Albahit Journal of Applied Sciences
"open-access, peer-reviewed biannual journal"
Volume 4, Issue 1, 2025
Page No: 28-40
Website: *https://albahitjas.com.ly/index.php/albahit/en/index*

Study of The Power Curve of a Wind Turbine at the Benghazi Solar Radiation Center

Ali Elsheikhi [1 *], Farag Farag [2], Yousef Sassi [3] , Mohammed Hamad [4]
[1,2,3,4] Renewable Energies Department, High Institute of Science and Technology suluq, Benghazi Libya

[*]*Corresponding author:* alial-shaiki@hicps.edu.ly

Received: April 14, 2025	Accepted: June 10, 2025	Published: July 12, 2025

Abstract:
This study aims to evaluate the performance of a small wind turbine with a nominal capacity of 1000 W, installed at the Solar Radiation Center – Al-Runaway, Benghazi, in order to assess its suitability for electricity generation in rural off-grid areas. The methodology relied on the analysis of turbine data provided by the manufacturer's catalog in addition to field measurements of wind speed and output current from the controller. The results showed that the maximum recorded power was 555.81 W at a wind speed of 9 m/s, which is very close to the nominal capacity of 584 W. The findings indicated a gap between the theoretical and actual output at low wind speeds, while good agreement was observed at medium to high speeds (7–9 m/s). The experiments demonstrated that the turbine is suitable for supplying small household loads such as lighting and electronic devices but insufficient for heavy loads like air conditioners and heaters. The study recommends integrating the turbine with solar energy systems in hybrid configurations to enhance power supply reliability in rural communities.

Keywords: Hybrid systems; Power output; Renewable energy; Small wind turbines; Wind energy.

دراسة منحنى القدرة لتوربينة الرياح بمركز الإشعاع الشمسي النواقية / بنغازي

علي محمود علي الشيخي[*1]، فرج عابد ابريك أبوشليف ، يوسف عطية يوسف ساسي [3]، محمد عبدالباقي موسى حمد [4]
[4،3،2،1] قسم الطاقات المتجددة، المعهد العالي للعلوم والتقنية سلوق، ليبيا.

الملخص
تسعى هذه الدراسة إلى تقييم أداء توربينة رياح صغيرة بقدرة اسمية 1000 وات، مركبة في مركز الإشعاع الشمسي – النواقية بمدينة بنغازي، بهدف تحديد مدى ملاءمتها لتوليد الكهرباء في البيئات الريفية المعزولة عن الشبكة. اعتمدت المنهجية على تحليل بيانات التوربينة من كتالوج الشركة المصنعة، إضافةً إلى القياسات الميدانية الخاصة بسرعة الرياح والتيار الكهربائي الخارج من جهاز التحكم. أظهرت النتائج أن القدرة القصوى المسجلة بلغت 555.81 وات عند سرعة رياح 9 م/ث، وهي قريبة من القدرة الاسمية البالغة 584 وات. كما بينت النتائج وجود فجوة بين القدرة النظرية والفعلية عند سرعات منخفضة، بينما ظهر توافق جيد عند السرعات المتوسطة إلى العالية (7–9 م/ث). وقد أثبتت التجارب أن التوربينة مناسبة لتغذية الأحمال المنزلية البسيطة مثل الإضاءة والأجهزة الإلكترونية، لكنها غير كافية للأحمال الكبيرة كالمكيفات والسخانات. توصي الدراسة بدمج التوربينة مع منظومات الطاقة الشمسية ضمن أنظمة هجينة لتعزيز استقرار الإمداد الكهربائي في المناطق الريفية.

الكلمات المفتاحية: التوربينات الصغيرة؛ القدرة الكهربائية؛ المنظومات الهجينة؛ الطاقة المتجددة؛ طاقة الرياح.

1- المقدمة

تُعد الطاقة أحد المقومات الأساسية للحياة والتنمية البشرية، إذ تُستمد من مصادر طبيعية وأخرى غير طبيعية. وتنقسم هذه المصادر إلى نوعين رئيسيين: مصادر متجددة مثل الطاقة الشمسية، وطاقة المياه، وطاقة الرياح، وأخرى غير متجددة مثل الوقود الأحفوري والغاز الطبيعي والطاقة النووية. (Panwar et al., 2011) ومع تزايد الطلب العالمي على الطاقة وتنامي

التحديات البيئية، برزت الطاقة المتجددة كخيار استراتيجي يسهم في تحقيق التنمية المستدامة والحد من الانبعاثات الكربونية (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2012).
من بين مصادر الطاقة المتجددة، تحتل طاقة الرياح مكانة بارزة لما تتميز به من وفرة، وانخفاض تكاليف إنتاجها نسبيًا، وعدم حاجتها إلى وقود أو مياه للتبريد، إضافة إلى دورها في تقليل ظاهرة الاحتباس الحراري .(Alotaibi, 2011) وقد ساهم التطور التكنولوجي في رفع كفاءة توربينات الرياح وخفض تكاليفها، مما عزز انتشارها عالميًا، خاصة في الدول التي تتسم بسرعات رياح متوسطة إلى عالية.(Sovacool, 2009)
رغم المزايا البيئية والاقتصادية لطاقة الرياح، إلا أن أداء التوربينات يتأثر بشكل كبير بالعوامل المناخية والجغرافية للموقع، الأمر الذي يؤدي إلى وجود فجوة بين منحنيات القدرة النظرية المعلنة من الشركات المصنعة والقدرة الفعلية المسجلة ميدانيًا (da Silva et al., 2025).لذا، فإن دراسة منحنى القدرة في مواقع محددة يُعد خطوة ضرورية لتقييم جدوى استخدام توربينات الرياح وضمان كفاءتها التشغيلية.
لذلك تهدف الدراسة إلى:

1. تحليل العلاقة بين سرعة الرياح والقدرة الكهربائية المنتجة للتوربينة.
2. مقارنة القدرة النظرية المستنتجة من معادلات التصميم مع القدرة الفعلية المقاسة ميدانيًا.
3. تقييم مدى ملاءمة التوربينة لتوفير احتياجات الطاقة الكهربائية للأحمال المنزلية البسيطة في المناطق الريفية المعزولة (Roy et al., 2023).
4. تقديم توصيات علمية يمكن أن تسهم في تحسين استخدام التوربينات الصغيرة وتعزيز موثوقيتها ضمن المنظومات الهجينة للطاقة المتجددة (Bhimaraju & Mahesh, 2024).

2- الجانب العملي والمنهجية

- موقع الدراسة

تقع مدينة بنغازي على الساحل الشرقي لليبيا بارتفاع يقارب 3أمتار فوق مستوى سطح البحر، عند خط عرض (32.11° شمالاً) وخط طول (20.07° شرقاً). ويقع موقع الدراسة في منطقة النواقية، على بعد نحو 15كيلومتراً جنوب مدينة بنغازي، كما هو موضح في الشكلين (1) و.(2)
يتميز الموقع بغياب العوائق الطبيعية الكبيرة مثل الغابات أو المرتفعات التي قد تُعيق حركة الرياح، باستثناء بعض المساكن الريفية المتناثرة إلى الجنوب والشرق. وتشير البيانات المناخية المسجلة خلال الفترة (2010–2016) إلى أن متوسط سرعة الرياح في المنطقة يبلغ حوالي 4م/ث، وهي قيمة تفوق سرعة الدخول (Cut-in Speed) للتوربينة المستخدمة، والتي تقدر بـ 3م/ث .
كما أظهرت القياسات الميدانية أن الإشعاع الشمسي في الموقع يتراوح بمتوسط قدره 800واط/م²، مع وصول القيم القصوى إلى حوالي 1330واط/م²، مما يجعل المنطقة مناسبة أيضًا لتطبيق أنظمة هجينة تعتمد على الطاقة الشمسية والريحية معًا (Roy et al., 2023).

الشكل (1) موقع الدراسة بضواحي مدينة بنغازي (يبعد 15 كم عن المركز).

الشكل (2) موقع التوربينة في منطقة بودريسة/النواقية.

2.1 الخواص المدروسة في البحث

أ. طاقة الرياح(Wind Energy)

تُعد طاقة الرياح من أهم مصادر الطاقة المتجددة وأكثرها أمانًا وصداقةً للبيئة، نظرًا لعدم إنتاجها ملوثات ضارة أو انبعاثات كربونية مباشرة. ومع تزايد التحديات البيئية الناتجة عن الاحتباس الحراري، ازدادت الحاجة إلى اعتماد مصادر بديلة للوقود الأحفوري .(Panwar, Kaushik, & Kothari, 2011) وقد ساهم التقدم التكنولوجي في تحسين كفاءة التوربينات وخفض تكاليف إنتاج الكهرباء الريحية، مما عزز انتشارها عالميًا.(Alotaibi, 2011)

ويعتمد مبدأ طاقة الرياح على تحويل الحركة الميكانيكية الناتجة عن دوران الريش إلى طاقة كهربائية باستخدام مولدات خاصة. ويُذكر أن استغلال الرياح ليس جديدًا، إذ استخدمها المصريون القدماء في تسيير السفن، كما اعتمد الصينيون على طواحين الهواء لضخ المياه .(IPCC, 2012) ومن أبرز مزايا طاقة الرياح:

1. إنتاج كميات كبيرة من الطاقة الكهربائية.
2. كونها مصدرًا متجددًا ونظيفًا وصديقًا للبيئة.
3. انخفاض تكاليف التشغيل والصيانة مقارنة بالمصادر التقليدية.
4. تحقيق معدلات نمو سنوية متسارعة مقارنة بمصادر الطاقة المتجددة الأخرى.
5. المساهمة في خلق فرص عمل محلية.
6. عدم حاجتها إلى وقود أو مياه للتبريد.(Bhimaraju & Mahesh, 2024)

ب. توربينة الرياح(Wind Turbine)

تم تركيب توربينة رياح صغيرة في موقع الدراسة (النواقية) بغرض دراسة أدائها في الظروف المناخية المحلية. التوربينة من النوع الأفقي ثلاثي الريش، بقدرة اسمية تتراوح بين **1000 – 500وات**، ومزودة بمولد كهربائي تصل سرعته إلى **600لفة/دقيقة** عند سرعة رياح مقدارها **7م/ث**، وهي السرعة التصميمية التي تحقق عندها التوربينة قدرتها القصوى(da Silva et al., 2025 .)يوضح الشكل (3) توربينة الرياح المستخدمة.

شكل (3) توربينة رياح هومر.

تتكون التوربينة من عدة مكونات أساسية تشمل: يوضح الشكل (3) توربينة الرياح المستخدمة.

- **جهاز التحكم :**يقوم بتحويل التيار المتناوب من المولد إلى تيار مستمر لشحن البطاريات، ثم إعادة تحويله إلى تيار متناوب (230 فولت) لتغذية الأحمال. كما يحمي البطاريات من انخفاض أو ارتفاع الجهد خارج الحدود المقررة.
- **مجمع التخزين :**يتألف من بطاريات بسعة **150Ah**وجهد **24فولت**، موصولة على التوالي والتوازي لتخزين الطاقة المنتجة.
- **كابلات التوصيل :**بطول يقارب **20مترًا**، تربط المولد بجهاز التحكم.
- **الأحمال الكهربائية :**وتشمل مصابيح اقتصادية وجهاز تلفاز، حيث تُغذى عبر جهاز التحكم بعد عزل التيار العمومي.(Usubamatov et al., 2012) .

ث. منحنى القدرة(Power Curve)

يُعد منحنى القدرة مؤشرًا أساسيًا لتقييم أداء توربينة الرياح، حيث يوضح العلاقة بين سرعة الرياح (m/s) والقدرة المنتجة (W).يوضح العلاقة بين سرعة الرياح والقدرة المنتجة.($P = V \times I$)

ويعتمد هذا المنحنى على القيم المقاسة ميدانيًا، مع مقارنتها بالقيم النظرية المقدمة من الشركة المصنعة (Kouissi et al., 2021).

2.2 أجهزة قياس سرعة الرياح بالموقع

تمت دراسة سرعة الرياح في موقع التوربينة باستخدام طريقتين أساسيتين لضمان دقة القياسات وتوثيق أداء التوربينة:

1. الجهاز اليدوي لقياس سرعة الرياح:(Anemometer)

حيث قام الباحث بتسجيل القراءات على ارتفاع التوربينة باستخدام جهاز قياس محمول، مما أتاح الحصول على بيانات مباشرة حول تغيرات سرعة الرياح في الموقع.(Abubakkar et al., 2018) كما هو موضح في الشكل(4)

شكل(4) جهاز قياس سرعة الرياح.

2. شاشة العرض الخاصة بجهاز التحكم:(Controller Display)

تعرض هذه الشاشة بيانات غير مباشرة لسرعة الرياح من خلال العلاقة بين التيار الكهربائي الخارج من مولد التوربينة ومنحنى القدرة المزود من الشركة المصنعة. وقد مكّن ذلك من التحقق من مدى توافق الأداء الفعلي مع القيم النظرية.(Kouissi et al., 2021)

وبشكل عام، أظهرت المقارنة بين الطريقتين أن الاعتماد على مزيج من القياسات الميدانية المباشرة والبيانات المستخلصة من جهاز التحكم يعزز دقة التقييم، خصوصًا في المواقع ذات التغيرات المناخية السريعة1.(da Silva et al., 2025) .كما هو موضح في الشكل(5)

شكل (5) شاشة العرض للتيار والجهد والانفرتر.

من الجداول (1) الذي يبين البيانات التصميمية للتوربينة بالموقع:

جدول :(1) البيانات التصميمية للتوربينة بالموقع

البيان	القيمة التصميمية
الكفاءة الكهربائية	%97
التيار الكهربائي (A)	17
الجهد الكهربائي (V)	30
معامل الاستفادة (Cp)	%48
قطر المروحة (m)	2.7
كثافة الهواء (kg/m^3)	1.225
سرعة الرياح عند القدرة التصميمية (m/s)	7
القدرة التصميمية (W)	495
القدرة القصوى (W)	1000

3. النتائج والمناقشة

في التوربينة المدروسة بقدرة اسمية **1000–500وات**، أظهرت النتائج المراحل التشغيلية الآتية:

سرعة الدخول :(Cut-in Speed) عند حوالي **3م/ث** تبدأ التوربينة بالدوران وتنتج قدرة أولية تبلغ نحو **14وات**.

السرعة التصميمية :(Rated Speed) عند **7م/ث** تصل القدرة المنتجة إلى حوالي **500وات**.

السرعة القصوى :(Maximum Speed) عند حوالي **14م/ث** ترتفع القدرة إلى نحو **1000وات**، إلا أنها تبدأ بالانخفاض بعد ذلك نتيجة لزيادة المقاومة الداخلية وارتفاع حرارة المولد.

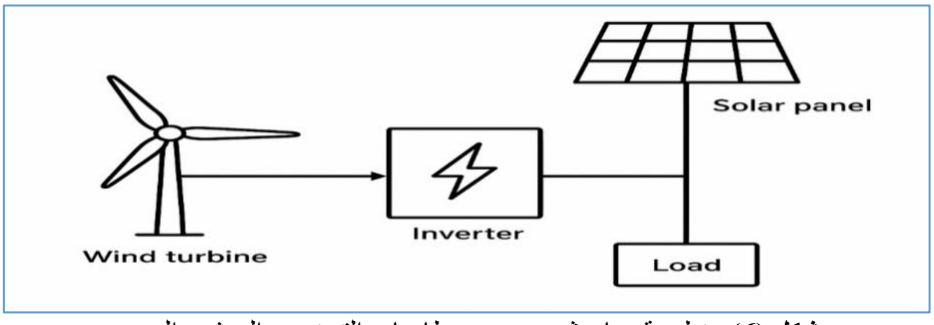
سرعة الخروج :(Cut-out Speed) عند **20م/ث** يتم إيقاف التوربينة يدويًا عبر جهاز الإنفرتر أو من خلال لف الريش بعكس اتجاه الرياح لحمايتها من التلف.(Usubamatov, Qasim, & Zain, 2012)

كما يُبين الشكل (6)منظومة هجينة (رياح – شمس) بدون بطاريات التخزين. ويمكن تشغيل هذه المنظومة وفق وضعين: (Gijón et al.,2025)

خارج الشبكة :(Off-grid) حيث تُخزن الطاقة في البطاريات لتغذية الأحمال المنزلية.

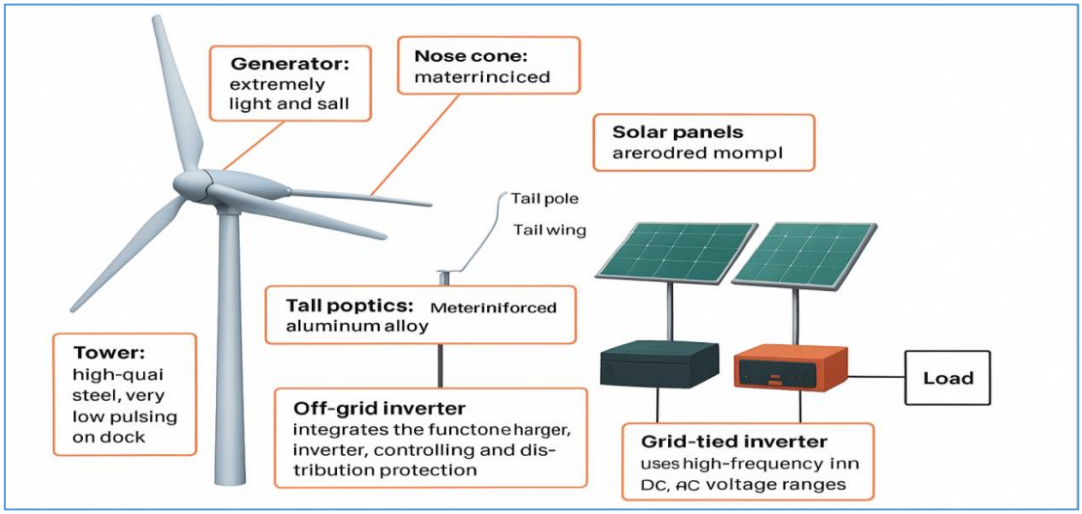
مرتبطة بالشبكة(On-grid) : حيث يُمكن بيع فائض الكهرباء إلى الشبكة العامة باستخدام عداد خاص.

وخلال دورة الشحن والتفريغ، تم الحفاظ على جهد ثابت بحدود **230فولت** لتشغيل الأحمال المنزلية. ولا ينقطع التيار إلا عند انخفاض الجهد عن الحدود الدنيا المقررة بسبب ضعف سرعة الرياح.(Bhimaraju & Mahesh, 2024)



شكل (6) منظومة رياح شمس بدون بطاريات التخزين والريش والبرج.

تصل سرعة الخروج للتوربينة إلى حوالي **20م/ث**، وهو الإجراء الذي يُتخذ لحماية التوربينة من التأثيرات الميكانيكية والحرارية الناجمة عن سرعات الرياح العالية. في هذه الحالة يتم لف المروحة بعكس اتجاه الرياح لتقليل سرعة الدوران تدريجيًا، ثم إيقافها يدويًا باستخدام زر الإيقاف الموجود بجهاز الإنفرتر. ويُلاحظ من منحنى القدرة أن الجهد الكهربائي يزداد بزيادة سرعة الرياح، مما يؤدي بدوره إلى زيادة تيار الشحن. وعندما يصل جهد البطاريات إلى **30–29فولت** يقوم الشاحن بإيقاف عملية الشحن تلقائيًا لحمايتها من فرط الجهد، بينما في حال هبوط الجهد إلى **22فولت** يتدخل جهاز الإنفرتر لفصل الأحمال. خلال دورة الشحن والتفريغ، يستمر الإمداد الكهربائي بجهد ثابت ومنتظم يبلغ نحو **230فولت** لتغذية الأجهزة المنزلية، ولا يتوقف إلا عند انخفاض الجهد دون الحدود المقررة بسبب ضعف سرعة الرياح.(da Silva et al., 2025)



شكل (7) مخطط كامل للتوربينة مع نوعين من أجهزة التحكم.

1-3 تجربة (1)تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية حسب بيانات الموقع والتوربينة

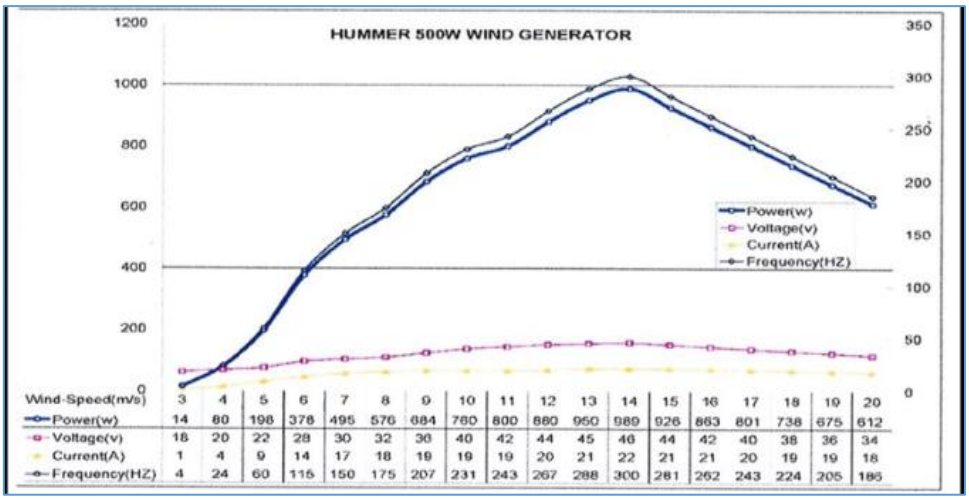
أظهرت نتائج الدراسة أن التيار الكهربائي الناتج من التوربينة لا ينخفض عن المستوى المطلوب لتغذية الأحمال المنزلية إلا في حالتين رئيسيتين:

عند انخفاض جهد البطاريات إلى أقل من **22فولت**.

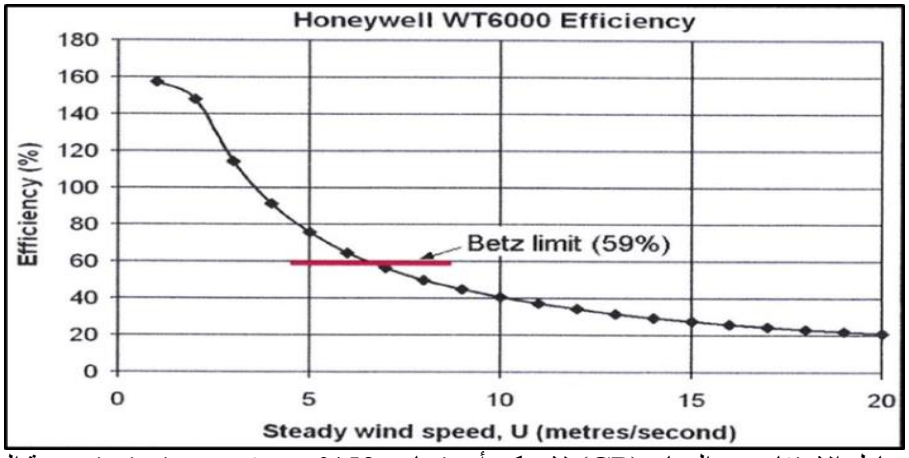
عند تشغيل أحمال حثية (مثل المحركات)، حيث انخفضت القدرة المنتجة من **500وات** إلى حوالي **340وات** بسبب أن معامل القدرة للمحركات (**0.8**) يقلل من الكفاءة الكلية.

وبوجه عام، يتوقف نجاح هذه المنظومات الصغيرة على **اختيار الأحمال الاقتصادية** التي تتناسب مع قدرات التوربينة. كما يُظهر منحنى القدرة أن العلاقة بين سرعة الرياح والقدرة الناتجة تقع ضمن المدى **14 – 3م/ث**، وهي القيم المتوقعة لأداء التوربينات الصغيرة في البيئات ذات الرياح المتوسطة.(da Silva et al., 2025; Kouissi et al., 2021)

ويبين الشكل(8) المخطط الخاص بمنحنى القدرة لتوربينة هومر عند سرعة رياح مقدارها **7م/ث**، حيث بلغت القدرة المنتجة نحو **500وات**، وهي قريبة من القدرة التصميمية المذكورة في كتالوج الشركة المصنعة.(Abubakkar et al., 2018)



شكل (8): مخطط لمنحنى القدرة لتوربينة هومر عند سرعة رياح 7 م/ث تنتج 500 وات



شكل (9) معامل الاستفادة من الرياح (**CP**) لا يمكن أن يتجاوز 59% ويعرف بحد بيتز في توربينة الرياح هومر يساوي (48%).

التغير في سرعة الرياح خلال فترة زمنية يمكن أن يتحول إلى طاقة كهربائية حسب المعادلة الرياضية الآتية:

$$P=0.5\ CP\ N_{wg}\ P\ A\ V^3 \qquad (1)$$

حيث أن:
P: القدرة الكهربائية بالوات (**w**)
CP: معامل كفاءة تحويل الطاقة حسب كتيب مواصفات التوربينة (**CP=0.48**)
Nwg: كفاءة المولد الكهربائي.
P: كثافة الهواء على مستوى سطح البحر (1.22 **kg/m3**)
A: المساحة التي يدور فيها العضو الدوار (**m2**).
حيث يمكن قياس المساحة التي يدور فيها العضو الدوار من خلال المعادلة التالية :

$$A=\pi\ D^2/4 \qquad (2)$$

حيث أن:
D قطر العضو الدوار (2.7 **m**)
V معدل سرعة الرياح بالموقع (4 **m/s**)
حسابات سرعة الدوران للتوربينة
يمكن تحديد سرعة الدوران بالمعادلة الآتية:

$$N=120f / P \qquad (3)$$

حيث أن :
P عدد الأقطاب بالمولد 30
f التردد عند السرعة المرجعية 150 هرتز.

2-3 تجربة(2)النموذج الرياضي لتحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية
تم استخدام البيانات الخاصة بالتوربينة (هومر) طبقًا لكتالوج الشركة المصنعة وقياسات الموقع كما هو موضح في جدول (1).
تم حساب القدرة الكهربائية وفق المعادلة (1):
تم حساب القدرة الكهربائية المتوقع الحصول عليها من التوربينة حسب المتوسط الذي تم قياسه بالموقع باستخدام المعادلة رقم 1

$$P=0.5\ CP\ N_{wg}\ P\ A\ V^3$$

لحساب المساحة التي يدور بها الريش نستخدم المعادلة رقم 2

$$A=3.14*\frac{2.7^2}{4}=5.722m^2$$

حساب القدرة الناتجة عند سرعة الرياح التصميمية (7 m/s) نستخدم المعادلة رقم 3

$$P=0.5*0.48*1.225*0.97*5.722*\ 7^3$$

لحساب الطاقة الكهربائية اليومية المنتجة من التوربينة حسب المعادلة نستخدم المعادلة رقم4

$$AEo=0.01328\ D^2V^2$$

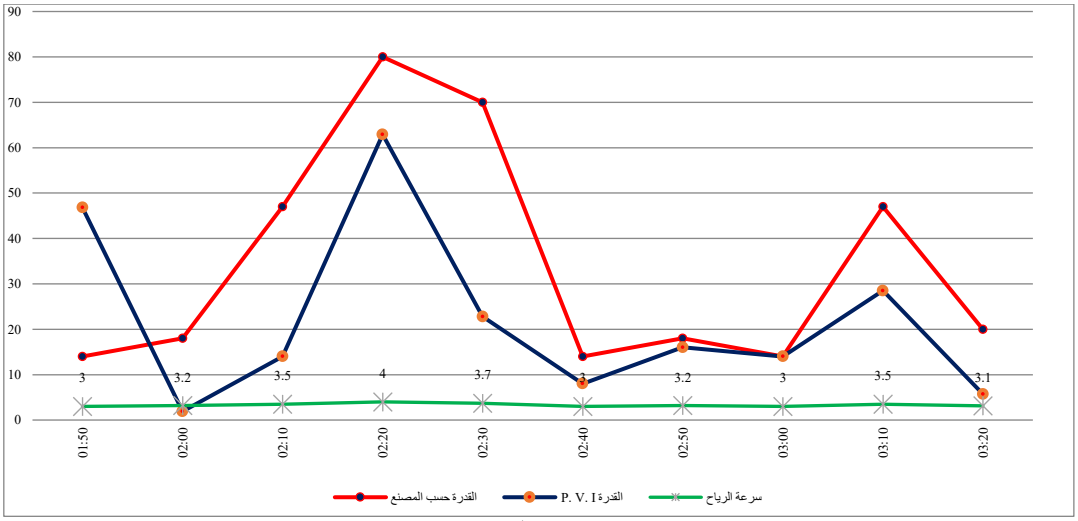
حيث D قطر المساحة التي تدور فيها الريش وتساوي 2.7 متر مربع وتساوي 8 قدم تقريباً و V سرعة الرياح التصميمية 7 متر/ثانية.
تساوي تقريباً 15.7 ميل/ساعة، بذلك أمكن التعويض بالمعادلة الاستخراج القدرة السنوية ثم اليومية.

$$AEo=0.01328*64**3870=3289Kwh/year$$

أي أن التوربينة قادرة على إنتاج 560وات عند سرعة 7 م/ث، وهي السرعة المتوسطة بالمنطقة.

3-3 تجربة(3)دراسة قياسات سرعة الرياح بالموقع

تمت دراسة بيانات سرعة الرياح في موقع التوربينة خلال الفترة 2013–2024، حيث بلغ متوسط السرعة حوالي m/s4 ، وهي سرعة كافية لتشغيل التوربينة نظرًا لأنها تفوق سرعة الدخول (Cut-in Speed) البالغة 3 .m/s وقد سُجلت أعلى سرعة رياح خلال الفترة المذكورة بقيمة m/s11 ، في حين كانت أقل سرعة مسجلة m/s0 ، وهو ما يعكس التباين الطبيعي في الرياح الموسمية بالمنطقة.
أما القياسات الميدانية بتاريخ 2024/11/09، فقد أوضحت أن أعلى سرعة رياح في ذلك اليوم بلغت m/s3.2 ، بينما كانت أقل سرعة 0 m/s كما هو مبين في شكل (13). ويُظهر هذا التباين أهمية الاعتماد على قياسات طويلة الأمد لضمان دقة تقييم المورد الهوائي قبل تركيب أنظمة الرياح.
تؤكد هذه النتائج أن متوسط سرعة الرياح في الموقع يقع ضمن نطاق التشغيل الأمثل للتوربينات الصغيرة، والذي يتراوح عادةً بين 3 – 10 m/s، كما أشار Roy et al (2023) في دراساتهم حول جدوى مشاريع الرياح في البيئات ذات الرياح المتوسطة.



شكل (10) سرعة رياح بالموقع كانت 3.2 م/ث.

4-3 تجربة (4) قياسات منحنى القدرة (بدون أحمال)

تم إجراء تجربة عملية لقياس منحنى القدرة للتوربينة بعد توصيلها بجهاز التحكم وبعدد 2بطارية بسعة تشغيلية تعادل 24V. وقد نُفذت التجربة بتاريخ 02/01/2025، حيث أظهرت النتائج القيم التالية:

أعلى سرعة رياح مسجلة.4 m/s

أقل سرعة رياح مسجلة.3.1 m/s

أقصى تيار خرج.3.7 A

أقصى جهد للمولد.20 V

أعلى قدرة مسجلة 62.9 W :عند سرعة رياح مقدارها .4 m/s

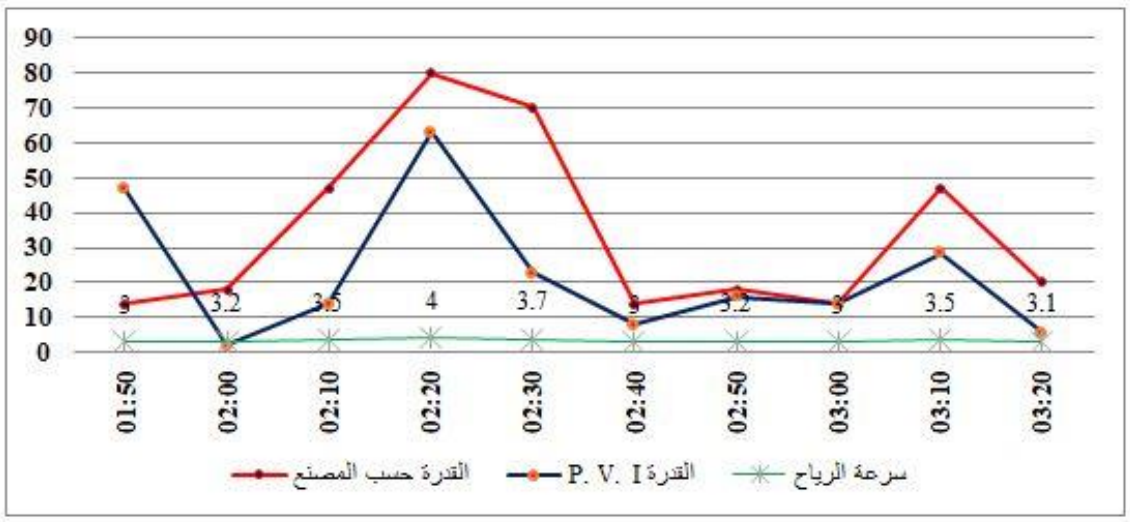
تشير هذه النتائج إلى أن القدرة الناتجة عند هذه السرعات المنخفضة أقل من القيم التصميمية للتوربينة، وهو ما يمكن تفسيره بارتفاع المقاومة الداخلية للمولد وتذبذب سرعات الرياح الفعلية مقارنة بالقيم النظرية. وتتوافق هذه الملاحظات مع نتائج (da Silva et al., 2025)التي بيّنت أن أداء التوربينات الصغيرة في ظروف الرياح المنخفضة يتأثر بوضوح بالعوامل الميكانيكية والكهربائية. كما أشار Usubamatov et al. (2012) إلى أن تحسين تصميم الريش قد يرفع كفاءة التوربينات عند سرعات منخفضة، وهو ما يدعم ضرورة تطوير حلول تقنية لتحسين الاستفادة من الموارد الهوائية في مثل هذه المواقع.

كما في الجدول رقم (2)

جدول رقم (2)نتائج التجربة الأولى

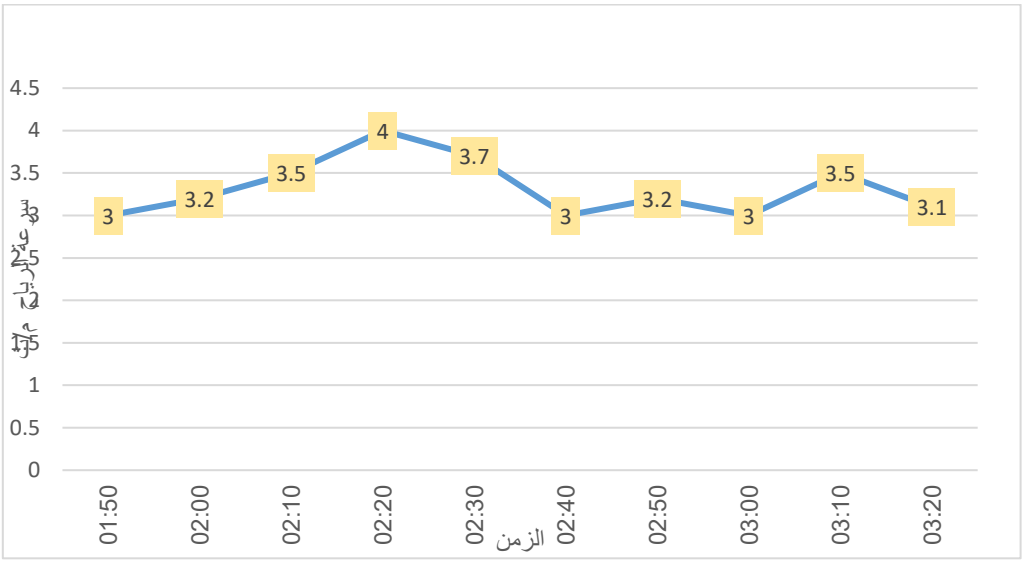
الزمن Min	جهد البطارية V	تيار المولد A	جهد المولد V	سرعة الرياح m/s	درجة حرارة الهواء C0	القدرة P.V.I	القدرة حسب المصنع
01:50 م	24.8	2.6	18	3	16.5	46.8	14
02:00 م	24.7	0.1	19	3.2	16.9	1.9	18
02:10 م	25	0.7	20	3.5	16.8	14	47
02:20 م	25	3.7	17	4	16.6	62.9	80
02:30 م	24.8	1.2	19	3.7	16.2	22.8	70
02:40 م	24.8	0.5	16	3	16.7	8	14
02:50 م	24.9	0.8	20	3.2	16.9	16	18
03:00 م	24.8	0.7	20	3	16.9	14	14
03:10 م	25.8	1.5	19	3.5	17.1	28.5	47
03:20 م	24.8	0.3	19	3.1	16.2	57	20
	24.94V V	1.21A A	18.7V V	3.32m/s m/s	$16.68C^0$ C^0	22.06W W	34.5 W W

منحنيات القدرة موضحة في الأشكال(11)(12)



شكل(11)العلاقة بين سرعة الرياح والقدرة.

يلاحظ من الشكل السابق (9) أنه أعلى قيمة للقدرة تحصلنا هي **62.9W** عندما كانت سرعة الرياح **4 m/s**، بينما كانت أقل قيمة للقدرة هي **1.9 W** عندما كانت سرعة الرياح **3.2 m/s** .



شكل(12)العلاقة بين سرعة الرياح والزمن.

يلاحظ من الشكل (12) أنه أعلى قيمة لسرعة الرياح هي 4 m/s عند توقيت 02:20 م وأقل قيمة لسرعة الرياح هي 3 m/sعند توقيت (01:50 م).

4-3 تجربة إضافية لقياس منحنى القدرة

بتاريخ **12/01/2025**ولمدة 10 دقائق عند الساعة 02:15 مساءً

- أعلى قدرة **555.81 W** عند سرعة 9.m/s
- أقل قدرة **135 W** عند سرعة 4.2 m/s

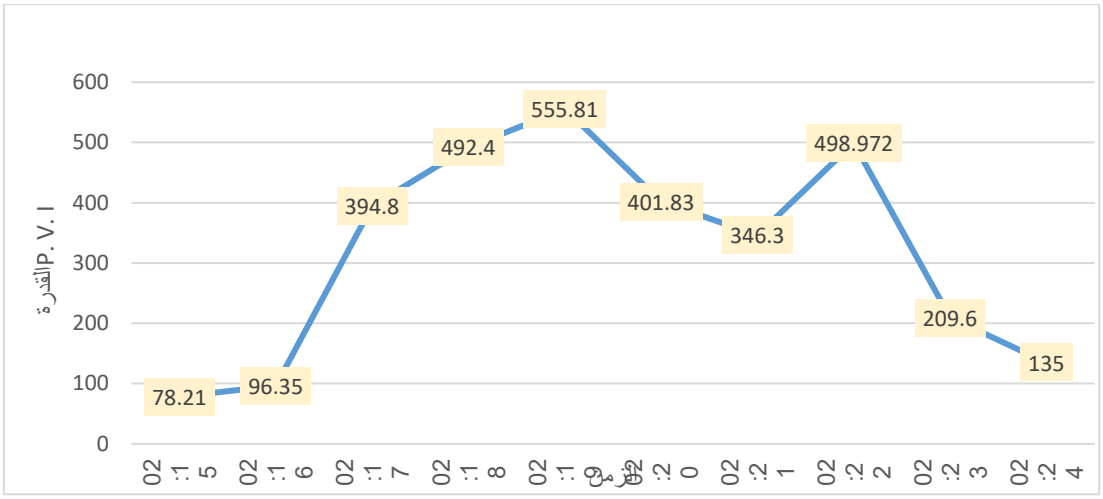
جدول (3) يوضح النتائج، بينما يبين الشكل (15) منحنى القدرة.

اجريت تجربة اضافية بتاريخ 2025/01/12 لفترة 10 دقائق عند الساعة 02:15 مساءً، وذلك لدراسة منحن القدرة وبين الجدول (3) أن أعلى قدرة وصلت أثناء القراءة الخامسة وكانت بقيمة 555.81 وات، بينما أقل قدرة كانت 135 وات. كما هو مبين بالشكل (15).

جدول (3) يوضح نتائج التجربة

سرعة الرياح m/s	الجهد V	التيار A	القدرة W P. V. I	القدرة حسب المصنع
3.5	23.7	3.3	78.21	47
4	23.5	41	96.35	80
6	28.2	14	394.8	378
7	28.8	17.1	492.4	495
9	29.1	19.1	555.81	584
6	28	13	401.83	
5.8	28.16	12.3	346.3	360
7	29.01	17.2	498.972	495
4.9	26.2	8	209.6	190
4.2	25	5.4	135	120
m/s 5.74	V 24.147	A 11.35	W 320.97	W 274.9

جدول رقم (3) يوضح نتائج التجربة منحنى القدرة وصل إلى 555.81



شكل (13) منحنى القدرة لتوربينة الرياح لفترة 10 دقائق.

اجريت هذه الدراسة خلال فصل الشتاء الذي يتميز بارتفاع سرعات الرياح مقارنة ببقية الفصول، وتم التركيز على تيار الشحن الخارج من جهاز التحكم باعتباره المؤشر المباشر للطاقة المتولدة. بينت النتائج أن التوربينة تبدأ العمل عند سرعة دخول 3 m/s، حيث بلغ أقصى تيار مسجل في التجربة الأولى 3.7 A عند متوسط سرعة رياح 3.32 m/s، مع متوسط جهد بطاريات 24.94 V، وهو قريب من القيمة التصميمية المعلنة من الشركة المصنعة.

في التجربة الثانية ارتفع متوسط سرعة الرياح إلى 6 m/s ووصل إلى حد أقصى 9 m/s، مما انعكس على زيادة التيار ليسجل 19 A، وبلوغ القدرة القصوى المنتجة 555.81 W، وهي قيمة قريبة جدًا من القدرة التصميمية للتوربينة 584 W). هذا يعكس كفاءة عالية للتوربينة في ظروف الموقع، كما يؤكد توافق النتائج العملية مع القيم النظرية عند السرعات المتوسطة والعالية.(Bhimaraju & Mahesh, 2024)

خلال فترة التشغيل التي تجاوزت ثلاثة أشهر، أثبتت التوربينة ملاءمتها للعمل في المنظومات المعزولة عن الشبكة الكهربائية، بشرط استمرار تشغيلها وإيقافها فقط أثناء العواصف لتفادي تلف الريش. كما أظهرت البطاريات المركبة (200 Ah) قدرة على توفير جهد مستقر للأحمال، خصوصًا عند استخدام المصابيح الموفرة للطاقة ذات الاستهلاك المنخفض، مما يسمح بتشغيل عدد كبير منها دون التأثير على استقرار الجهد(Alotaibi, 2011) .

الاستنتاجات

أظهرت نتائج الدراسة وجود فروق بين القدرة النظرية المحسوبة باستخدام النموذج الرياضي والقدرة الفعلية المقاسة ميدانيًا. عند سرعات الرياح المنخفضة (3–4 م/ث)، سُجل تيار شحن أقصى بلغ **3.7 A** بمتوسط سرعة رياح **3.32 m/s**، ومتوسط جهد بطاريات بلغ **24.94 V**، وهي قيمة قريبة من القيمة التصميمية للشركة المصنعة (Turner, 1999). ويُعزى انخفاض القدرة في هذه المرحلة إلى المقاومة الداخلية للمولد وعدم انتظام الرياح، وهو ما يتفق مع ما ذكره **(Alotaibi, 2011)** حول حساسية التوربينات الصغيرة للتغيرات المناخية.

عند زيادة سرعة الرياح إلى **6 m/s** ووصولها إلى أقصى قيمة **9 m/s**، ارتفع التيار المسجل ليبلغ **19 A**، بينما وصلت القدرة القصوى المنتجة إلى **555.81 W**، وهي قريبة جدًا من القدرة الاسمية للتوربينة البالغة **584 W**، مما يعكس كفاءة تشغيلية عالية في ظروف الموقع (Bhimaraju & Mahesh, 2024). كما أثبتت القياسات أن التوربينة تبدأ العمل عند سرعة دخول **3 m/s** وتصل إلى ذروة أدائها بين **7–9 m/s**، قبل أن يتم إيقافها عند سرعة الخروج **20 m/s** لحمايتها من التلف.(Usubamatov et al., 2012)

على المستوى العملي، أثبتت النتائج أن التوربينة مناسبة لتشغيل الأحمال المنزلية البسيطة مثل الإنارة وأجهزة التلفاز، لكنها غير كافية لتشغيل الأحمال ذات الاستهلاك العالي مثل المكيفات والسخانات. ومن ثم، فإن دمجها مع منظومات الطاقة الشمسية في أنظمة هجينة يعد الخيار الأمثل لتحقيق استقرار الإمداد الكهربائي في المناطق المعزولة عن الشبكة (Roy et al., 2023).

التوصيات

- تُعد منظومات الرياح المنزلية الصغيرة (**500 – 1000 W**) مع بطاريات تخزين (**200 Ah**) خيارًا اقتصاديًا وعمليًا لتغذية المنازل في المناطق المعزولة، مقارنة بالتوربينات الكبيرة.
- لنجاح هذه الأنظمة، يجب التركيز على **نوع البطاريات** المستخدمة (مثل بطاريات الرصاص الحمضية المغلّفة ذات الشحن العميق)، إضافة إلى تحديد **الأحمال الاقتصادية** المناسبة لتفادي انخفاض الكفاءة.

- عند اكتمال شحن البطاريات، يُوصى بإيقاف التوربينة أو توجيه الطاقة نحو تشغيل أحمال إضافية (مثل مضخات المياه) لضمان استقرار المنظومة.
- في المناطق الريفية، يُوصى باستخدام توربينات رياح بقدرة **2.5 – 6 kW** لتغطية الأحمال المنزلية الكبيرة، مع إمكانية استخدام توربينات ميكانيكية لضخ المياه من الآبار.
- تعزيز المنظومة بدمجها مع **ألواح شمسية (2 × 100 W)** يرفع من موثوقية الإمداد بالطاقة، خصوصًا في فترات سكون الرياح.
- ضرورة اعتماد استراتيجيات **ترشيد الاستهلاك** من خلال استخدام أجهزة كهربائية اقتصادية وتقنيات العزل الحراري للمباني للحفاظ على الاستقرار الحراري وتقليل الطلب على الطاقة.

الخلاصة

خلصت الدراسة إلى أن التوربينة الصغيرة المركبة في **مركز الإشعاع الشمسي – النواقية بمدينة بنغازي** أظهرت أداءً فعّالًا يتماشى إلى حد كبير مع القيم النظرية عند سرعات الرياح المتوسطة والعالية، حيث بلغت القدرة القصوى **555.81 W** عند سرعة **9 m/s**، وهي قريبة جدًا من القدرة التصميمية. كما أثبتت المنظومة كفاءتها في توفير طاقة مستقرة للأحمال المنزلية البسيطة، مع بقاء الحاجة إلى منظومات هجينة (رياح–شمس) لتعزيز الاستقرار في الإمداد.
بناءً على ذلك، تُعد هذه المنظومة خيارًا عمليًا واقتصاديًا لتزويد المنازل الريفية والمناطق المعزولة بالطاقة الكهربائية، وتؤكد أهمية الاستثمار في الأنظمة الصغيرة والمتوسطة للطاقة المتجددة كبديل مستدام للوقود الأحفوري (Panwar et al., 2011; IPCC, 2012).

المراجع

[1] Abubakkar, A., Sankara, T., & Makeshkumar, M. (2016). Design and fabrication of micro wind turbine. International Journal of Science, Engineering and Technology Research (IJSETR), 5(5), 1785–1787.
[2] Bhimaraju, A., & Mahesh, A. (2024). Recent developments in PV/wind hybrid renewable energy systems: a review. Energy Systems. Springer. https://doi.org/10.1007/s12667-024-00679-3
[3] Da Silva, P. F. D. L., Góes, J. F., Góes, M. L., Vaz, J. R. P., & do Nascimento, E. O. (2025). Performance analysis of a small wind turbine rotor using CFD. Rovista Osservatori de la Economo Latinoamericana, 23(6), e10276. https://doi.orge/10.55905/oelv23n6-073
[4] Gijón, A., Eiraudo, S., Banjarmasin, A., Schiera, D. S., Molina-Solana, M., & Mezzomerico, J. (2025). Integrating physics and data-driven approaches: an explainable and uncertainty-aware hybrid model for wind turbine power prediction. Computer Physics Communications, 316. https://doi.org/10.48550/arXiv.2502.07344
[5] IPCC. (2011). Renewable Energy Sources and Climate Change Mitigation (Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change). Cambridge University Press. https://doi.org/10.1017/CBO9781139151153
[6] Nwagu, C. A., Ujah, E. C., Gallon, D. V., & Aigbodion, V. S. (2025). Integrating solar and wind energy into the electricity grid for improved power accessibility. Unconventional Resources, 5, Article 100129.
[7] Kouissi, M., En-Naomi, E., & Zouhair, A. (2021). Hybrid solution for wind turbines power curve modeling using CBR, MAS, and K-nearest neighbors. Journal of Theoretical and Applied Information Technology, 99(12), 2590–2601.
[8] Panwar, N. L., Kaushik, S. C., & Kothari, S. (2011). Role of renewable energy sources in environmental protection: A review. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 15(3), 1513–1524. https://doi.org/10.1016/j.rs-er.2010.11.037
[9] Roy, P., He, J., Chaos, T., & Singh, Y. V. (2023). Recent advances of wind–solar hybrid renewable energy systems for power generation: A review. IEEE Industrial Electronics Society Newsletter. https://iten.ieee-ies.org

[10] Solvable, B. K. (2009). The intermittency of wind, solar, and renewable electricity generators: technical barrier or rhetorical excuse? Utilities Policy, 17(3), 288–296. https://doi.org/10.1016/j.jup.2008.07.001
[11] Turner, J. A. (1999). A realizable renewable energy future. Science, 285(5428), 687–689. https://doi.org/10.1126/science.285.5428.687
[12] Alotaibi, S. (2011). Energy consumption in Kuwait: Prospects and future approaches.EnergyPolicy,39(2),637643.https://doi.org/10.1016/j.enpol.2010.10.036

الوحدات

فيما يلي توضيح لأهم الوحدات المستخدمة في هذا البحث وفقًا للنظام الدولي للوحدات:(SI)

الكمية الفيزيائية	الرمز	الوحدة الدولية(SI)
القدرة الكهربائية	P	وات(W)
القدرة الظاهرية	S	فولت أمبير(VA)
القدرة التفاعلية	Q	فولت أمبير تفاعلي(VAR)
الجهد الكهربائي	V	فولت(V)
التيار الكهربائي	I	أمبير(A)
الطاقة	E	واط ساعة / (Wh) كيلو واط ساعة(kWh)
الإشعاع الشمسي	G	وات لكل متر مربع(W/m^2)
التردد	f	هرتز(Hz)
الزمن	t	ثانية / (s) ساعة(h)
السعة الكهربائية للبطارية	C	أمبير ساعة(Ah)
معامل القدرة	PF	بدون وحدة (نسبة)
درجة الحرارة	T	درجة مئوية(°C)
الكتلة / الوزن	m	كيلوغرام (kg) أو كيلوجرام(kg)

المعادلات

تم حساب القدرة الكهربائية وفق المعادلة (1)

$$P = 0.5\ CP\ N_{wg}\ P\ A\ V^3$$

المساحة التي يدور بها الريش نستخدم المعادلة رقم (2)

$$A=3.14*\frac{2.7^2}{4}=5.722m^2$$

لحساب القدرة الناتجة عند سرعة الرياح التصميمية (7 m/s) وفق المعادلة(3)

$$P=0.5*0.48*1.225*0.97*5.722*\ 7^3$$

لحساب الطاقة الكهربائية اليومية المنتجة من التوربينة حسب المعادلة وفق المعادلة(4)

$$AEo=0.01328\ D^2V^2$$