفزة فجائية في سرعة الرياح. مخرجات النموذج هي العزم الميكانيكي مقاساً بالـ N.m ومعامل الاستطاعة C_p ونسبة السرعة الطرفية λ .



الشكل (2) المخطط الصندوقي لنموذج المحاكاة الحاسوبية في بيئة Matlab/Simulink



الشكل (٣) موديل العنفة الريحية



الشكل (٤) تضمين معادلات معامل الأداء Cp و λ في الموديل الفرعي لمعامل الاستطاعة

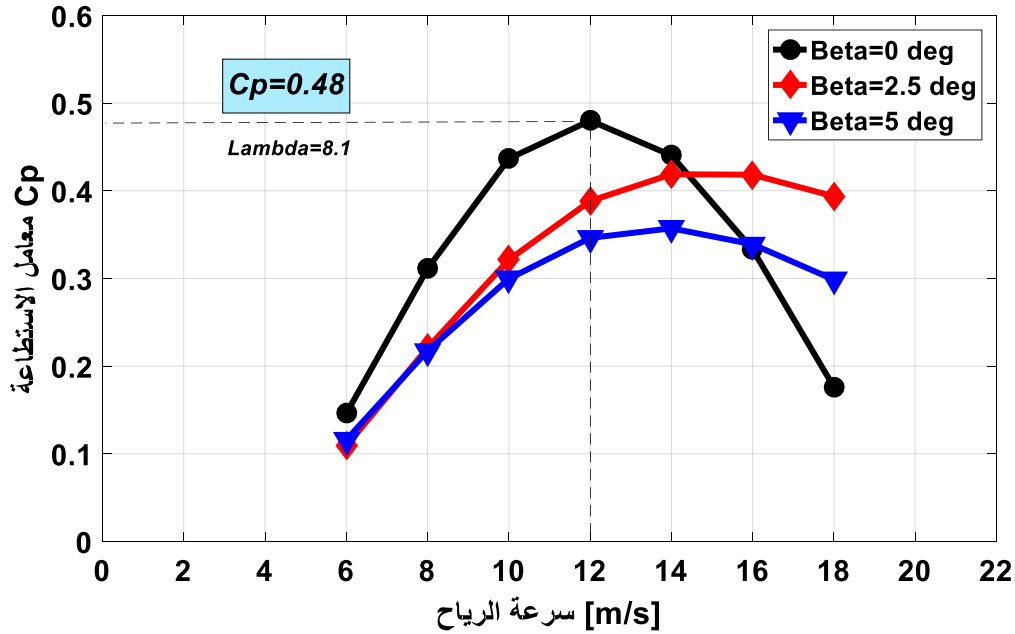
الشكلين (٣) و (٤) يوضحان مكونات النماذج الفرعية (Subsystem) للنموذج الرئيسي في الشكل (٢). الشكل (٣) يبين مكونات الموديل الفرعي للعنفة الريحية والشكل (٤) يبين تضمين معادلات معامل الأداء Cp و λ في الموديل الفرعي لمعامل الاستطاعة.

٦- النتائج والمناقشات

٦-١ تأثير زاوية ميل الشفرات (β) على معامل الأداء Cp:

يبين الشكل (5) تأثير زاوية ميل الشفرات (β) على معامل الأداء (Cp) للعنفة الريحية. تمت مقارنة تأثير ثلاث زوايا مختلفة لميل الشفرات (β) هي 0deg, 2.5deg, 5deg ضمن مجال لتغير سرعة الرياح من 6m/s الى 18m/s وهو المجال المعتاد لعمل العنفات الريحية ضمن الظروف الطبيعية.

نلاحظ من الشكل (5) أن كل قيمة ل (β) تفرض بشكل غير خطي تغييراً واضحاً في منحنى معامل الأداء مقابل سرعة الرياح. بشكل عام نجد أن زيادة زاوية ميل الشفرات (β) تقود لتقليل معامل الأداء بخاصة عند السرعات الأعلى للرياح. يعود ذلك الى تغيير الخصائص الديناميكية الهوائية للشفرات عند تغيير زاوية الميل (β) مما يؤثر على قوة وسلوك الدوامات الهوائية حول الشفرات، هذا الأمر يؤثر بدوره على العزم اللحظي للشفرات ومعدل تحويل الطاقة الإجمالي [12,13].

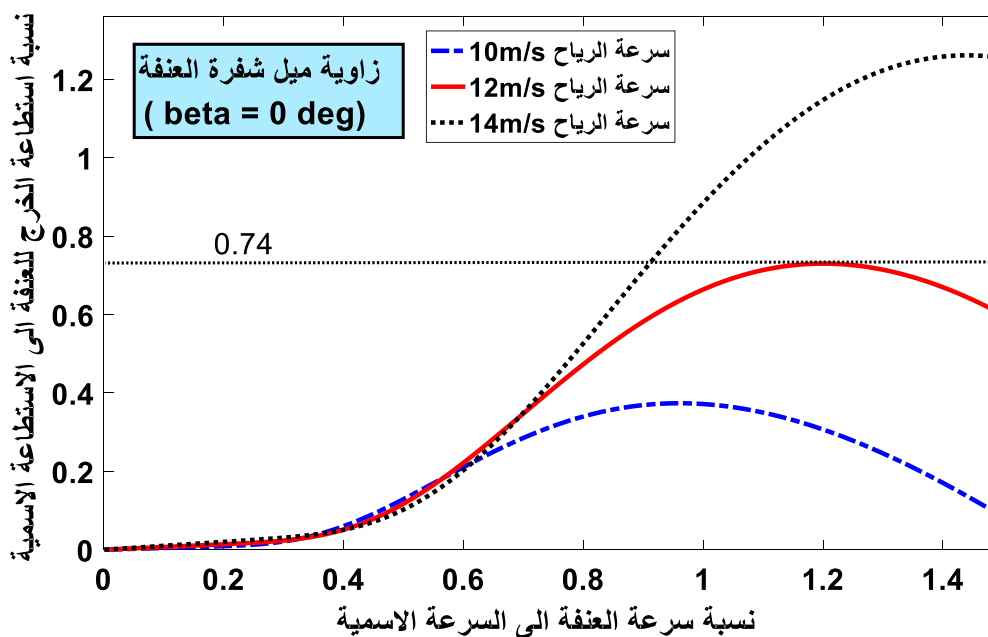
الشكل (5) تأثير زاوية ميل الشفرات (β) على معامل الأداء C_p مقابل سرعة الرياح

يبين الشكل (5) أن معامل الأداء يبلغ قيمة عظمى قدرها $C_p=0.48$ من أجل $\beta=0$ عند $V=12\text{m/s}$ و $\lambda=8.1$. وتمثل هذه القيم الشروط المثالية لعمل العنفة الريحية المدروسة في هذا البحث لحصاد طاقة أعظمية من الرياح. من خلال قيمة $\lambda=8.1$ التي تقابل معامل الأداء الأعظمي يمكن حساب السرعة الزاوية المثالية للدوار ω_{Rotor} من خلال العلاقة التالية: $\lambda=\omega * R/V=8.1$ والذي يعطينا $\omega_{\text{Rotor}}=8.1*12/(70/2)=2.78 \text{ rad/s}$ وهو مايقابل 26.52 دورة في الدقيقة.

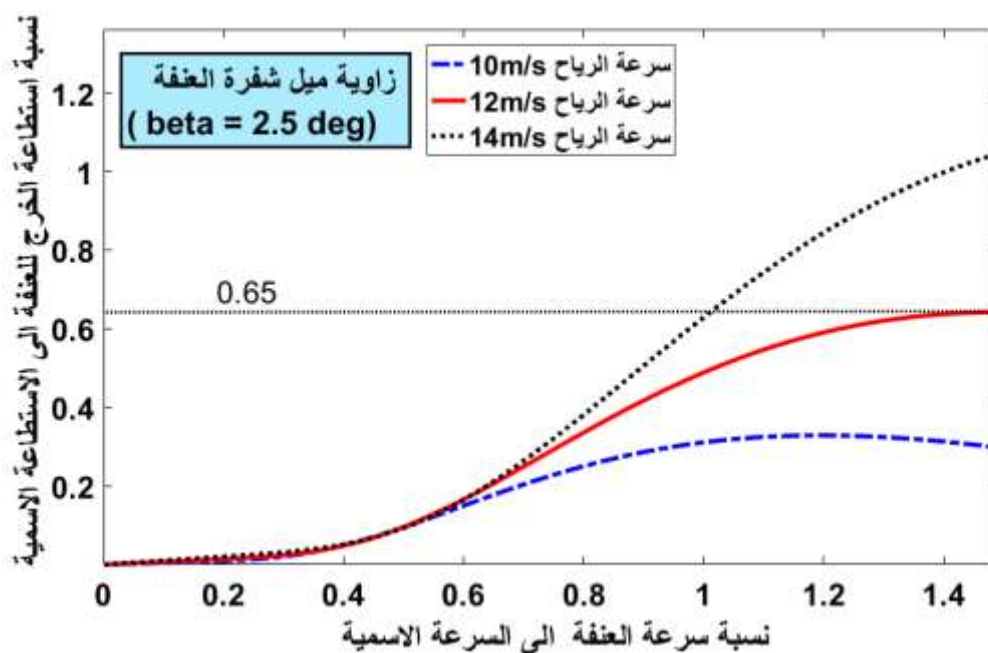
٦-٢ تأثير زاوية ميل الشفرات (β) على نسبة استطاعة الخرج للعنفة الريحية مقابل نسبة سرعة دوران

العنفة:

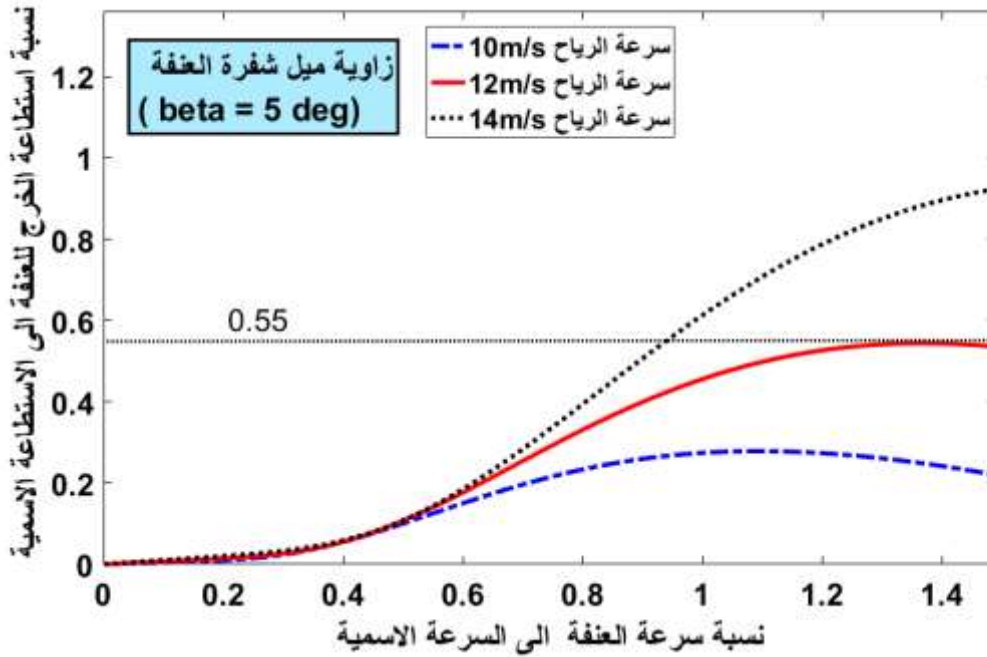
توضح الأشكال (٦ و ٧ و ٨) العلاقة بين سرعة دوران العنفة (والتي تعتمد على سرعة الرياح) وطاقة الخرج للعنفة عند سرعات رياح مختلفة وزوايا ميل مختلفة للشفرات. تم تحديد تأثير زاوية ميل الشفرات (β) على نسبة استطاعة الخرج للعنفة الريحية مقابل نسبة سرعة دوران العنفة من خلال مقارنة ثلاث زوايا مختلفة لميل الشفرات (β) وهي 0deg , 2.5deg , 5deg . وفي كل مقارنة تم رسم مخطط نسبة استطاعة الخرج للعنفة الريحية مقابل نسبة سرعة دوران العنفة عند ثلاث سرعات للرياح هي 10m/s , 12m/s , 14m/s .



الشكل (6) نسبة استطاعة الخرج للعنفة الريحية مقابل نسبة سرعة دوران العنفة عند (beta=0)



الشكل (7) نسبة استطاعة الخرج للعنفة الريحية مقابل نسبة سرعة دوران العنفة عند (beta=2.5 deg)



الشكل (8) نسبة استطاعة الخرج للعنفة الريحية مقابل نسبة سرعة دوران العنفة عند ($\beta=5$ deg)

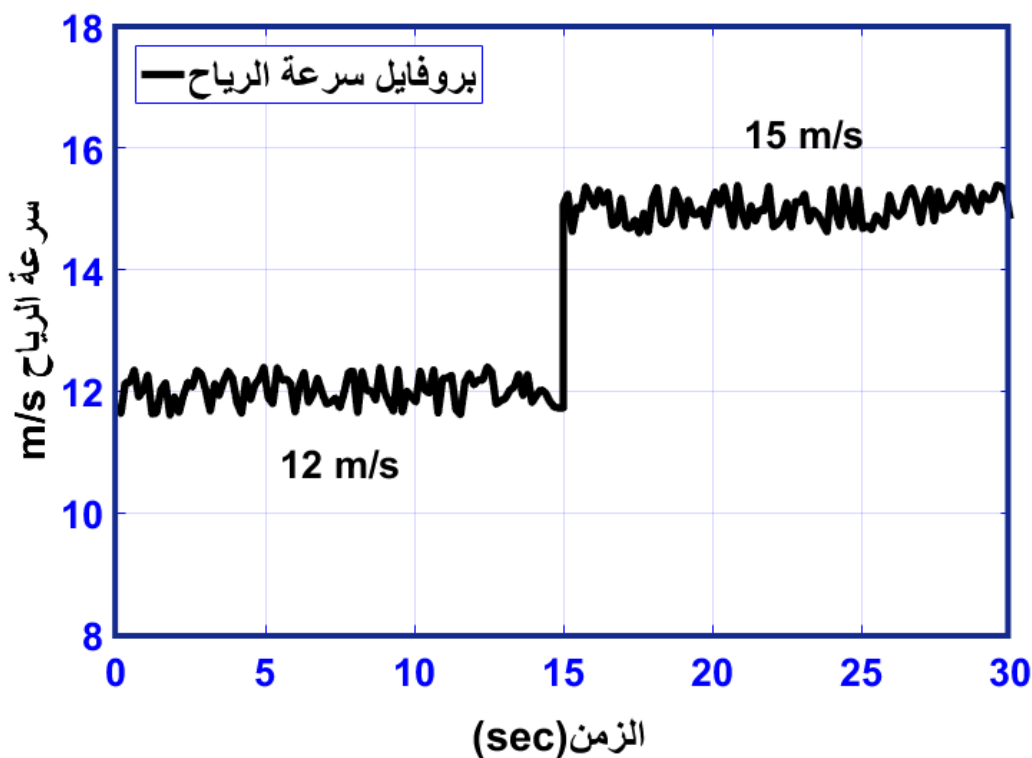
نلاحظ من الاشكال أن طاقة الخرج لعنفة الرياح ترتبط ارتباطاً مباشراً بسرعة الرياح ونسبة سرعة الدوران وزاوية ميل الشفرات، حيث تزداد الطاقة مع سرعة الرياح حتى تصل إلى قيمة معينة، ثم تنخفض بعد ذلك. عندما تكون زاوية الميل $\beta=0$ نحصل على أقصى استطاعة كما هو موضح في الشكل (6)، ولكن إذا زادت زاوية الميل لنفس سرعة الرياح، فإن قدرة الخرج تقل، وهذا يشير إلى تأثير زاوية الميل على استطاعة الخرج. نلاحظ من الاشكال (6 و 7 و 8) أنه من أجل سرعة الرياح 12m/s تتناقص القيمة العظمى لنسبة خرج الاستطاعة للعنفة الريحية بالنسبة لاستطاعتها الاسمية (1.5MW) عند زيادة زاوية ميل الشفرات كما هو موضح في الجدول 1.

الجدول 1: القيمة العظمى لنسبة خرج الاستطاعة للعنفة الريحية بالنسبة لاستطاعتها الاسمية مقابل زاوية ميل الشفرات (β)

| زاوية ميل الشفرات (β) | القيمة العظمى لنسبة خرج الاستطاعة للعنفة الريحية بالنسبة لاستطاعتها الاسمية |
|-------------------------------|---|
| $\beta=0$ | 74% |
| $\beta=2.5$ deg | 65% |
| $\beta=5$ deg | 55% |

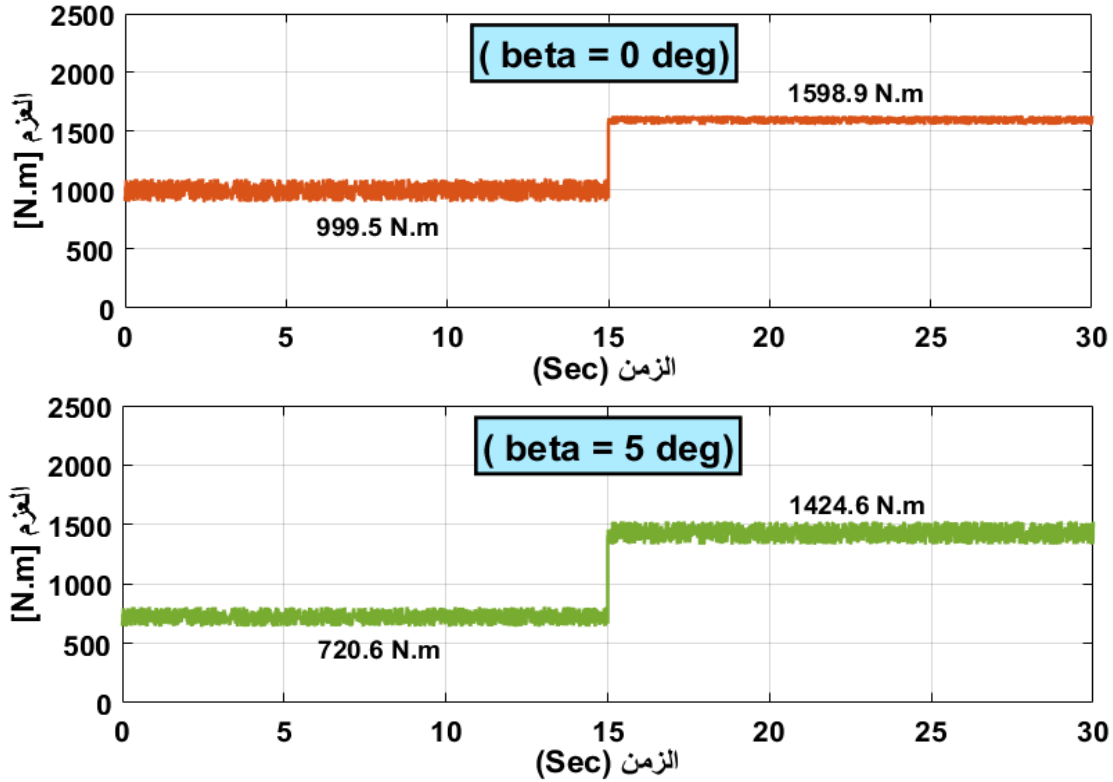
٦-٣ تأثير زاوية ميل الشفرات (β) على العزم الميكانيكي للعنفة الريحية

لدراسة سلوك النموذج عند نقاط تشغيل مختلفة، تم إنشاء نموذج رياح تكون فيه القيمة الوسطية للرياح ثابتة خلال فترة زمنية محددة، ثم الانتقال إلى مستويات رياح أخرى. يظهر الشكل (9) بروفایل (منحني) سرعة الرياح خلا ٣٠ ثانية تكون فيه القيمة الوسطية للرياح 12m/s ثابتة خلال ١٥ ثانية ثم تحدث قفزة في بروفایل السرعة لتستقر سرعة الرياح عند قيمة وسطية 15m/s خلال ١٥ ثانية. يخضع بروفایل سرعة الرياح بشكل دائم لتذبذب يعبر عن ضجيج الرياح وعدم استقرارها مع الزمن بسبب قص الرياح وتأثيرات ظل البرج [7]. لذلك يتم إضافة تابع يولد تذبذب في سرعة الرياح وتابع آخر يولد قفزة فجائية في سرعة الرياح في نموذج المحاكاة .Matlab/Simulink



الشكل (9) منحنى سرعة الرياح خلا ٣٠ ثانية

لدراسة تأثير زاوية ميل الشفرات (β) على العزم الميكانيكي للعنفة الريحية تمت مقارنة قيم العزم الميكانيكي عند قيمتين مختلفتين لزاوية ميل الشفرات (β) هما 0deg و 5deg . الشكل (10) يظهر تغيرات العزم مع تغير الزاوية β ومع تغير القيمة الوسطية لسرعة الرياح. نلاحظ أن القيمة الوسطية للعزم تتخفف بشكل واضح عند زيادة مقدار زاوية ميل الشفرات. عندما تكون القيمة الوسطية للرياح 12m/s تتخفف القيمة الوسطية للعزم من 999.5 N.m عند $\beta=0$ الى قيمة وسطية قدرها 720.6 N.m عند $\beta=5\text{deg}$. عند زيادة القيمة الوسطية للرياح نلاحظ زيادة قيمة العزم الميكانيكي للعنفة الريحية بسبب ازدياد الطاقة الحركية للرياح. كذلك تتخفف قيمة العزم من القيمة الوسطية 1598.8 N.m عند $\beta=0$ الى قيمة وسطية قدرها 1424.6 N.m عند $\beta=5\text{deg}$ كما هو موضح بالشكل (10).

الشكل (10) تأثير زاوية ميل الشفرات (β) على العزم الميكانيكي للنفثة الريحية

الخلاصة والاستنتاجات

يمكن تلخيص أهم استنتاجات البحث بالنقاط التالية:

- النموذج الحاسوبي الذي تقدمه الدراسة الحالية يمكن اعتماده للتنبؤ والتحليل بسلوك العنفات الريحية فيما يتعلق بتأثير زاوية الميل للشفرات (β) مما يساهم في تطوير أنظمة التحكم وتحسين الأداء.
- منحنى معامل الأداء C_p يتغير بشكل غير خطي عند تغير زاوية ميل الشفرات β وبشكل عام تؤدي زيادة الزاوية (β) لتقليل معامل الأداء وبخاصة عند السرعات الأعلى للرياح.
- لا يمكن الحصول على القيمة العظمى لاستطاعة النفثة الريحية إلا عند قيم محددة من سرعة الرياح و λ التي توافق سرعة دوران محددة لدوار النفثة.
- تتناقص القيمة العظمى لنسبة خرج الاستطاعة للنفثة الريحية بالنسبة لاستطاعتها الاسمية عند زيادة زاوية ميل الشفرات [2]
- قيمة العزم الميكانيكي تنخفض بشكل واضح عند زيادة مقدار زاوية ميل الشفرات.

التوصيات:

- النمذجة الحاسوبية باستخدام Matlab/Simulink يعتبر وسيلة فعالة وغير مكلفة لدراسة سلوك العنفات الريحية وتطوير عملها.
- ضرورة اجراء المزيد من الاختبارات حول الحالات الديناميكية والعبارة التي تؤثر على أداء العنفات الريحية.
- يوصى باستخدام شفرات يمكن التحكم بزاوية ميلها كون سرعة الرياح متذبذبة.

المراجع:

- [1] Firoozi, Ali Akbar, Farzad Hejazi, and Ali Asghar Firoozi. "Advancing wind energy efficiency: A systematic review of aerodynamic optimization in wind turbine blade design." *Energies* 17.12 (2024): 2919.
- [2] Zhang, Ziyang, Wen-Li Chen, and Jiabin Liu. "Aerodynamic design and analysis for offshore wind turbine blade model." *Energy* (2025): 136659.
- [3] El-Fahham, Ibrahim, George Abdelshahid, and Ossama Mokhiamar. "Pitch angle modulation of the horizontal and vertical axes wind turbine using fuzzy logic control." *Processes* 9.8 (2021): 1337.
- [4] Chudzik, Stanisław. "Wind microturbine with adjustable blade pitch angle." *Energies* 16.2 (2023): 945.
- [5] Hao, Wenxing, et al. "Study on the pitch angle effect on the power coefficient and blade fatigue load of a vertical axis wind turbine." *Energies* 16.21 (2023): 7279.
- [6] Elosegui, Unai, et al. "Pitch angle misalignment correction based on benchmarking and laser scanner measurement in wind farms." *Energies* 11.12 (2018): 3357.
- [7] Fu, Lei, et al. "A wind energy generation replication method with wind shear and tower shadow effects." *Advances in mechanical engineering* 10.3 (2018): 1687814018759216.
- [8] IEC 61400-12-1 Ed 1; *Wind Turbines—Part 12-1: Power Performance, Measurements of Electricity Producing Wind Turbines*. IEC:Geneva, Switzerland, 2005.
- [9] Niu, B.; Hwangbo, H.; Zeng, L.; Ding, Y. *Evaluation of alternative power production efficiency metrics for offshore wind turbines and farms*. *Renew. Energy* 2018, 128, 81–90.
- [10] Castillo, Oscar Carranza, et al. "Comparison of power coefficients in wind turbines considering the tip speed ratio and blade pitch angle." *Energies* 16.6 (2023): 2774.
- [11] Khajuria, Sachin, and Jaspreet Kaur. "Implementation of pitch control of wind turbine using Simulink (Matlab)." *International Journal of Advanced Research in Computer Engineering & Technology* 1.4 (2012): 196-200.
- [12] Kaya, Mehmet Numan, et al. "The aerodynamic effects of blade pitch angle on small horizontal axis wind turbines." *International Journal of Numerical Methods for Heat & Fluid Flow* 33.1 (2023): 120-134.
- [13] Roul, Rajendra, and Awadhesh Kumar. "Effect of blade pitch angle on the aerodynamic characteristics of a twisted blade horizontal axis wind turbine based on numerical simulations." *International Journal of Power Electronics and Drive Systems* 12.1 (2021): 511-519.