

## تصميم تربينات الرياح الصغيرة اعتمادا على تقييم الانتاج السنوي للطاقة لمختلف مناطق التركيب.

## Design Small Wind Turbine Based On Energy Production For Various Installation Region

دباش محمد<sup>1</sup>،

Debbache Mohammed

<sup>1</sup>Centre de Developpement des Energies Renouvelables BP. 62 Route de l'Observatoire Bouzareah 16340

(الجزائر)، [m.debbache@cder.dz](mailto:m.debbache@cder.dz)

تاريخ النشر: ديسمبر / 2024

تاريخ القبول: 2024/12/15

تاريخ الإرسال: 2024/10/02

### الملخص:

يتناول هذا البحث تصميم توربينات رياح صغيرة الحجم بهدف تحسين كفاءتها في إنتاج الطاقة في مناطق تركيب مختلفة ذات سرعة رياح منخفضة إلى متوسطة. في ظل زيادة الطلب على الطاقة والتوجه نحو مصادر الطاقة المتجددة، تبرز الحاجة إلى تطوير توربينات رياح صغيرة أكثر كفاءة. يعتمد البحث على برنامج QBlade لتحليل الديناميكيات الهوائية وتصميم شفرات توربينات باستخدام مقاطع ديناميكية مختلفة من نوع NACA2410 و NACA2415 و NACA2420. تم تقييم أداء هذه التصميمات من حيث كفاءة تحويل الطاقة والإنتاج السنوي للطاقة. أظهرت النتائج أن تصميم الشفرة ذات المقطع NACA2410 هو الأكثر كفاءة، حيث قدم أفضل تصميم من حيث توزيع الوتر وزاوية الالتواء، مما يجعله الأنسب للاستخدام في البيئات ذات سرعة رياح منخفضة، مع تحقيق أعلى إنتاج سنوي للطاقة.

**الكلمات المفتاحية:** الرياح، ديناميكا، شفرة، الدوار، طاقة، السحب، الرفع.

### Abstract:

This research focuses on the design of small wind turbines aimed at improving energy production efficiency in various installation regions with low to medium wind speeds. With the increasing demand for energy and the shift towards renewable energy sources, there is a growing need to develop more efficient small wind turbines. The study utilizes the QBlade software for aerodynamic analysis and the design of turbine blades using different airfoil profiles, including NACA2410, NACA2415, and NACA2420. The performance of these designs was evaluated in terms of energy conversion efficiency and annual energy production. The results showed that the NACA2410 blade design is the most efficient, offering the best performance in terms of chord distribution and twist angle, making it the most suitable for environments with low wind speeds, while achieving the highest annual energy output.

**Key words:** Wind, aerodynamics, blade, rotor, power, drag, lift.

## المدخل : Introduction

في ظل تزايد الطلب العالمي على الطاقة والتحديات البيئية الناجمة عن استهلاك الوقود الأحفوري، أصبحت مصادر الطاقة المتجددة، وخاصة طاقة الرياح، ضرورية في التحول نحو توليد الطاقة المستدامة. تعتبر طاقة الرياح واحدة من أكثر مصادر الطاقة المتجددة فعالية من حيث التكلفة والإنتاج، حيث وصلت القدرة العالمية المركبة لطاقة الرياح إلى مستويات غير مسبوقة. وفقاً لتقرير هيئة REN21<sup>1</sup> حول لمستوى الإنتاجية العالمية للطاقة المتجددة لعام 2024، شكلت الطاقة المتجددة 86% من إضافات القدرة الكهربائية في عام 2023، مما يعكس الدور المحوري الذي تلعبه طاقة الرياح في تقليل انبعاثات الغازات الدفيئة والتصدي لتغير المناخ. كما أكدت الوكالة الدولية للطاقة المتجددة IRENA<sup>2</sup> على أن طاقة الرياح تعتبر أساسية لتحقيق الأهداف المناخية، مما يبرز الحاجة إلى تحسينات تكنولوجية واستثمارات مستمرة في هذا القطاع. وعلى الرغم من التقدم الكبير في تطوير توربينات الرياح الكبيرة، لا تزال توربينات الرياح الصغيرة (SSWTs) غير مطورة بشكل كافٍ، مما يقدم فرصاً كبيرة لتحسينها، خاصة في المناطق ذات سرعة رياح منخفضة.

تناولت العديد من الدراسات تحسين تصميم وأداء توربينات الرياح الصغيرة من خلال تحسين الجوانب الديناميكية والهيكلية. حيث قام Y.<sup>3</sup>Liu و آخرون بدراسة تأثير الأخاديد السطحية على شفرة ذات المقطع NACA 4415 ، وأظهروا أن أشكال معينة للأخاديد يمكن أن تحسن بشكل كبير الأداء الديناميكي عن طريق تقليل دوامات الهواء على مستوى الشفرة مما يعزز كفاءة توربينات الرياح الصغيرة التي تعمل عند أرقام رينولدز المنخفضة. كما قام Suresh. A<sup>4</sup> و آخرون بتحليل العديد من مقاطع الشفرات باستخدام برنامج QBlade لتوربينات الرياح الصغيرة ذات المحور الأفقي (HAWTs)، وخلصوا إلى أن الشفرة ذات المقطع SD7080 كانت الأكثر فعالية في تطبيقات الرياح المنخفضة السرعة، مما يجعلها مثالية للتركيبات في المناطق الريفية. وبالمثل، أجرى Yossri. W<sup>5</sup> و آخرون دراسة شاملة باستخدام منهجية ديناميكا الموائع الحسابية (CFD) لتوربينات الرياح الصغيرة، ووجدوا أن الشفرة NACA 4412 قدمت أفضل أداء بين عدة أنواع من الشفرات وقيم أقطار الدوار. أين سلطت هذه الدراسات الضوء على أهمية اختيار أفضل مقاطع الشفرات وأحجام الدوار لتحسين التقاط الطاقة وزيادة الكفاءة.

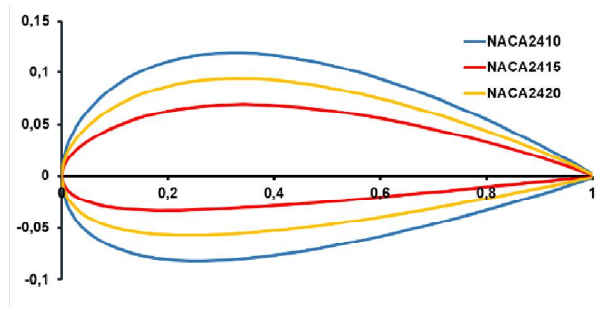
كذلك لتحسين أداء الشفرات تلعب توزيع زاوية الالتواء على طول الشفرة دوراً حاسماً في أداء توربينات الرياح. قامنا في دراسة سالفة بتطوير منهجية لتصحيح زاوية الالتواء التي حسنت إنتاج الطاقة السنوي بنسبة 5%، مما يبرز أهمية تحسين تصميم الشفرة لزيادة الكفاءة في ظروف الرياح المختلفة.<sup>6</sup> أجرى Zalewska. J<sup>7</sup> و آخرون دراسة حول الكفاءة الطاقوية لتوربينات الرياح الصغيرة (SWTs) في بولندا، من خلال تحليل بيانات الرياح لمدة خمس سنوات من ثلاث مواقع مختلفة: ساحلية، سفوح الجبال، وسهلية. وجدت الدراسة أن الموقع الساحلي، الواقع في المنطقة الريحية ذات الدرجة الأولى، يمتلك أعلى سرعات رياح، مما أدى إلى أفضل إنتاج للطاقة بقدرة إنتاج سنوية بلغت 26,735 كيلوواط/ساعة وفترة

استرداد للاستثمار بلغت 13 عاماً. في المقابل، أظهر الموقع السهلي إنتاجاً سنوياً قدره 5,718 كيلوواط/ساعة، مع فترة استرداد للاستثمار تجاوزت 57 عاماً، مما يجعله غير مجدٍ اقتصادياً. تبرز هذه النتائج الأهمية الكبيرة لاختيار المواقع المثلى لتركيب توربينات الرياح الصغيرة، حيث تقدم المناطق الساحلية أفضل عائد على الاستثمار. كما أجرى M.Hazmoune<sup>8</sup> وآخرون دراسة لتقييم الأداء الديناميكي الهوائي لتوربين هوائي صغير من نوع BORNy بقدرة 1 كيلوواط، والمخطط تركيبه في مدينة كونستانتا، رومانيا، حيث يبلغ متوسط سرعة الرياح 6 م/ثا. ركزت الدراسة على تحليل تأثير تصميمات مختلفة لشكل مقطع الشفرات الهوائية، بما في ذلك NACA0012 و NACA0015 و S825 و S833، من خلال محاكاة حاسوبية لتقييم الرفع والسحب والكفاءة العامة تحت ظروف رياح مختلفة. أظهرت النتائج أن الشفرة ذات المقطع S833 قدم أفضل أداء، حيث حقق أعلى نسبة رفع إلى سحب، مما أدى إلى تحسين كفاءة تحويل الطاقة بشكل كبير. تسلط هذه الدراسة الضوء على أهمية تحسين تصميم الشفرات لتعزيز أداء التوربينات الهوائية صغيرة الحجم في ظروف الرياح المحددة.

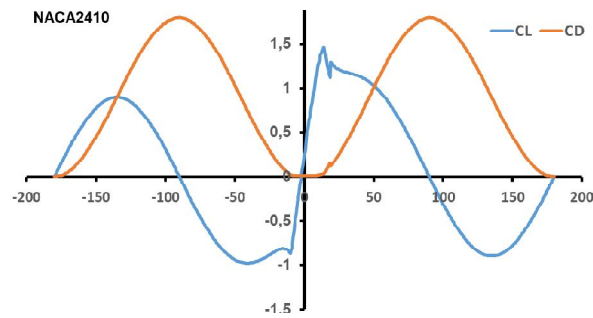
على الرغم من هذه التطورات، لا تزال الأبحاث المتعلقة بتحسين توربينات الرياح الصغيرة، خاصة في التطبيقات الريفية والمناطق ذات الرياح المنخفضة، قليلة مقارنة بتوربينات الرياح الكبيرة. يهدف هذا البحث إلى تحديد أفضل تصميم لتوربينات الرياح الصغيرة باستخدام برنامج QBlade<sup>9</sup>. من خلال تصميم الشفرة اعتماداً على مقاطع مختلفة الشكل، يسعى البحث إلى تحسين أداء توربينات الرياح في البيئات ذات الرياح المنخفضة، مساهماً في تحقيق هدف أوسع يتمثل في تعزيز الوصول إلى الطاقة في المناطق الريفية والمناطق خارج الشبكة. يعتمد هذا البحث على الدراسات السابقة، مدمجاً رؤى من ديناميكيات الموائع الحسابية ونظرية BEM<sup>10</sup> لاقتراح تصميم توربينات رياح محسن يوازن بين الكفاءة، والتكلفة، والموثوقية.

### المواد والطرائق : Materials and methods

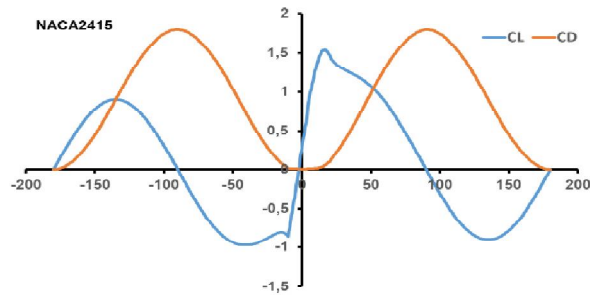
لمعرفة أحسن تصميم لتوربين الرياح الصغير اعتماداً على شكل مقطع الشفرة الديناميكي المستعمل و إجمالي الإنتاج السنوي للتربين. اختير توربين رياح بقدرة 3 كيلوواط وطول شفرة 2 متر، باستخدام المقاطع الهوائية NACA2410، NACA2415، و NACA2420 الموضحة في الشكل (1). ذات الخصائص الديناميكية من معامل السحب (CD) و الرفع (CL) المبينة في الأشكال (2-3-4) على التوالي تبعا لنموذج Viterna<sup>11</sup>. هذا التربين ذو الخصائص المبينة في الجدول (1). الدراسة تمت باستعمال برنامج Qblade الذي يعتمد على نظرية ديناميكا جزء الشفرة الخاصة بدراسة فعالية تربينات الرياح. حيث تمت دراسة التربين المختار مسبقاً من حيث الفعالية لمجال تغير لسرعة الرياح بين 2م/ثا إلى 20 م/ثا لتحديد تصاميم الشفرات الملائمة. و كمرحلة ثانية . دراسة تقييمية للتصاميم المقبولة أنفاً من حيث الإنتاج السنوي في عدة مناطق تركيب ذات سرعات متوسطة 3م/ثا ، 4م/ثا ، 5م/ثا و 6م/ثا على التوالي اعتماداً على نموذج Rayleigh<sup>12</sup> لتغير سرعة الرياح لهذه المناطق (الشكل 5).



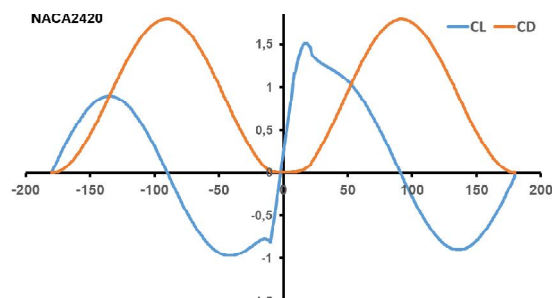
الشكل 1: الأشكال المقاطع الهوائية NACA2410 و NACA2415 و NACA2420.



الشكل 2: توزيع CL و CD للمقطع الهوائي NACA2410.



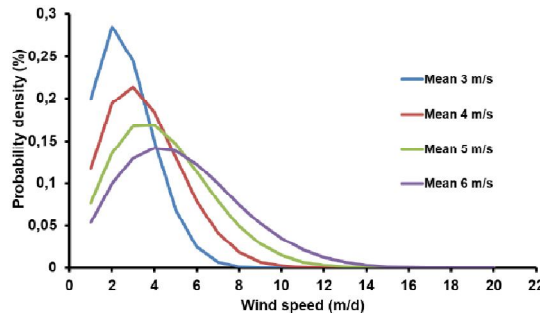
الشكل 3: توزيع CL و CD للمقطع الهوائي NACA2415.



الشكل 4: توزيع CL و CD للمقطع الهوائي NACA2420.

الجدول 1: خصائص التربين.

| الموصفات                           | المكون           |
|------------------------------------|------------------|
| 4م                                 | قطر الدوار       |
| 3                                  | عدد الشفرات      |
| NACA2410,<br>NACA2415,<br>NACA2420 | المقاطع الهوائية |
| 3كيلوواط                           | القدرة الاسمية   |
| 10 م/ثا                            | السرعة الاسمية   |
| 250 د/د                            | سرعة الدوران     |
| مولد متزامن مغناطيسي<br>دائم       | المولد           |
| 10 م                               | ارتفاع البرج     |
| 2.5م/ثا                            | سرعة البدء       |
| 20 م/ثا                            | سرعة الإيقاف     |



الشكل 5: نموذج Rayleigh الإحصائي للسرعة الرياح حسب المناطق.

## النتائج والمناقشة: Résulta et Discussion

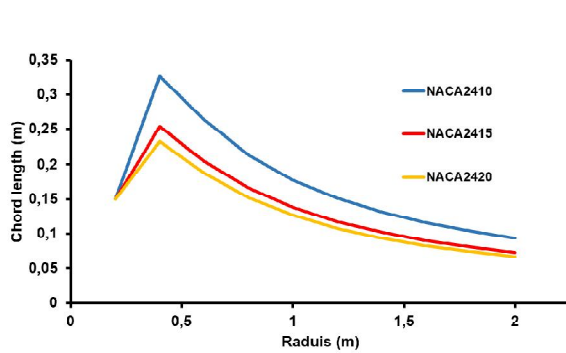
تظهر نتائج تحليل البيانات أن هناك فروقات واضحة بين التصميمات الثلاثة NACA2410 ، NACA2415 ، و NACA2420 من حيث الأداء الديناميكي وكفاءة تحويل الطاقة، مما يسمح بتحديد أفضل تصميم لتوربينات الرياح بناءً على الظروف البيئية.

### a- توزيع الوتر وزاوية الالتواء على طول الشفرة (Chord and twist):

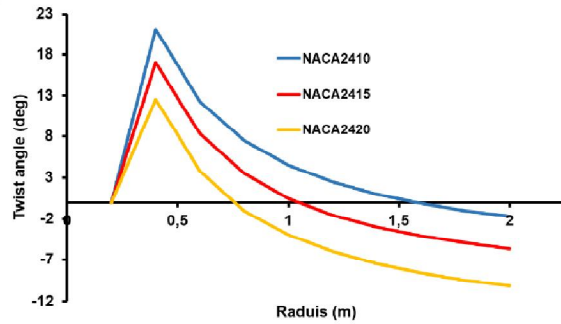
بالنظر إلى توزيع الوتر، نجد أن تصميم NACA2410 يحتفظ بأكبر طول للوتر عند أطراف الشفرة مقارنةً بالتصميمين الآخرين. على سبيل المثال، عند نصف قطر 1.0 متر، يبلغ طول الوتر في NACA2410 حوالي 0.177 متر مقارنةً بـ 0.138 متر بالنسبة لـ NACA2415 و 0.127 متر

بالنسبة لـ NACA2420. يشير هذا التفاوت إلى أن تصميم NACA2410 يعزز من قدرة الشفرة على النقاط الطاقة الهوائية عند الأطراف، مما يجعله أكثر كفاءة عند تغير سرعة الرياح (الشكل 6).

بالنسبة لتوزيع زاوية الالتواء، يظهر تصميم NACA2410 زوايا التواء أكبر بالقرب من مركز الشفرة، حيث تبدأ زاوية الالتواء عند 21.05 درجة عند نصف قطر 0.4 متر وتقل تدريجياً إلى 4.53 درجة عند قيمة نصف قطر 1.0 متر. هذه الزاوية الأكبر تعزز من كفاءة الشفرة في التحكم في تدفق الهواء، مما يساعد على زيادة القدرة المنتجة في سرعات الرياح المختلفة. بالمقارنة، تقل زاوية الالتواء بشكل ملحوظ في NACA2415 و NACA2420، مما يشير إلى كفاءة أقل في نفس الظروف (الشكل 7).



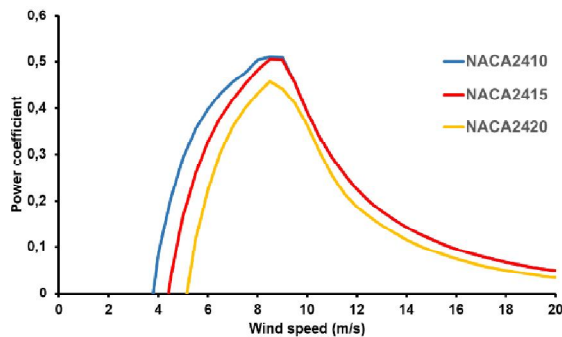
الشكل 7: توزيع زاوية الالتواء على طول الشفرة.



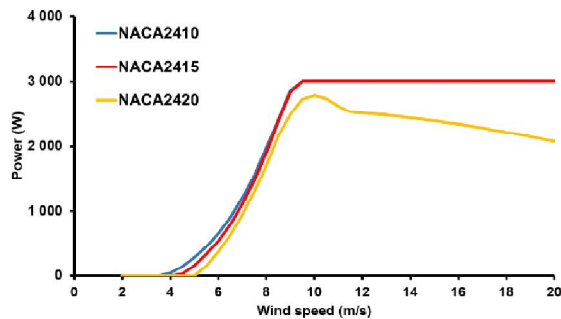
الشكل 6: توزيع الوتر على طول الشفرة.

### b - معامل الفعالية الطاقية (Power Coefficient) :

عند تحليل معامل القدرة عند سرعات رياح مختلفة، نجد أن تصميم NACA2410 يظهر تفوقاً واضحاً. على سبيل المثال، عند سرعة رياح 4.5 م/ثا، يبلغ معامل القدرة لـ NACA2410 حوالي 0.207، مقارنة بـ 0.037 فقط لـ NACA2415، و -0.299 لـ NACA2420. هذا يشير إلى أن NACA2410 يتمتع بأعلى كفاءة في تحويل طاقة الرياح إلى طاقة ميكانيكية مفيدة، مما يجعله أكثر فعالية في الظروف التشغيلية المتوسطة والعالية السرعة (الشكل 8).



الشكل 9: تغير الطاقة المنتجة بفعل تغير سرعة الرياح.



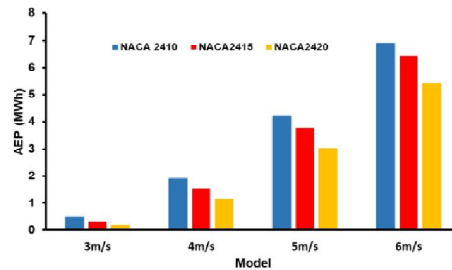
الشكل 8: تغير معامل الفعالية الطاقية بفعل سرعة الرياح.

**c- توزيع الطاقة المنتجة (Power):**

بالنظر إلى الرسم البياني للطاقة المنتجة في الشكل (9) حسب سرعة الرياح، يظهر أن النموذجين NACA2410 و NACA2415 يتمتعان بأعلى إنتاج للطاقة، حيث يصل إلى حوالي 3000 واط عند سرعة رياح 10 م/ثا. الطاقة المنتجة تستقر بعد الوصول إلى السرعة القصوى للتوربين، مما يعني أنه يحافظ على إنتاج مستقر حتى مع زيادة سرعة الرياح. هذا الاستقرار في إنتاج الطاقة هو ميزة مهمة للتوربينات التي تعمل في ظروف رياح متقلبة. على الجانب الآخر، النموذج NACA2420 يظهر إنتاجاً أقل للطاقة مقارنة بالنموذجين الآخرين. ويبدأ إنتاج الطاقة في الانخفاض بشكل ملحوظ بعد تجاوز السرعة المثلى. هذا الانخفاض في الإنتاج يجعله أقل تنافسية باقي النماذج عند سرعة رياح عالية أو منخفضة.

**d- الإنتاج السنوي للطاقة: (AEP):**

عند تحليل الإنتاج السنوي للطاقة، نجد أن NACA2410 يقدم أعلى إنتاج سنوي في المواقع ذات سرعات الرياح المختلفة. على سبيل المثال، فقط عند سرعة 6 م/ث، ينتج NACA2410 حوالي 6.90 ميغاواط/ساعة سنوياً، مقارنة بـ 6.43 ميغاواط/ساعة لـ NACA2415 و 5.40 ميغاواط/ساعة لـ NACA2420. هذا يعزز من مكانة NACA2410 كأفضل تصميم لتوربينات الرياح التي تهدف إلى تحقيق أعلى إنتاج سنوي للطاقة، خاصة في البيئات التي تتميز بسرعات رياح منخفضة إلى متوسطة (الشكل 10).



الشكل 10: الإنتاج السنوي للطاقة .

**الخلاصة : Conclusion**

استناداً إلى التحليل الشامل الذي تم إجراؤه في هذا البحث، يمكن استخلاص أن تصميم الشفرة الهوائية NACA2410 هو الأكثر كفاءة وفعالية بين التصميمات الثلاثة التي تمت دراستها (NACA2410، NACA2415، NACA2420) يتميز هذا التصميم بتوزيع مثالي للوتر وزاوية الالتواء على طول الشفرة، مما يسمح له بتحقيق أعلى مستويات كفاءة تحويل طاقة الرياح إلى طاقة كهربائية عالية. تظهر هذه الكفاءة بشكل خاص في البيئات ذات سرعة رياح منخفضة إلى متوسطة ، حيث يتمكن تصميم NACA2410 من الاستفادة القصوى من طاقة الرياح في تلك الظروف. ويتفوق بشكل ملحوظ في معظم سيناريوهات التشغيل، حيث يعزز من قدرته على التقاط طاقة الرياح بفعالية أكبر هذا التحسن في الكفاءة الديناميكية يؤدي إلى زيادة إنتاج الطاقة السنوي، مما يجعله الخيار الأكثر استدامة وجدوى اقتصادية، خاصة في المناطق التي تتميز برياح منخفضة إلى متوسطة.

## References:

- 1- REN21, 2024. Renewables 2024 Global Status Report. Paris: REN21 Secretariat.
- 2- International Renewable Energy Agency (IRENA), 2024. *Renewable energy statistics 2024*. Abu Dhabi: IRENA.
- 3- Liu, Y., Li, P., He, W. and Jiang, K., 2020. Numerical study of the effect of surface grooves on the aerodynamic performance of a NACA 4415 airfoil for small wind turbines. *Journal of Wind Engineering & Industrial Aerodynamics*, 206, p.104263.
- 4- Suresh, A. and Rajakumar, S., 2019. Design of small horizontal axis wind turbine for low wind speed rural applications. *Materials Today: Proceedings*, [online] Available at: <https://doi.org/10.1016/j.matpr.2019.06.008>
- 5- Yossri, W., Ben Ayed, S. and Abdelkefi, A., 2021. Airfoil type and blade size effects on the aerodynamic performance of small-scale wind turbines: Computational fluid dynamics investigation. *Energy*, 229, p.120739.
- 6- Debbache M, Hazmoune M, Derfouf S, Ciupageanu D-A, Lazaroiu G. Wind Blade Twist Correction for Enhanced Annual Energy Production of Wind Turbines. *Sustainability*. 2021; 13(12):6931. <https://doi.org/10.3390/su13126931>
- 7- Zalewska, J., Damaziak, K. and Malachowski, J., 2021. An energy efficiency estimation procedure for small wind turbines at chosen locations in Poland. *Energies*, 14(12), p.3706. <https://doi.org/10.3390/en14123706>,
- 8- M. Hazmoune, G. Lazaroiu, D.-A. Ciupageanu and M. Debbache, "Comparative study of airfoil profile effect on the aerodynamic performance of small scale wind turbines," *2021 12th International Symposium on Advanced Topics in Electrical Engineering (ATEE)*, Bucharest, Romania, 2021, pp. 1-6, doi: 10.1109/ATEE52255.2021.9425211.
- 9- Qblade software: <https://qblade.org/>.
- 10- Burton, T., Sharpe, D., Jenkins, N., & Bossanyi, E. (2001). *Wind energy handbook*. Wiley. <https://doi.org/10.1002/9781119992714>
- 11- L.A. Viterna, R.D. Corrigan, Fixed Pitch Rotor Performance of Large Horizontal Axis Wind Turbines, in: DOE Workshop on Large Horizontal Axis Wind Turbines, OH, 1981.
- 12- Serban, A., Paraschiv, L.S. and Paraschiv, S., 2020. Assessment of wind energy potential based on Weibull and Rayleigh distribution models. *Energy Reports*, 6(Suppl. 6), pp.250-267. <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.08.048>