

**STUDIU EXPERIMENTAL PRIVIND
INFLUENȚA NUMĂRULUI DE ETAJE
ALE ROTORULUI ASUPRA
PRODUCȚIEI DE ENERGIE A
TURBINEI SAVONIUS**

Drd.ing. Lucian Rus, *Universitatea
Tehnică, Cluj-Napoca*
Drd.ing. Tania Cătărig (Rus),
Universitatea Tehnică, Cluj-Napoca

**EXPERIMENTAL STUDY ON THE
INFLUENCE OF THE NUMBER OF
STAGES ON THE ENERGY
PRODUCTION OF SAVONIUS WIND
TURBINES**

Eng. Lucian Rus, PhD Stud., *Technical
University of Cluj-Napoca*
Eng. Tania Cătărig (Rus), PhD Stud.,
Technical University of Cluj-Napoca

REZUMAT

Turbinele Savonius fac parte din categoria turbinelor eoliene cu ax vertical de rotație, TEAV și sunt foarte potrivite pentru utilizarea la producerea de electricitate în zonele cu potențial eolian redus, unde turbinele eoliene cu ax orizontal, TEAO, cu rotor de tip elice funcționează la parametri deosebit de reduși. Principala problemă a acestui tip de turbină este eficiența de conversie a energiei eoliene, care are valori relativ reduse în comparație cu turbinele cu rotor de tip elice. Există mai multe metode pentru îmbunătățirea eficienței rotoarelor de acest tip, cum ar fi determinarea formei ideale a palelor rotorului sau a raportului optim de suprapunere a acestora. În lucrare este prezentat un studiu experimental care vizează determinarea numărului optim de etaje ale rotorului în vederea îmbunătățirii eficienței turbinei Savonius.

CUVINTE CHEIE: rotor, etaj, turbină eoliană, energie eoliană, electricitate.

1. INTRODUCERE

Turbinele eoliene Savonius sunt alcătuite dintr-un rotor cu pale semi-cilindrice sau semi-eliptice, amplasate sub forma literei „S” și funcționează utilizând numai efectul de frecare aerodinamică (fig. 1). Mișcarea de rotație se obține datorită faptului că coeficientul de frecare aerodinamică al suprafeței convexe a palei este mai mic decât cel al suprafeței concave, astfel că forțele care iau naștere pe aceste suprafețe

ABSTRACT

Savonius wind turbine are part of the vertical axis wind turbines category, VAWT and they are very suitable for electricity production in areas with low wind potential, areas where the horizontal axis wind turbines, HAWT, with a propeller type rotor, are working with very low efficiencies. The main problem of this type of wind turbine is the conversion efficiency of wind energy, which is relatively low compared with the one of the turbines with a propeller type rotor. There are several methods to improve the efficiency of the vertical axis wind rotors, such as determining the ideal design of the rotor blades or by choosing the optimum overlap ratio of the rotor blades. The paper presents an experimental study aimed to determine the optimal number of stages of the rotor in order to improve the efficiency of the Savonius wind turbine.

KEYWORDS: rotor, stage, wind turbine, wind energy, electricity.

1. INTRODUCTION

Savonius wind turbines are composed from a rotor with semi-cylindrical or semi-elliptical blades, placed in the form of the letter „S” and they are operating using only the effect of aerodynamic drag (fig. 1). The rotational movement is obtained because the coefficient of aerodynamic drag of the convex surface of the blades is lower than the one corresponding to the concave

au valori diferite, forța care acționează asupra palei concave fiind mai mare. În aceste condiții, momentul de rotație care acționează pe suprafața concavă a palelor este mai mare decât cel care acționează pe suprafața convexă a acestora, generând astfel o mișcare rotațională [8].

surface, such as the forces that are acting on this surfaces have different values, the force which is acting on the concave surface of the blade being higher. In this conditions, the torque that is acting on the concave surface of the blades is higher than the one which is acting on the convex surface, thus generating a rotational movement [8].

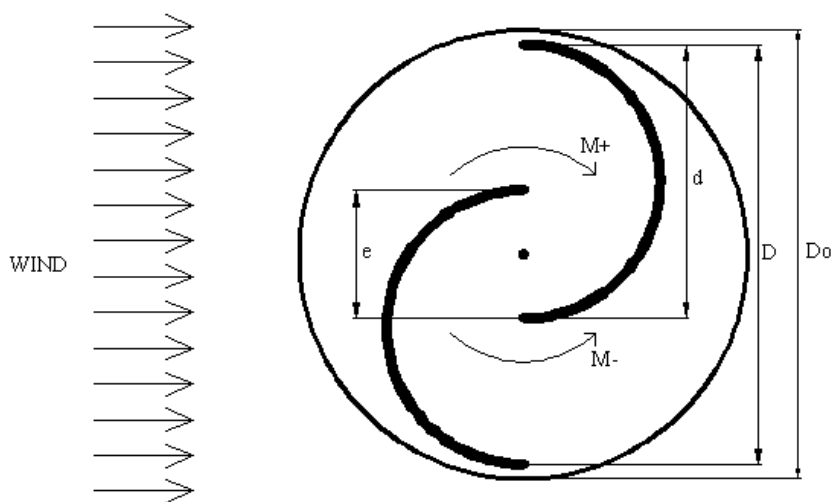


Fig. 1. Schema și principiul de funcționare ale rotorului Savonius
 D_0 – diametrul plăcii de capăt; D – diametrul rotorului; d – diametrul palei;
 e – distanța de suprapunere a palelor

Fig. 1. The scheme and the operating principle of the Savonius rotor
 D_0 – endplate diameter; D – rotor diameter; e – gap distance;
 d – blade diameter

Datorită faptului că turbinele eoliene Savonius funcționează numai pe baza efectului de frecare aerodinamică, iar mișcare de rotație a acestora este rezultatul unei diferențe a momentelor care acționează pe cele două pale ale rotorului, eficiența sau coeficientul de performanță ale acestora au valori reduse, care nu pot depăși 0.3 – 0.35, în timp ce turbinele cu rotor de tip elice pot atinge eficiențe mai ridicate (valoarea maximă a acestora, de 0.593 fiind stabilită prin limita lui Betz) pentru că, pe lângă efectul de frecare aerodinamică, aceste turbine folosesc și efectul de ascensiune aerodinamică pentru a crea mișcare [4]. Prin creșterea numărului de etaje se vizează îmbunătățirea momentului de rotație și asigurarea unui cuplu mult mai constant,

Because Savonius wind turbines operate using only the effect of aerodynamic drag and their rotational move is the result of the difference of the moments acting on the two rotor blades, the efficiency or the power coefficient of these turbines have low values, which cannot exceed 0.3-0.35, while the turbines with a propeller type rotor can achieve higher efficiencies (their maximum value of 0.593 being set by the limit of Betz) because, in addition to aerodynamic drag effect, these turbines also use the effect of aerodynamic lift in order to create rotational movement [4]. The increase of the number of stages is designed to improve the rotational moment and to ensure a more constant torque, both having beneficial effects on the efficiency of the wind turbine.

ambele având efecte benefice asupra eficienței turbinei eoliene.

2. PUTEREA EXTRASĂ DIN VÂNT

Puterea, indiferent de forma în care este analizată, este egală cu produsul dintre o forță și o distanță, cunoscut și ca lucru mecanic, împărțit la un interval de timp. Cantitatea de putere, P , care poate fi extrasă din vânt cu ajutorul unui rotor eolian depinde de viteza vântului și de aria scaldată a rotorului și poate fi determinată cu ajutorul relației următoare [2]:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3, \quad (1)$$

unde:

- C_p este coeficientul de putere al rotorului;
- ρ este densitate aerului, în kg/m^3 ;
- A este aria scaldată a rotorului, în m^2 ;
- v este viteza vântului, în m/s .

Aria scaldată a rotorului Savonius, precum și a altor rotoare cu ax vertical care funcționează pe baza aceluiași principiu, poate fi calculată cu relația [1]:

$$A = D \cdot H, \quad (2)$$

unde:

- H este înălțimea rotorului, în m ;
- D este diametrul rotorului, în m .

Coeficientul de putere sau eficiența rotorului, C_p este egal cu raportul dintre energia extrasă din vânt cu ajutorul rotorului și energia disponibilă în vânt, având valori variabile în funcție de viteza periferică, λ care mai este denumită și viteza relativă a vârfului palei rotorului, calculându-se cu ajutorul relației următoare:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v}, \quad (3)$$

unde:

- ω este viteza unghiulară, în rad/s ;
- R este raza rotorului, în m ;
- v este viteza vântului, în m/s .

Prin utilizarea relației (1) se poate determina numai puterea mecanică care poate fi teoretic absorbită din vânt și transmisă la axul rotorului, însă dacă se dorește

2. POWER IN THE WIND

Power, in whatever form it is analyzed, is equal with the product between a force and a distance, also known as the mechanical work, divided by a time interval. The amount of power P , which can be extracted from the wind with a wind rotor, depends on the wind speed and on the swept area of the rotor and can be determined by using the following relation [2]:

$$P = \frac{1}{2} C_p \rho A v^3, \quad (1)$$

where:

- C_p is the power coefficient of the wind rotor;
- ρ is the air density, in kg/m^3 ;
- A is the swept area of the rotor, in m^2 ;
- v is the wind speed, in m/s .

The swept area of a Savonius rotor and, also, the same areas of other wind rotor that are running based on the same principle, can be determined with the aid of the following relation [1]:

$$A = D \cdot H, \quad (2)$$

where:

- H is the height of the rotor, in m ;
- D is the rotor diameter, in m .

The power coefficient or the efficiency of the rotor, C_p is equal to the ratio of the energy extracted from wind by the rotor and the energy available in the wind and it has different values depending on the peripheral speed, λ also known as the rotor tip speed, which can be calculated with the following equation:

$$\lambda = \frac{\omega R}{v}, \quad (3)$$

where:

- ω is the angular speed, in rad/s ;
- R is the radius of the rotor, in m ;

v is the wind speed, in m/s .

By using the equation (1), one can determine only the power that can be theoretically extracted from the wind and transmitted to the rotor shaft, but if one want to determine

determinarea puterii electrice care poate fi livrată de către o turbină eoliană, este necesar să se țină cont de eficiența globală a turbinei, E . Aceasta este influențată de mai mulți parametri, cum ar fi coeficientul de performanță al rotorului, C_p , eficiența generatorului, E_g sau eficiența sistemului de transmisie, E_t . Ținându-se cont de acești parametri, puterea electrică pe care o poate livra o turbină eoliană se poate determina cu ajutorul relației următoare:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 E \quad (4)$$

unde:

$$E = C_p \times E_g \times E_t \quad (5)$$

Valorile coeficientului de performanță, C_p în funcție de viteza periferică, λ a rotorului pentru o turbină cu ax vertical de rotație care funcționează având la bază principiul de frecare aerodinamică sunt redată în figura 2, de unde se poate observa că cele mai ridicate valori ale coeficientului de putere sunt obținute pentru viteze periferice apropiate de unu, adică în cazul în care viteza de deplasare a vârfului palei este aproximativ egală cu viteza curentului de aer la care este supusă [6].

the electrical power that can be delivered by a wind turbine, it is necessary to take into account the overall efficiency of the wind turbine, E . The efficiency is influenced by several parameters such as the power coefficient, C_p , the electrical generator efficiency, E_g or the efficiency of the transmission, E_t . Taking into account these parameters, the electric power that can deliver by a wind turbine can be determined using the following equation:

$$P = \frac{1}{2} \rho A v^3 E \quad (4)$$

where:

$$E = C_p \times E_g \times E_t \quad (5)$$

The values of the power coefficient, C_p of the wind turbine, depending on the peripheral speed of the rotor, λ for a turbine that runs based on the effect of aerodynamic drag are shown in Figure 2 [6].

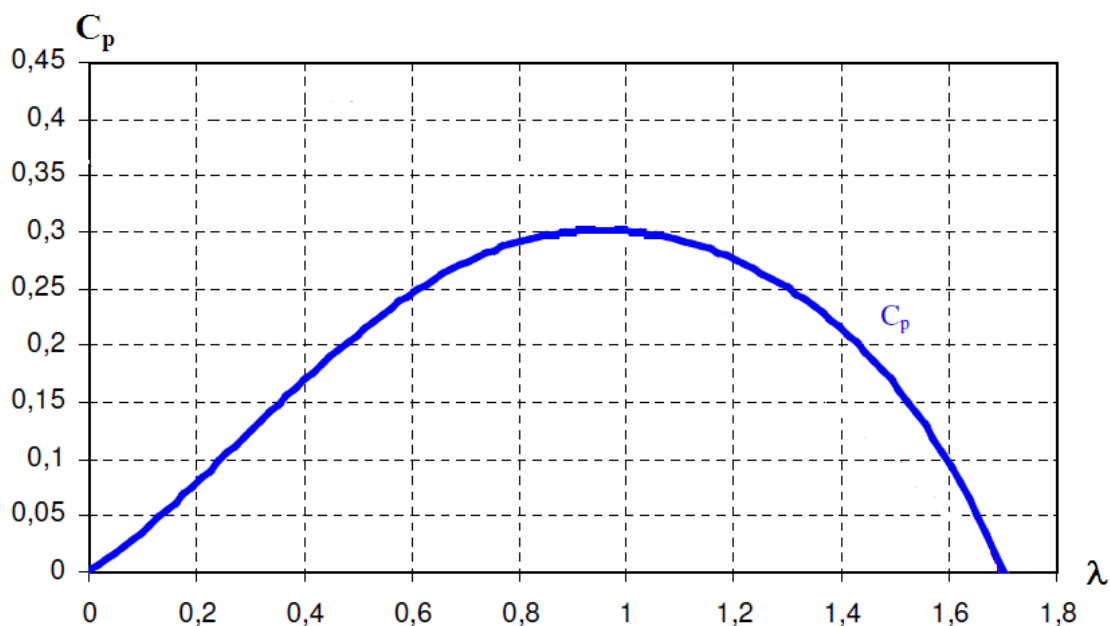


Fig. 2. Variația coeficientului de putere, C_p în funcție de viteza periferică, λ
Fig. 2. The variation of the power coefficient, C_p with the peripheral speed, λ

3. REALIZAREA EXPERIMENTULUI

Studiul experimental s-a desfășurat în cadrul „Laboratorului de Cercetare” al Facultății de Instalații din Cluj-Napoca, care are în dotare un tunel aerodinamic subsonic deschis, cu ajutorul căruia se pot vehicula curenți de aer cu viteze cuprinse între 0 și 13 m/s. Pe lângă aparatura de măsură și control, și anume anemometrul cu elice, tahometrul laser digital și regulatorul de turație al ventilatorului, a fost necesară confecționarea a trei turbine Savonius cu un număr diferit de etaje.

3.1. Turbinele eoliene Savonius

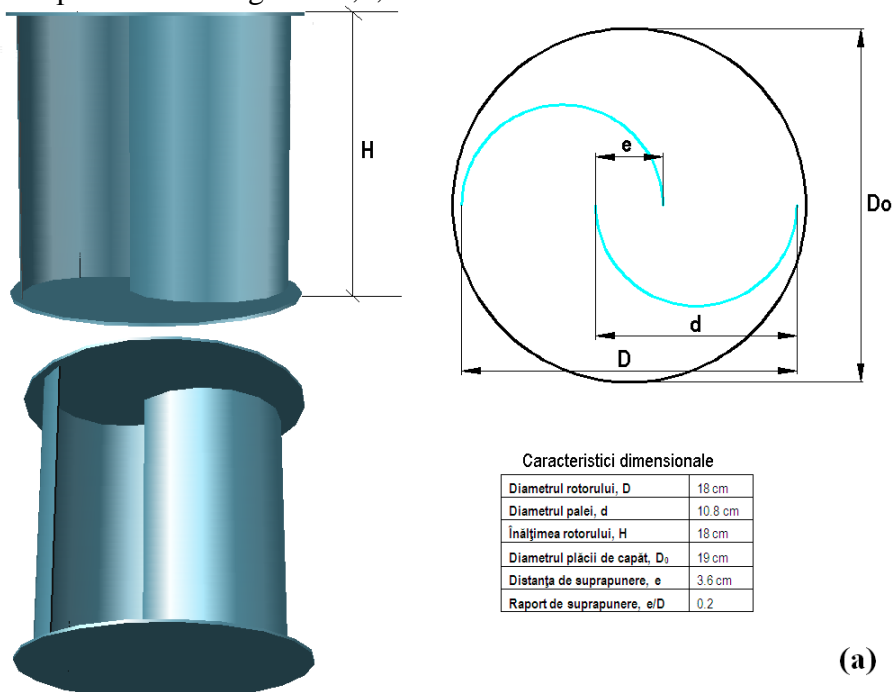
Turbinele Savonius sunt echipate cu rotoare cu două pale semicilindrice realizate din polietilenă (PE) și montate pe un cadru metalic prin intermediul unor rulmenți axiali [7]-[8]. Plăcile de capăt ale rotorului, precum și celelalte elemente auxiliare ale acestuia sunt realizate din comatex. Designul și dimensiunile constructive ale rotoarelor Savonius utilizate la măsurători sunt prezentate în figura 3 a,b,c.

3. EXPERIMENT SET-UP

The experimental study was carried out in the "Research Laboratory" of the Faculty of Building Services from Cluj-Napoca, which is equipped with an open subsonic wind tunnel, through which one can circulate air currents with speeds ranging from 0 to 13 m/s. In addition to the measuring and control devices, such as the propeller anemometer, the digital laser tachometer and the fan speed controller, the manufacturing of three Savonius wind turbines, with different number of rotor's stages was required.

3.1. Savonius wind turbines

The Savonius turbines are equipped with rotors with two semi-cylindrical blades, made from polyethylene (PE) and mounted on a metal frame by means of axial bearings [7]-[8]. The endplates of the rotor and the other auxiliary elements of it are made from comatex. The design and the dimensions of the Savonius wind turbines used in the experiments are presented in Figure 3 a,b,c.



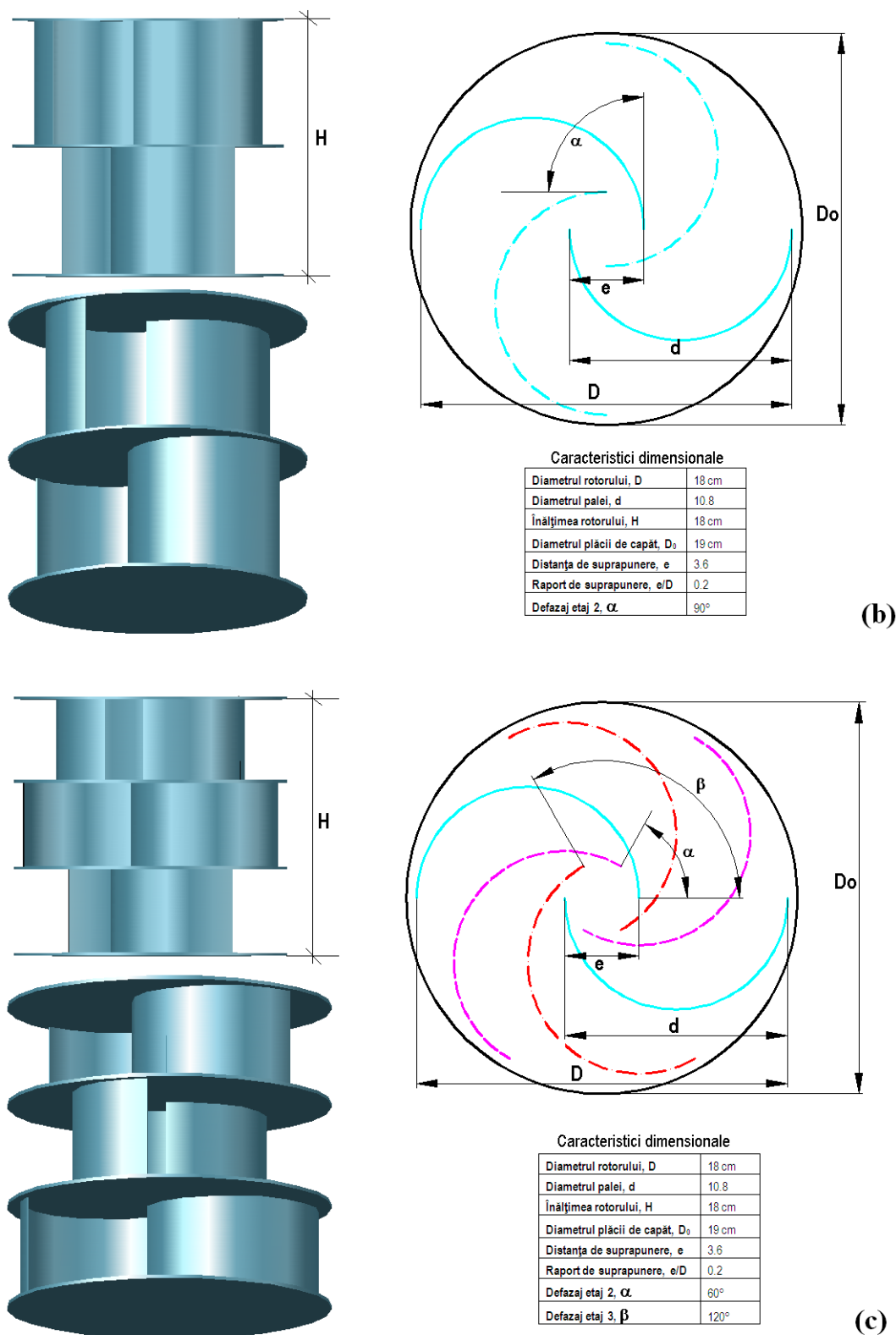


Fig. 3. Designul și dimensiunile constructive ale turbinelor eoliene Savonius
a – rotor Savonius cu un etaj; b – rotor Savonius cu 2 etaje; c – rotor Savonius cu trei etaje.
Fig. 3. The design and the dimensions of the Savonius wind turbines
a – one-stage Savonius rotor; b – two-stages Savonius rotor; three-stages Savonius rotor

3.1 Tunelul aerodinamic

În urma unei analize atente a instalațiilor similare existente în cadrul laboratoarelor din centrele de cercetare importante din Europa și nu numai [3]-[5], s-a optat pentru realizarea unui tunel aerodinamic subsonic deschis, elementele componente și caracteristicile dimensionale ale acestora fiind prezentate în figura 4.

3.1. Aerodynamic wind tunnel

After a careful examination of the similar experimental facilities existing in the laboratories of the major research centers in the world [3]-[5], one have decided on the manufacturing of an open subsonic wind tunnel, whose components and constructive dimensions are presented in figure 4.

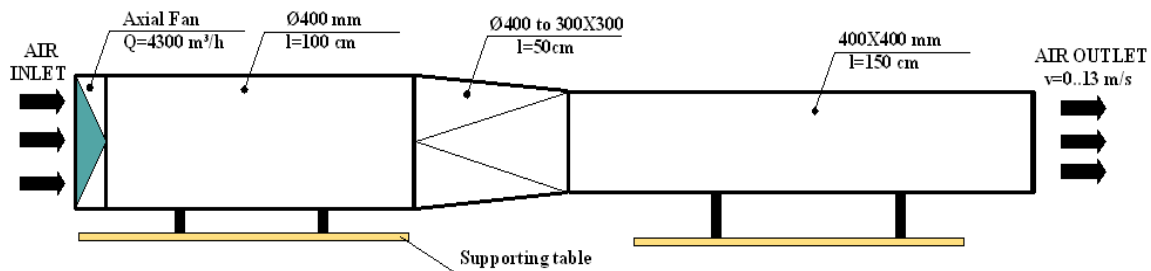


Fig. 4. Tunel aerodinamic subsonic deschis

Fig. 4. Open subsonic wind tunnel

Tunelul este dotat cu un ventilator axial care oferă un debit maxim de 4300 m³/h, prevăzut cu un regulator de turație, putându-se astfel vehicula curenți de aer la viteze variabile, cuprinse între 0 și 13 m/s. În figura 5 este prezentată schema funcțională a standului experimental utilizat.

The wind tunnel is equipped with an axial fan which provides a maximum air flow of 4300 m³/h, fitted with a speed regulator, thereby enabling the circulation of the air masses at variable speeds, between 0 and 13 m/s. Figure 5 presents the functional scheme of the experimental facility used for the measurements.

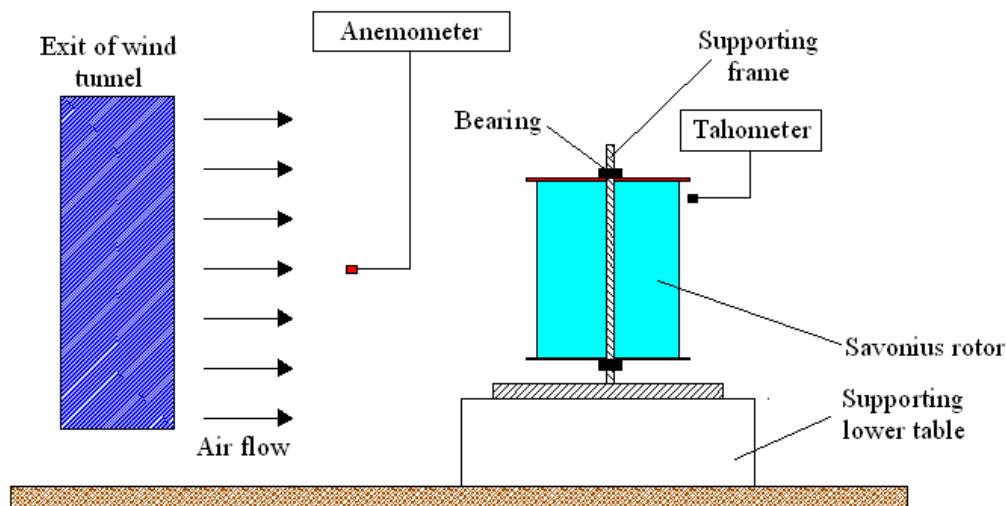


Fig. 5. Schema funcțională a instalației experimentale

Fig. 5. Schematic diagram of experimental set-up

4. REZULTATE ȘI DISCUȚIE

4. RESULTS AND DISCUSSION

Turbinele eoliene cu ax vertical sunt foarte potrivite pentru a fi utilizate la producerea

The vertical axis wind turbines are well suited for use at the production of electricity

de electricitate în zonele cu potențial eolian redus. De aceea, chiar dacă instalația experimentală oferă posibilitatea testării turbinelor la viteze ale vântului de maxim 13 m/s, măsurătorile s-au desfășurat numai pentru intervalul 0-7 m/s. Turbinele eoliene au fost supuse aceluiași condiții de testare, viteza vântului fiind crescută treptat, de la valoarea minimă, până la 7 m/s și s-a înregistrat turația rotoarelor în funcție de viteza vântului la care sunt supuse. Cu datele astfel obținute s-a calculat apoi, cu ajutorul relației (3), viteza periferică, λ a fiecărui rotor. Curba de variație a acesteia, în funcție de viteza vântului, este prezentată, pentru fiecare turbină în parte, în figura 6 a,b,c.

in areas with low wind potential. Therefore, even if the experimental facility enables the testing of the wind turbines at wind speeds up to 13 m/s, the measurements were carried out only for wind speeds between 0 and 7 m/s. The wind turbines have been subject to the same testing condition, the wind speed being gradually increased from its minimum value up to 7m/s, and the rotor speed was recorded according to the wind speed at which they were tested. The data obtained were used to calculate, by using the equation 3, the peripheral speed, λ of each rotor. The variation curve of the peripheral speed, depending on the wind speed, for each turbine, is presented in Figure 6 a,b,c.

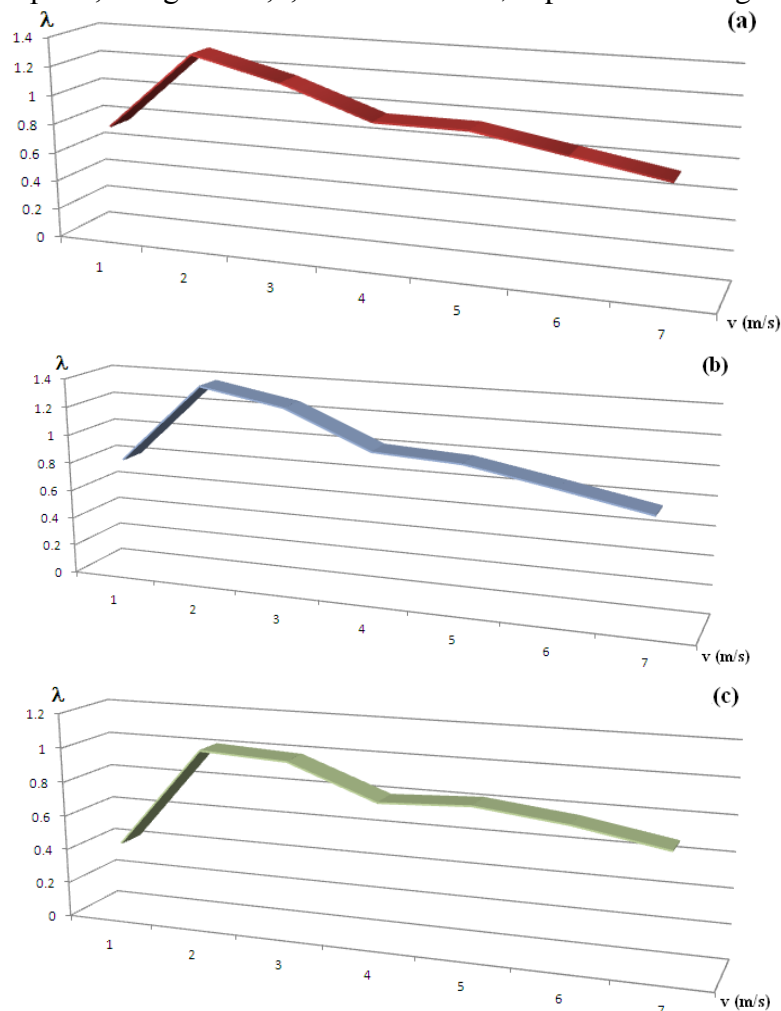


Fig. 6. Curbele de variație λ - v pentru turbinele Savonius
a – cu un etaj al rotorului; b – cu două etaje ale rotorului; c – cu trei etaje ale rotorului

Fig. 6. The λ - v variation curves for the Savonius turbines
a – one stage rotor; two-stages rotor; three-stages rotor

În funcție de valorile astfel calculate ale vitezei periferice, și cu ajutorul graficului din figura 2, se poate determina coeficientul de performanță al fiecărei turbine și se poate calcula puterea electrică pe care o poate genera fiecare turbină. În figura 7 este prezentată o comparație între puterea disponibilă în vânt și puterea electrică generată de fiecare turbină, în funcție de viteza vântului.

Depending on the values of the peripheral speed calculated before, and with the aid of the graph presented in Figure 2, one can determine the power coefficient of each wind turbine and the electrical power generated by the wind turbines can be calculated. Figure 7 shows a comparison between the available wind power and the electrical power generated by each turbine, depending on the wind speed.

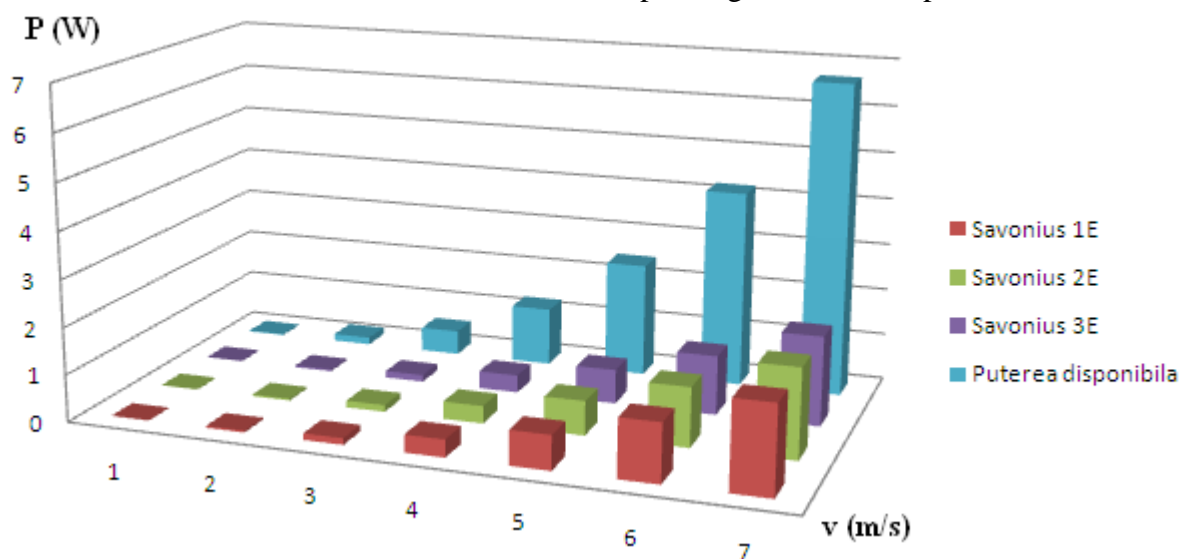


Fig.7. Puterea extrasă din vânt de către rotoarele Savonius vs. Puterea disponibilă în vânt
Fig. 7. The power extracted from wind by the rotors vs. The available power in the wind

Puterea maximă pe care o generează cele trei rotoare în cazul unei viteze a curentului de aer de 7 m/s este de 1.86 W pentru rotorul Savonius simplu, 1.91W pentru rotorul Savonius dublu, respectiv 1.73 W pentru rotorul Savonius cu trei etaje, în timp ce valorile medii ale puterii generate pe intervalul 0-7 m/s este de 0.61, 0.65, respectiv 0.58 W. Rotorul Savonius cu două etaje are cea mai bună eficiență, și produce cu 5 până la 15% mai multă energie decât rotorul cu un singur etaj, fiind cel mai potrivit pentru utilizarea la generarea de energie electrică cu ajutorul vântului. Totuși realizarea acestui rotor pune mai multe probleme de ordin constructiv decât în cazul rotorului cu un singur etaj, de aceea alegerea acestui tip de rotor în detrimentul celuilalt

The maximum power generated by the three rotors at a wind speed of 7 m/s is 1.86 W in the case of the single-stage Savonius rotor, 1.91 W for the double-stage Savonius rotor, respectively 1.73 W in the case of the Savonius rotor with three stages, while the mean power generated by the rotors on the wind speed interval 0-7 m/s is 0.61, 0.65, respectively 0.58 W. The Savonius wind turbine with a double-stage rotor has the best efficiency, and produces with 5 to 15% more energy than the single-stage rotor, being the most suitable for use in power generation from wind. However, the manufacturing of this rotors creates more constructive problems than the construction of the single stage rotor, so when one want to choose this type of rotor over the single-

trebuie să țină cont de câștigurile energetice pe care le aduce această soluție în comparație cu investiția suplimentară necesară pentru realizarea acestui rotor. Turbina Savonius cu trei etaje produce cea mai mică cantitate de energie și este recomandat a fi folosită numai în cazul unor aplicații pentru care este foarte importantă caracteristică cuplului, fiind bine știut că aceste turbine oferă un cuplu foarte constant.

5. CONCLUZII

În contextul actual al accentuării crizei energetice, resimțită puternic prin continua creștere a prețului combustibililor fosili, cauzată, pe de-o parte de reducerea rezervelor existente, iar pe de altă parte de problemele politice existente în zonele unde sunt concentrate aceste resurse, producerea de electricitate din surse de energie regenerabilă, mai ales din energie eoliană devine foarte importantă. În această situație exploatarea vântului în zone cu potențial eolian redus va avea un efect pozitiv asupra balanței energetice mondiale. Totuși, pentru o exploatare cât mai eficientă a energiei eoliene în aceste zone, eficiența turbinelor eoliene cu ax vertical trebuie îmbunătățită. Principalele observații care se pot face în urma efectuării studiului experimental privind efectul pe care îl are numărul de etaje asupra eficienței turbinelor Savonius sunt următoarele:

- pentru atingerea unor eficiențe cât mai ridicate este recomandată utilizarea turbinelor Savonius cu două pale semicilindrice și două etaje;
- înlocuirea rotoarelor Savonius cu un etaj, cu rotoare de același tip dar cu două etaje, trebuie făcută numai după o analiză prealabilă cost-beneficiu;
- rotorul Savonius cu trei etaje oferă cel mai constant cuplu, însă are eficiența cea mai redusă;
- numărul optim de etaje ale rotorului este valabil în cazul tuturor tipurilor de turbine cu ax vertical, cu rotoare cu două sau trei pale, care funcționează pe

stage rotor, one must take into account the energy gains brought by this solution compared with the additional investments required for the construction of this rotor. The three-stage Savonius wind turbine produces the smallest amount of energy and is recommended to be used only for certain applications where the torque characteristic is very important, being known that this type of turbines provides a very constant torque.

5. CONCLUSIONS

In the current context of the deepening of the energy crisis, felt strongly by the continuous growth of the fossil fuels prices, caused, on one hand by the reduction of the existing resources, and on the other hand by the political problems that exist in the areas where these resources are concentrated, the production of electricity by using renewable energy sources, especially wind energy, is very important. In this situation, the wind exploitation in areas with low wind potential will have a positive effect on the global energy balance. However, for a more efficient exploitation of wind energy in these areas, the vertical axis wind turbines efficiency must be improved. The main observations that can be made after performing this experimental study on the effect of the number of stages on the efficiency of the Savonius turbines are the following ones:

- in order to achieve the best possible efficiencies, the use of Savonius rotors with semi-cylindrical blades and two stages is recommended;
- the replacement of one-stage Savonius rotors, with identical rotors but with two stages, should be done only after a preliminary cost-benefit analysis;
- three-stages Savonius rotors have the most constant torque, but they have the lowest efficiency;
- the optimal number of stages is the same for all vertical axis wind turbines, with two- or three-bladed rotors, which operate on the effect of aerodynamic

baza efectului de frecare aerodinamică. drag.

Notă. Această lucrare a beneficiat de suport financiar prin proiectul „Studii doctorale în științe inginerești în scopul dezvoltării societății bazate pe cunoaștere – SIDOC”, contract: POSDRU/88/1.5/S/60078, proiect cofinanțat din Fondul Social European prin Programul Operațional Sectorial Dezvoltarea Resurselor Umane 2007 – 2013.

BIBLIOGRAFIE

- [1]. Al-Bahadly I. – *Construirea unei turbine pentru un imobil rezidențial*, Energie pentru Dezvoltare Durabilă 13, 2009, pg. 159-165.
- [2]. Badea Gh., Rus L., Rusu D., Safirescu C. – *Consideratii privind evaluarea potentialului eolian in vederea stabilirii oportunitatii amplasarii unui parc eolian*, Conferința tehnico-științifică cu participare internațională "Instalații pentru construcții și economia de energie", Iași, 8-9 iulie 2010, pg.153-162.
- [3]. Deda Altan B., Atilgan M. – *Studiu experimental și numeric asupra creșterii performanței rotorului eolian Savonius*, Management-ul și Conversia Energiei, 2008, pg. 3425-3432.
- [4]. Hau E. – *Turbine eoliene*, Springer, New York, 2006, pg. 81-89.
- [5]. Hayashi T., Li Y., Hara Y., Suzuki K. – *Teste în tunelul aerodinamic pe turbine Savonius cu trei etaje*, Universitatea din Tottori, Tottori, 2011.
- [6]. Menet J.L., Bourabaa N. – *Creșterea eficienței rotoarelor eficienței printr-o cercetare parametrică*, Universitatea din Valenciennes - Le Mont Houy, Valenciennes, France, 2011.
- [7]. Mussell D. – *Construiește-și propria turbină eoliană*, Institutul Pembina – Soluții pentru Energii Regenerabile, Ontario, 2006.
- [8]. Savonius S.J. – *Rotorul “S” și aplicațiile sale*, Inginerie Mecanică 53, 1931, pg. 333-338.

Acknowledgement. This paper was supported by the project „Doctoral studies in engineering sciences for developing the knowledge based society – SIDOC” contract no. POSDRU/88/1.5/60078, project co-funded from European Society Fund through Sectorial Operational Program Human Resources 2007 – 2013.

REFERENCES

- [1]. Al-Bahadly I. – *Building a wind turbine for a rural home*, Energy for Sustainable Development 13, 2009, pg. 159-165.
- [2]. Badea Gh., Rus L., Rusu D., Safirescu C. – *Considerations regarding the evaluation of the wind potential for the purpose of determining the opportunity of a wind farm location*, Technical-Scientific conference with an international participation “Building Services and Energy Saving”, Iași, 8-9 iulie 2010, pg.153-162.
- [3]. Deda Altan B., Atilgan M. – *An experimental and numerical study on the improvement of the performance of Savonius wind rotor*, Energy Conversion and Management, 2008, pg. 3425-3432.
- [4]. Hau E. – *Wind Turbines*, Springer, New York, 2006, pg. 81-89.
- [5]. Hayashi T., Li Y., Hara Y., Suzuki K. – *Wind tunnel tests on a three-stage out-phase Savonius rotor*, Tottori University, Tottori, 2011.
- [6]. Menet J.L., Bourabaa N. – *Increase in the Savonius rotors efficiency via a parametric investigation*, Université de Valenciennes - Le Mont Houy, Valenciennes, France, 2011.
- [7]. Mussell D. – *Build your own wind turbine*, The Pembina Institute – Sustainable Energy Solutions, Ontario, 2006.
- [8]. Savonius S.J. – *The S-rotor and its applications*, Mechanical Engineering 53, 1931, pg. 333-338