

**STUDIU EXPERIMENTAL ASUPRA
TURBINELOR EOLIENE CU AX
VERTICAL ECHIPATE CU ROTOARE
CU UN SINGUR ETAJ**

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

**EXPERIMENTAL STUDY
REGARDING THE VERTICAL AXIS
WIND TURBINES WITH SINGLE-
STAGE ROTORS**

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

REZUMAT

Turbinele eoliene cu ax vertical, care funcționează utilizând numai principiul de frecare aerodinamică au coeficienți de performanță mult mai reduși decât cei aferenți turbinelor cu ax orizontal, cu rotor de tip elice. Totuși, acestea au și avantaje importante care recomandă utilizarea lor, în detrimentul turbinelor cu ax orizontal, mai ales în zone cu potențial eolian redus, și anume: produc energie în condiții de vânt redus sau cu caracter turbulent, oferă cuplu mare la pornire și nu necesită mecanisme de orientare. Pentru o exploatare cât mai fructuoasă a acestor avantaje este importantă găsirea unor soluții pentru îmbunătățirea eficienței acestui tip de turbine. Lucrarea prezintă un studiu experimental cu privire la determinarea designului optim al rotoarelor cu ax vertical, în vederea creșterii coeficientului de performanță al acestora.

CUVINTE CHEIE: energie eoliană, rotor, viteză periferică, pale, energie.

1. ENERGIA EOLIANĂ ÎN ROMÂNIA

În condițiile actuale ale accentuării crizei energetice, care va duce inevitabil la epuizarea, într-un viitor destul de apropiat, a principalelor resurse de combustibili clasici, capturarea și conversia energiei eoliene în energie electrică reprezintă una din cele mai bune alternative. În condițiile în care exploatarea energiei eoliene a devenit un domeniu foarte important al industriei producătoare de electricitate, Centrul de Cercetare Danez de la Riso a dezvoltat, în ultimii ani, cu sprijinul Comisiei Europene, Atlasul Eolian European, din dorința de a oferi un suport teoretic de bază investitorilor din domeniul energiei eoliene.

ABSTRACT

Vertical axis wind turbines which operate using only the effect of aerodynamic drag, have significantly reduced power coefficients than those associated with horizontal axis wind turbines, with propeller-type rotor. However, they have several important advantages that recommend their use at the expense of horizontal axis wind turbines, such as: energy production in areas with low wind potential or with turbulent wind, they provide a high starting torque and do not require yaw mechanisms. For a successful exploitation of these advantages is important to find effective solution to improve the efficiency of this type of turbines. The paper presents an experimental study regarding the determination of the optimum design of the vertical axis wind rotors, in order to increase their power coefficients.

KEYWORDS: wind energy, rotor, tip speed ratio, blades, energy.

1. WIND ENERGY IN ROMANIA

In today's deepening energy crisis, which will inevitably lead in the near future to the depletion of the main resources of classical fuels, capturing and converting wind energy into electricity is one of the best alternatives. Since wind energy exploitation is becoming a very important domain for the production of electricity, the Danish Research Centre of Riso has developed, in recent years, with the aid of the European Commission, the European Wind Atlas, in order to provide basic theoretical information for investors in wind energy. In accomplishing this wind atlas, the assessment data from more than 200 stations that measure wind parameters

Pentru realizarea acestui atlas s-au evaluat datele înregistrate de peste 200 de stații meteo care au monitorizat condițiile eoliene din anumite zone și au fost dezvoltate metode matematice speciale cu ajutorul cărora se pot determina condițiile eoliene ale unei zone particulare. Din datele obținute la nivel regional au fost îndepărtate particularitățile locale (obstacole eoliene cum sunt clădirile, vegetație, orografia), iar datele obținute reprezintă condițiile vântului dominant pentru zona în discuție [2].

Deși România nu a fost inclusă în proiectul european caracterizat prin dezvoltarea acestui atlas și beneficia numai de o hartă veche și dificil de utilizat pentru evaluarea potențialului eolian, odată cu dezvoltarea acestui domeniu economic, Ministerul Mediului și Agenția Națională de Meteorologie au realizat, în 2007, pentru a atinge țintele energetice impuse de Uniunea Europeană, harta națională a potențialului eolian (v.fig.1), o versiune mult îmbunătățită a variantei deja existente. Cu ocazia lansării acesteia, ministrul Mediului de la acea vreme a declarat în România se pot instala turbine cu o capacitate totală de 14000 MW, ceea ce ar însemna un aport de 23000 GWh/an în balanța energetică națională.

was used, and special mathematical methods by which one can determine the wind condition of a particular area were developed. From the regional data, the local wind particularities (wind obstacles such as buildings, vegetation, etc., surface roughness and orography) are removed and the obtained data shows prevailing wind condition for the area in discussion [2].

Although Romania was not included in the European project which resulted in the development of the European Wind Atlas and had only an old map for estimating the wind potential, that was difficult to use, with the development of this economic domain, the Ministry of Environment and National Agency of Meteorology has released in 2007, an enhanced version of the previous map, the country map that actually indicates the wind potential (Fig. 1) in order to achieve the energy targets set by the EU. Atilla Korodi, Environment Minister at that time, said that Romania can install wind turbines with a total power of 14,000 MW, meaning an electricity contribution of about 23,000 GWh/year, to the country's energy balance.

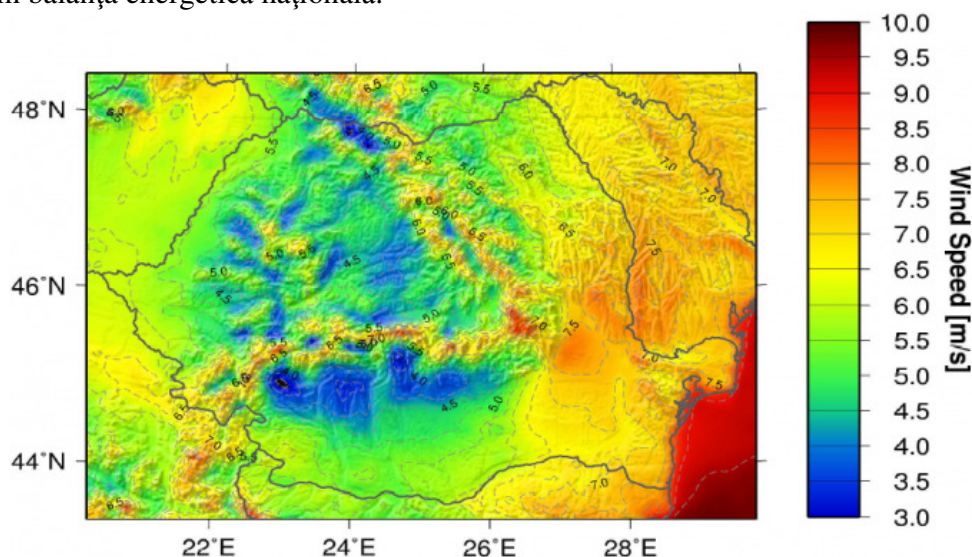


Fig. 1. Harta eoliană a României, 2007 [Ministerul Mediului]
 Fig. 1. Romania wind energy map, 2007 [Environment Minister]

Printr-o analiză simplă a acestei hărți, se poate observa cu ușurință că zonele potrivite pentru instalarea unor parcuri eoliene, adică zonele în care viteza vântului depășește 5 m/s, sunt zonele montane și cele de coastă, Dobrogea și Podișul Central Moldovenesc. Cu toate acestea nu toate aceste zone se pretează instalării unor astfel de sisteme. Zonele montane de exemplu sunt greu accesibile, iar transportul echipamentelor și materialelor necesare pentru ridicarea turnurilor turbinelor este foarte dificil, uneori chiar imposibil, și implică costuri uriașe, care nu pot fi amortizate într-o perioadă rezonabilă. De asemenea construcția rețelelor de transport a energiei electrice este dificilă și costisitoare, lucru care face ca aceste zone să fie neatractive pentru investitori. În concluzie, se poate spune că, în România, zonele potrivite pentru instalarea unor parcuri eoliene sunt relativ mici în comparație cu suprafața țării, lucru care face ca, la prima vedere, țara noastră să nu fie o zonă unde energia eoliană să poată avea o dezvoltare considerabilă. În realitate lucrurile sunt puțin diferite, pentru că toate aceste estimări și scenarii realizate până acum au fost realizate din perspectiva turbinelor eoliene cu ax orizontal, cu rotor de tip elice, care necesită viteze ridicate ale vântului, atât pentru a intra în funcțiune, cât și pentru a produce energie. În România cele mai multe zone beneficiază de viteze medii anuale al vântului de 2-4 m/s, valori care le fac total neatractive pentru instalarea unor parcuri eoliene, pentru că turbinele astfel instalate nu vor funcționa, sau vor funcționa la parametri reduși în asemenea condiții. În Tabelul 1 sunt prezentate vitezele caracteristice pentru diferite tipuri de turbine utilizate la producerea de electricitate, din ambele grupe de turbine.

Although in the case of Romania wind maps currently available are not very detailed, through an in-depth analysis of the existing one, one can easily see that the areas which are suitable for installing wind farms, i.e. areas where annual average wind speed exceeds 5 m/s, are the mountain areas and the costal ones, Dobrogea and the Central Moldavian Plateau. However, not all these areas are suitable for the construction of wind turbines or wind power plants. Mountain areas, for example, are hard to reach and the materials and equipment transportation required for the erection of wind farms presents difficulties. In some cases, this is actually impossible, requiring huge investments, hardly recoverable in a reasonable period of time. Also, construction of electricity transmission networks for electricity produced in these areas is difficult and expensive, which makes these areas unattractive to investors. In conclusion, we can say that in Romania, areas which are suitable for installing wind farms are very limited compared with the entire area of the country, which at first glance would make us believe that our country is not an area where wind power can show considerable development. In reality, the situation is a little different, because all these tests and scenarios drafted until now, concerning wind energy, are made only from the perspective of horizontal axis wind turbines, HAWT's with propeller-type rotor, which require high wind speeds, both to enter into service, and to produce electricity at full capacity. In Romania, most areas have annual average wind speeds between 2 and 4 m/s, values that make them unattractive for the installation of horizontal axis wind turbines, since the turbines will not work or will work with reduced parameters in these wind conditions. The characteristic speeds of the different operating modes for different types of wind turbines are summarized In Table 1, both in

Se poate observa cu ușurință că turbinele cu ax orizontal au atât viteze nominală de funcționare, cât și viteza de intrare în funcțiune, mai mari decât vitezele medii anuale ale vântului în cazul majorității teritoriilor din țara noastră. Astfel, date fiind condițiile eoliene din România, turbinele eoliene cu ax vertical de rotație, în special rotorul Savonius și diferite variante ale acestuia sunt foarte potrivite pentru generarea de electricitate, dacă luăm în considerare parametri de funcționare a acestora și regimul eolian din țara noastră [3].

the category of horizontal axis wind turbines and in the vertical axis wind turbines category. One can easily see that horizontal axis wind turbines have both rotational speeds of operation at rated capacity and the starting-speeds much higher than the corresponding average wind speed of most areas from our country. Thus, given the existing wind conditions in Romania, vertical axis wind turbines, VAWTs especially the Savonius rotor and the different variants of this rotor would be very suitable for electricity generation, taking into account their operating parameters and wind conditions existing in most parts of the country [3].

<i>Axis orientation</i>	<i>Turbine type</i>	<i>Model</i>	<i>Cut-in speed</i>	<i>Rated speed</i>	<i>Cut-out speed</i>	<i>C_p</i>
			(m/s)	(m/s)	(m/s)	
HAWT	Propeller-type	SE 500W	2	8	35	0.4-0.5
		SE 1000W	2	9	35	
		Cyclon 2000 W	3.5	10	39	
		Cyclon 3000 W	3.5	10	39	
		Enercon E44 0.9 MW	3	17	28-34	
		Enercon E126 7.5 MW	3	17	28-34	
VAWT	Savonius	(-)	1-2	3-6	(-)	0.15-0.3
	Darrieus	(-)	3.5	7-10	20	0.25-0.35
	Helix	S322 - 2 kW	2	5-7	(-)	0.15-0.3
		S594 - 4.5 kW	2	5-7	(-)	0.15-0.3

Tab. 1. Clasificarea turbinelor eoliene în funcție de vitezele vântului la care funcționează [3]

Tab. 1. Classification of wind turbines based on the wind speed at which they operate [3]

Principala problemă a turbinelor eoliene cu ax vertical care funcționează pe baza frecării aerodinamice este faptul că acestea nu sunt produse în serie și, în prezent, există numai instalații artizanale care folosesc aceste tipuri de rotoare pentru a produce electricitate, de aceea este foarte importantă realizarea unor studii experimentale care să arate care dintre rotoare, și cu ce parametri constructivi are cel mai ridicat randament și este cel mai indicat pentru producerea de

The main problem of vertical axis wind turbines, which are operating on the principle of aerodynamic drag, is that they are not produced in series and currently there are only crafted installations that use these types of rotors to produce electricity. Therefore, it is very important to begin or deepen the experimental studies that must show which of the rotors, and with what constructive parameters, have the highest energy yield and are most suitable for the

energie electrică. Un prim pas în vederea realizării acestui obiectiv este stabilirea designului optim al rotoarelor cu ax vertical care funcționează pe baza frecării aerodinamice.

2. INSTALAȚIA EXPERIMENTALĂ

Cercetările experimentale au avut loc în Laboratorul de Cercetare al Facultății de Instalații a Universității Tehnice din Cluj-Napoca. Pentru realizarea acestor studii experimentale a fost necesară construirea unui tunel aerodinamic subsonic deschis, prin intermediul căruia se pot asigura viteze ale curentului de aer de 0-13 m/s și confecționarea a opt turbine eoliene cu ax vertical de rotație, cu diferite configurații ale rotoarelor.

2.1. Turbinele eoliene

Toate rotoarele utilizate în experimente au aceleași dimensiuni constructive, și anume diametrul rotorului $D=18$ cm și înălțimea rotorului $H=18$ cm, tocmai pentru ca aria „scăldată” a rotoarelor să fie aceeași și acestea să poată beneficia de aceeași cantitate de energie eoliană. Rotoarele eoliene au fost confecționate din materiale plastice și au fost montate pe cadre metalice prin intermediul unor rulmenți axiali [4].

Din cele opt rotoare folosite, patru au fost rotoare Savonius, în diferite configurații, iar celelalte rotoare au fost de alt tip, ele fiind însă dezvoltate pe același principiu cu rotorul Savonius – principiu frecării aerodinamice. În ceea ce privește rotoarele Savonius [5]-[6], diferitele configurații au fost alese în așa fel încât să se poată stabili raportul optim de suprapunere a palelor, e/D , e fiind distanța de suprapunere a palelor rotorului, optându-se pentru turbine cu raportul de suprapunere de 0.15, 0.2, 0.25 și 0.3, ilustrate în figura 2.

Celelalte tipuri de turbine utilizate în cadrul experimentelor au fost realizate în așa fel încât să poată oferi o soluție mai simplă din

production of electricity. The first step towards achieving this goal is to establish the optimum design of the vertical axis rotors which operate using the aerodynamic drag effect.

2. EXPERIMENTAL STAND

Experimental studies were held in the Research Laboratory of the Faculty of Building Services of the Technical University of Cluj-Napoca. For the proper conduct of experiments it was necessary to build an open subsonic wind tunnel, which can generate speeds of the air masses of 0 to 13 m/s and to manufacture twelve types and configurations of vertical axis wind turbines.

2.1 Wind turbines

All the rotors used in the experiments have the same constructive sizes, i.e. the diameter of the rotor, $D=18$ cm and height of the rotor, $H=18$ cm, so that the swept area of the rotors would be the same and all the wind rotors could benefit from the same amount of wind energy. The vertical axis wind turbines used in the experiments have the rotor blades made from plastic materials and they are placed on a metal frame by means of bearings [4].

From the eight wind rotors used, four were Savonius wind rotors with different configurations, and the other rotors were developed on the same principle with the Savonius rotors – the principle of aerodynamic drag. In terms of Savonius rotors [5]-[6] different configurations were chosen so that one can determine the optimal overlap ratio of the rotor blades, e/D , where e is the overlap distance of the rotor blades, using turbines with the overlap ratio of the blades of 0.15, 0.2, 0.25 and 0.3, which are shown in figure 2.

The other models of turbines used for this experimental study were designed so that they can provide a simple constructive solution for the replacement of the Savonius

punct de vedere constructiv la turbinele Savonius, ale căror pale semicilindrice sau semieliptice sunt mai dificil de realizat practic, forma constructivă a acestora fiind prezentată în figura 3.

wind turbines, whose semi-cylindrical or semi-elliptical blades are more difficult to built in practice, the constructive form of which is shown in Figure 3.

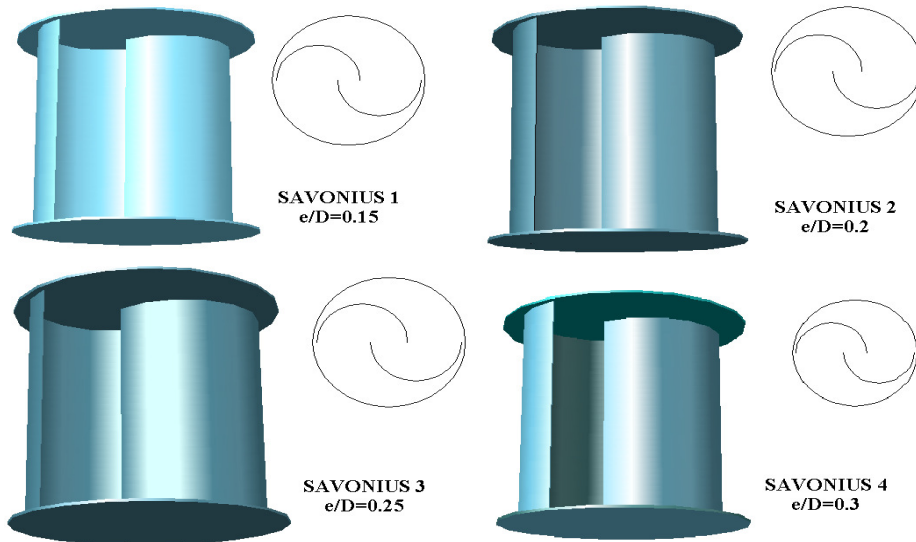


Fig. 2. Rotoare Savonius cu diferite rapoarte de suprapunere a palelor
Fig. 2. Savonius wind rotors with different overlap ratio of the blades

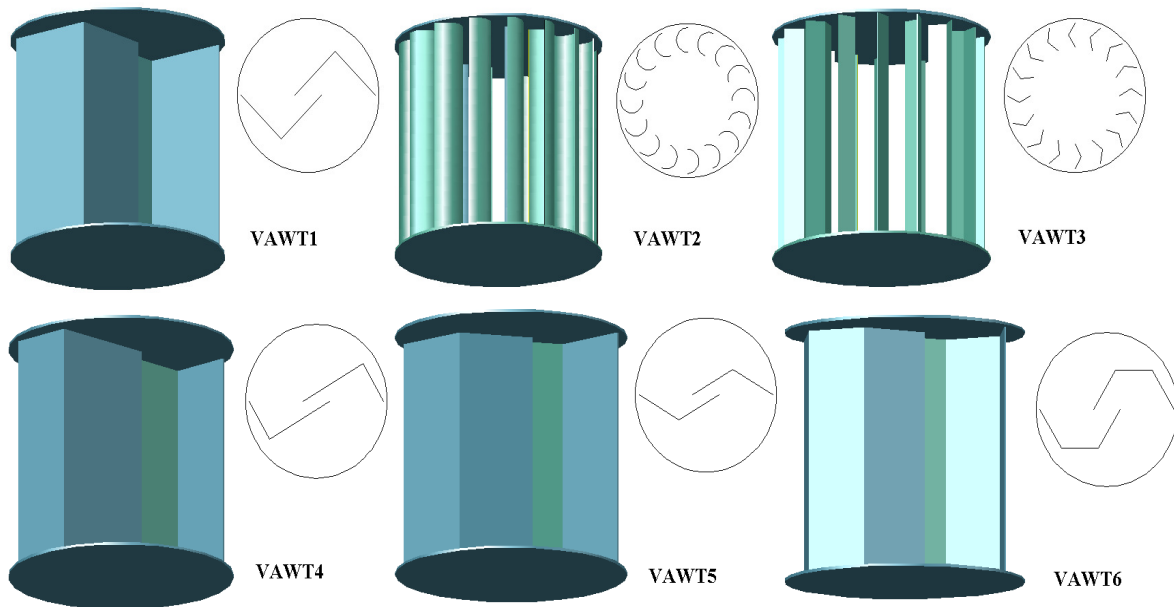


Fig. 3. Turbine eoliene cu ax vertical
Fig. 3. Vertical axis wind turbines

2.2. Tunelul aerodinamic

Curentul de aer uniform a fost asigurat cu ajutorul tunelului aerodinamic deschis [7], prezentat în figura 4, care are o secțiune de ieșire pătrată cu dimensiunile de 300x300 mm. Debitul de aer este furnizat de un ventilator axial care are un debit nominal de 4300 m³/h.

2.2. Aerodynamic wind tunnel

Uniform main flow is produced by an open-circuit subsonic wind tunnel [7], presented in Figure 4, which has a square exit section with dimensions of 300x300 mm. Airflow is provided with an axial fan that can deliver a maximum flow of 4300 m³/h.

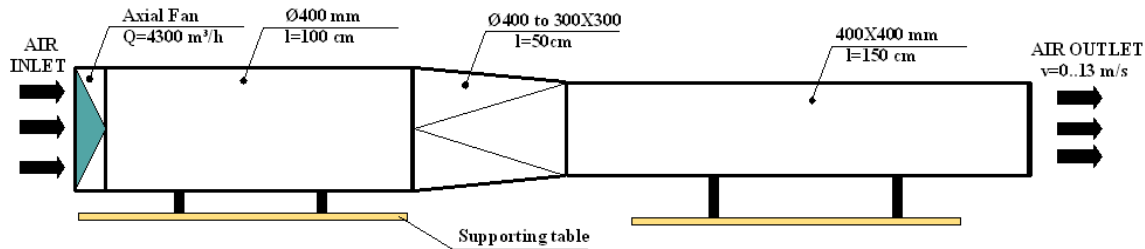


Fig. 4. Tunel aerodinamic subsonic deschis
Fig. 4. Open-circuit subsonic wind tunnel

3. ANALIZA ȘI INTERPRETAREA REZULTATELOR

Cele opt rotoare utilizate în cadrul experimentului au fost supuse pe rând aceluiași condiții de testare, viteza curentului de aer, v fiind variată între 0 și 7 m/s cu ajutorul unui regulator de turație montat pe ventilatorul tunelului aerodinamic. Pentru fiecare rotor a fost înregistrată dependența turației în funcție de viteza vântului, aceste date utilizându-se ulterior pentru trasarea curbelor caracteristice care prezintă variația vitezei periferice, λ , în funcție de viteza vântului, după aceeași metodă ca și cea utilizată în [1], curbe care sunt prezentate în figura 5. Cu ajutorul valorilor vitezei periferice a rotorului se poate determina, similar ca și în [1], coeficientul de performanță, C_p al fiecărei turbine în parte. În funcție de acest coeficient se poate calcula, în cele din urmă, puterea mecanică, P la axul rotorului, utilizându-se următoarea relație:

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

unde ρ este densitatea aerului, iar A este aria scâldată a rotorului.

3. THE RESULTS ANALYSIS AND INTERPRETATION

The eight rotors used in the experiment were all subjected to the same test conditions, the air flow speed, v , being varied from 0 to 7 m/s with the aid of a speed regulator mounted on the fan of the aerodynamic wind tunnel. For each rotor, the correlation between the rotational speed and the wind speed was registered and these data were used later to plot the characteristic curves that show the dependence between the rotor tip speed ratio, λ and the air flow speed, by using the same method that was used in [1], curves which are shown in figure 5. By using the data regarding the rotor tip speed ratio, one can determine, similarly as in [1], the power coefficient, C_p of each wind turbine. Depending on this coefficient, the mechanical power, P at the rotor shaft can be, finally, calculated, using the following equation:

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

where ρ is the air density and A is the rotor swept area.

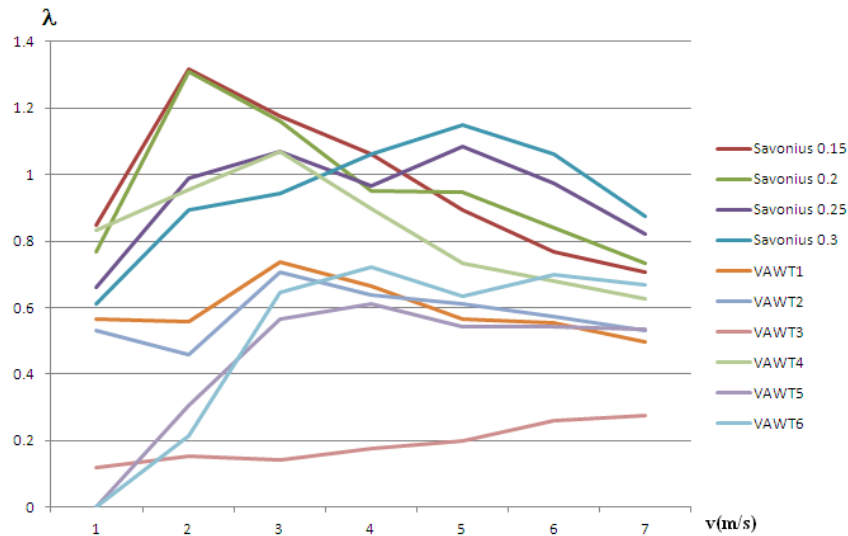


Fig. 5. Curbele caracteristice λ - v ale rotoarelor utilizate
Fig. 5. The λ - v characteristic curves for the used rotors

Turbinele cu ax vertical au cea mai bună eficiență de conversie a energiei eoliene în energie utilă, în cazul în care viteza periferică a rotorului are valori apropiate de 1, deci dacă vârful palei se mișcă cu o viteză egală cu viteza curentului de aer. Acest lucru se poate observa cu ușurință și în figura 6, unde este prezentată o comparație între puterea mecanică oferită de fiecare rotor și puterea disponibilă în vânt.

Vertical axis wind turbines have the best efficiency in terms of converting the wind energy into useful energy if the rotor tip speed ratio has values close to 1, which means that the tip of the blade is moving with the same speed as one of the air flow. This can easily be seen in figure 6, where a comparison between the mechanical power provided by each rotor and the available wind power is presented.

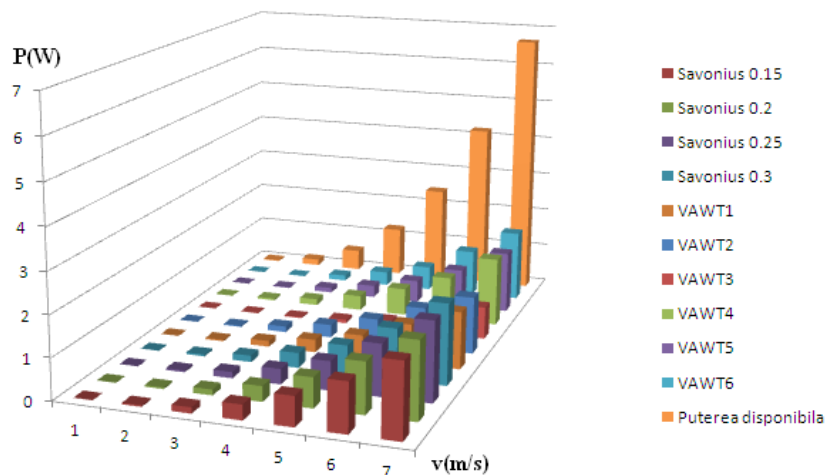


Fig. 6. Puterea extrasă din vânt de către rotoare vs. Puterea disponibilă în vânt
Fig. 6. The power extracted from wind by the rotors vs. The available power in the wind

În urma analizării rezultatelor obținute prin măsurători s-a observat că rotorul Savonius cu un raport de suprapunere a palelor $e/D=0.3$ generează cea mai ridicată putere mecanică la axul rotorului, de aproximativ 1.96 W pentru o viteză a curentului de aer de 7 m/s, o valoare cu 15 până la 20% mai mare decât în cazul celorlalte rotoare cu ax vertical, fiind astfel cel mai potrivit pentru a fi utilizat la generarea de electricitate. Rotorul Savonius cu raport de suprapunere a palelor de 0.25 și rotorul VAWT4, cu pale dispuse sub formă de „Z”, au și ele randamente destul de bune, generând o putere mecanică medie, pe intervalul de viteze ale curentului de aer 0-7 m/s, de 0.62 W, respectiv 0.57 W, în timp pentru rotorul Savonius 0.3, media este de 0.64 W. Ținând cont de aceste valori și aducând în discuție caracteristicile constructive ale acestor rotoare, se poate spune că rotorul VAWT4 poate fi o variantă foarte bună pentru înlocuirea rotoarelor Savonius cu pale semicilindrice. Rotoarele VAWT1 și VAWT5 întâmpină mari probleme la pornire și generează cantități reduse de energie fiind total nerecomandate pentru utilizarea în aplicații de conversie a energiei eoliene, iar rotoarele VAWT2 și VAWT3, chiar dacă nu produc cantități însemnate de energie, oferă un cuplu foarte constant, fiind recomandate pentru aplicații în care caracteristicile cuplului sunt foarte importante, de exemplu în instalațiile de pompare a apei.

Pe lângă aceste aspecte, un lucru foarte important care trebuie cunoscut legat de funcționarea turbinelor cu ax vertical, tocmai pentru a putea fi exploatate la potențial maxim, dar și pentru o alegere cât mai potrivită a generatorului electric care trebuie să le echipeze, este ecuația de variație a puterii mecanice în funcție de viteza vântului. Pentru determinarea acestor ecuații s-au utilizat datele experimentale obținute care au fost apoi

After analyzing the results obtained from the measurements it has been observed that Savonius rotor with an overlap of the blades, $e/D=0.3$ generates the highest mechanical power at the rotor shaft, of about 1.96 W for a wind speed of 7 m/s, a value with 10 to 20% higher than the corresponding values in the case of the other types of vertical axis rotor, thus being the most suitable for use at electricity generation. The Savonius rotor with an overlap ratio of the blades of 0.25 and the VAWT4 type rotor, with blades in the shape of the letter “Z”, also have good efficiencies, generating an average mechanical power, for the wind speed interval of 0 to 7 m/s, of 0.62 W, respectively 0.57 W, while for the Savonius 0.30 rotor the average is 0.64 W. Knowing this values, and bringing into question the structural characteristics of this rotors, one can say that the VAWT4 type rotor can be a very good replacement variant for the Savonius rotors with semi-cylindrical blades. The VAWT1 and VAWT5 rotors have serious start-up problems and generate small amounts of energy, being so totally unsuitable for use in wind energy conversion applications, and the VAWT2 and VAWT3 rotors are recommended for applications where torque characteristics are very important, i.e. for pumping water, because they provide a very constant torque, even if they do not produce significant amounts of energy.

Besides this issues, another very important aspect that has to be known about the vertical axis wind turbines, so that this turbines would be exploited at their full potential, but also for a suitable choice of the electric generator, is the equation that describes the variation of the mechanical power as a function of wind speed. In order to determine this equations the obtained experimental data were used and processed

prelucrate cu ajutorul programului software CurveExpert, obținându-se în prima fază curba care descrie funcționarea turbinelor, iar în final ecuația de variație a puterii mecanice în funcție de viteza vântului. Determinarea acestor parametri a fost făcută numai pentru turbinele Savonius 0.3, Savonius 0.25 și VAWT4 deoarece numai aceste configurații prezintă un interes practic.

În figura 7 este prezentată curba de variație a puterii determinată pentru turbina Savonius 0.3, iar în tabelul 2 sunt prezentate ecuațiile aferente fiecăreia dintre cele trei turbine.

using the “CurveExpert” software. In the first phase, the curves that describe the operation of the wind turbines were obtained and, finally, the equations of these processes were extracted. The determination of these parameters was made only for Savonius 0.3 and 0.25 wind turbines and for the VAWT4 turbine, because only these turbines have a practical interest.

Figure 7 presents the variation curve of the power as a function of the wind speed in the case of the Savonius 0.3 turbine and in table 2 the equations for each turbine are given.

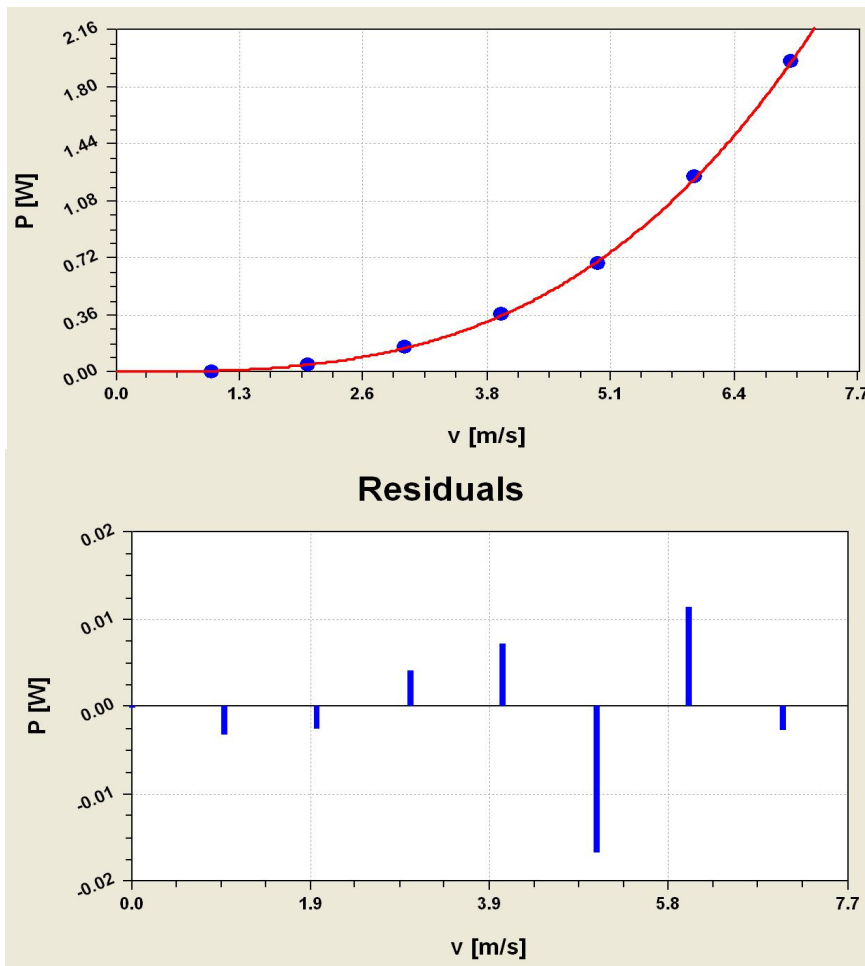


Fig. 7. Curba caracteristică $P-v$ a turbinei SAVonius 0.30, în CurveExpert

Fig. 8. The $P-v$ characteristic curve of the Savonius 0.3 wind turbine, in CurveExpert

Tipul turbinei	Tipul funcției	Funcție	Coefficienți	Eroare standard Coeficient de corelație
Savonius 0.3	Bleasdale Model	$P = (a + bv)^{-1/c}$	a=0.04266 b=0.17073 c=-0.31485	E=0.0083511 C=0.99995
Savonius 0.25	MMF Model	$P = \frac{ab + cv^d}{b + v^d}$	a=0.00319 b=0.30403 c=14.3309 d=3.2072	E=0.01088 C=0.999899
VAWT4	3rd Degree Polynomial	$P = a + bv + cv^2 + dv^3$	a=0.000549 b=-0.01338 c=0.01176 d=0.003533	E=0.01088 C=0.999899

Tab. 2. Ecuațiile curbelor caracteristice $P-v$ de funcționare a turbinelor

Tab. 2. The equations of the characteristic curves $P-v$ for the operation of the turbine

4. CONCLUZII

Datorită design-ului simplu și a costurilor reduse de producție și exploatare, rotorul Savonius a devenit din ce în ce mai interesant pentru producerea de energie electrică prin conversia energiei eoliene, în special în cazul unor instalații rezidențiale și comerciale de dimensiuni mici și cu puteri reduse, putându-se realiza astfel o descentralizare a sistemelor energetice naționale. Cu toate acestea, pentru că rotoarele Savonius au fost utilizate până în prezent numai într-un număr redus de aplicații pentru producerea de electricitate, continuarea studiilor și experimentelor pentru îmbunătățirea eficienței acestor turbine este imperativă. Principalele observații care pot fi făcute în urma efectuării acestui studiu experimental cu privire la determinarea designului optim al rotoarelor cu ax vertical sunt prezentate în cele ce urmează:

- Pentru a se atinge eficiențe cât mai ridicate de conversie a energiei eoliene în energie utilă este recomandată utilizarea rotoarelor Savonius cu pale semicilindrice.

4. CONCLUSIONS

As a consequence of its simple design and low production and exploitation costs, the Savonius wind rotor has become increasingly interesting for the production of electricity through wind energy conversion, especially for low and medium power residential or commercial installations, thus being able to achieve a decentralization of national power systems. However, because Savonius wind rotors have been used so far only in a few application for the production of electricity, further studies and experiments in order to improve the efficiency of these turbines must be made. The main observations that can be made as a consequence of this experimental study on the determination of the optimum design of the vertical axis wind rotors are presented below:

- In order to achieve high conversions efficiencies of the wind energy into useful energy, the use of the Savonius rotors with semi-cylindrical blades is recommended.
- The optimal overlap ratio of the blades of Savonius rotors is $e/D=0.3$.

- Raportul optim de suprapunere a palelor rotoarelor Savonius este $e/D=0.5$.
- Rotorul VAWT4 este mult mai simplu din punct de vedere constructiv decât rotoarele Savonius clasice și poate reprezenta o variantă bună de înlocuire a acestora.
- Rotoarele VAWT2 și VAWT3 pot fi utilizate cu succes în instalații de pompare a apei.
- The VAWT4 type rotor is much easier to build from a constructive point of

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]. Rus L., Cătărig T. – *Studiu experimental privind influența numărului de etaje ale rotorului asupra producției de energie a turbinei Savonius*, Analele Universității „Constantin Brâncuși” din Târgu Jiu, nr.1/2012.
- [2]. Hau E. – *Turbine eoliene*, Springer, New York, 2006, pg. 454-470.
- [3]. Rus L. – *Utilizarea energiei eoliene la producerea de energie electrică. Stadiul actual, analiză critică și concluzii*, Raport de cercetare științifică, pg. 20-40, Cluj-Napoca, Romania.
- [4]. Mussell D. – *Construiește-și propria turbină eoliană*, Institutul Pembina – Soluții pentru Energii Regenerabile, Ontario, 2006.
- [5]. Al-Bahadly I. – *Construirea unei turbine pentru un imobil rezidențial*, Energie pentru Dezvoltare Durabilă 13, 2009, pg. 159-165.
- [6]. Deda Altan B., Atilgan M. – *Studiu experimental și numeric asupra creșterii performanței rotorului eolian Savonius*, Management-ul și Conversia Energiei, 2008, pg. 3425-3432.

view than the classical Savonius wind rotors and can be a good option for the replacement of these rotors.

- The VAWT2 and VAWT3 type rotors can be successfully used as a part of water pumping facilities

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/S/60078, project co-funded from European Society Fund through Sectorial Operational Program Human Resources 2007 – 2013.

REFERENCES

- [1]. Rus L., Cătărig T. – *Experimental study on the influence of the number of stages on the energy production of Savonius wind turbines*, Annals of the “Constantin Brâncuși” University of Târgu Jiu, nr. 1/2012.
- [2]. Hau E. – *Wind Turbines*, Springer, New York, 2006, pg. 454-470.
- [3]. Rus L. – *The use of wind energy for the production of electricity. Actual stage, critical analysis and conclusions*, Scientific Research Report, pg 20-40, Cluj-Napoca, Romania.
- [4]. Mussell D. – *Build your own wind turbine*, The Pembina Institute – Sustainable Energy Solutions, Ontario, 2006.
- [5]. Al-Bahadly I. – *Building a wind turbine for a rural home*, Energy for Sustainable Development 13, 2009, pg. 159-165.
- [6]. 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. 3425-343