

# МОДЕЛИРАНЕ И СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ НА ВЯТЪРНА ТУРБИНА С ВЕРТИКАЛНА ОС НА ВЪРТЕНЕ - ТИП H-ROTOR

## ЧАСТ 2 СИМУЛАЦИОННО ИЗСЛЕДВАНЕ

Янко СЛАВЧЕВ<sup>1</sup>, Калин АДЪРСКИ<sup>2</sup>, Юлиан ГЕНОВ<sup>2</sup>

[ya\\_slavchev@abv.bg](mailto:ya_slavchev@abv.bg), [adarsky@yahoo.com](mailto:adarsky@yahoo.com), [j\\_genov@mail.bg](mailto:j_genov@mail.bg)

<sup>1</sup>) катедра ИЛПТСТ, МФ, <sup>2</sup>) катедра Механика, ТФ  
ТУ – София, 1756, БЪЛГАРИЯ

В настоящата разработка се извършва 3-D моделиране и симулационно изследване (флуидни симулации CFD чрез метода на крайните елементи) на вятърна турбина с вертикална ос на въртене (VAWT тип H-rotor). Изследвани са различни позиции на турбината и ъгли на завъртане на лопатките (pitch angle). Отчетени са измененията на флуидното поле (скорост и налягане) около лопатките и са получени данни за въртящия момент и силовите въздействия върху вятърната турбина.

Ключови думи: вятърна турбина с вертикална ос (VAWT), крайни елементи, CFD, аеродинамични канали

### 1. Въведение

Цел на настоящото изследване е изграждането на пространствен числен модел на аеродинамичното взаимодействие, позволяващ при различни скорости на вятъра, положения на ротора на турбината и ъгли на завъртане на лопатките (pitch angles), да се получат разпределенията на скоростта и налягането и респективно действащите сили и моменти. Въз основа на резултатите от CFD симулациите да се идентифицират параметрите на налитичния модел, разгледан в първата част [12].

В [9] се изследват експериментално характеристиките на няколко типа турбини, като се проследяват ефектите от възникващата турбуленция на флуида около турбините при отделните позиции на лопатките. Модел на аеродинамичното взаимодействие и варианти на управлението на ъгъла на атака се изследват в [8].

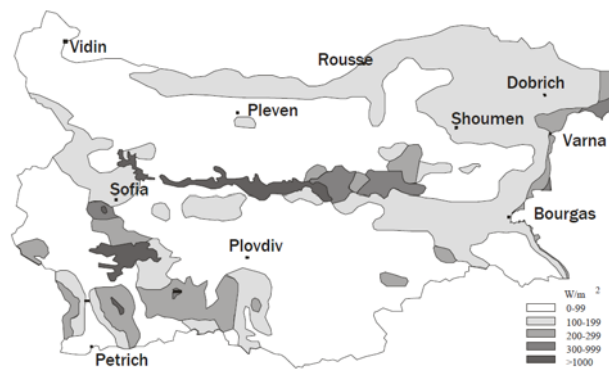
В [11,13,14,25] се идентифицират характеристиките на VAWT посредством числено моделиране с CFD (Computer Fluid Dynamics) симулации.

### 2. Характеристики на моделът

Разглеждания модел турбина е тип Darrieus H-rotor модел с височина на лопатките 1,2 m, диаметър на ротора 1,2 m,

профил на лопатките NACA0018, брой лопатки – три.

На Фиг.1 е показано зониранието на енергийния поток в страната [2], представляващ генерираната мощност отнесена към площта на диска на турбината  $A_d=2RH$ .



Фиг. 1 Зони на енергиен потенциал на ветровия поток в България

Ако се приеме стойността на  $P_{WA} \approx 100 \div 200 \text{ W/m}^2$ , то при  $A_d = 1,44 \text{ m}^2$ , за средната скорост на вятъра се получава  $V_{\infty} \approx 6 \text{ m/s}$  ( $P_{WA} = 139.32 \text{ W/m}^2$ ).

При тези размери, и сила на вятъра, една такава турбината би имала предимно маломощни приложения, свързани със зареждане на акумулаторни батерии, хранящи битови уреди, осветителни тела,

телекомуникационни съоръжения, помпи, селскостопанска техника и други.

Те се характеризират с ниски стойности на коефициента на мощността, представляващ отношението на мощността на турбината към мощността на идеалната:

$$C_p = \frac{P_{wtr}}{0,5\rho A_d V_\infty^3} \in [0,15 \div 0,35]$$

В Таблица 1 са представени характерни стойности на  $C_p$  за VAWT от разглеждания клас [11].

**Табл. 1** Характерни стойности на  $C_p$  за някои видове VAWT и техните приложения

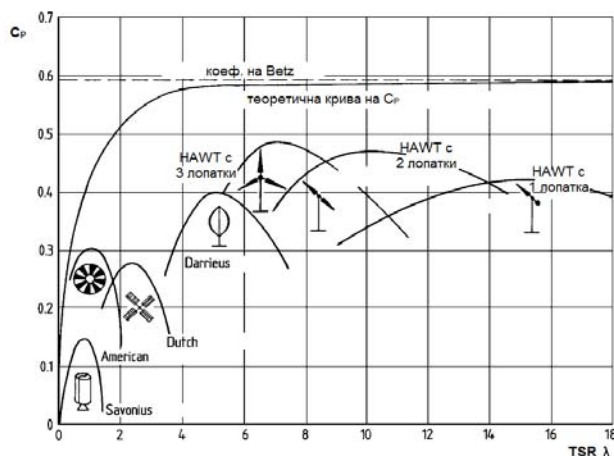
Тип ВТ	$C_p$	
	стандартна конструкция	оптимална конструкция
Darrieus (за водна помпа)	0,15	0,30
Многолопаткова селскостопанска (обслужваща водна помпа)	0,10	0,30
Savonius (за зареждане на акумулатори)	0,10	0,20
Darrieus вятърна турбина	0,15	0,35

Въз основа на тези данни следва да се очаква, че стойността на  $C_p$  ще е около 0,15.

От Фиг.2, показваща зависимостта на  $C_p$  от скоростното отношение  $\lambda$  на турбината, следва, че:

$$\lambda = \frac{\omega_{wtr} R}{V_\infty} \approx 1,4,$$

т.е. ъгловата скорост на турбината би следвало да е  $\omega_{wtr} \approx 14 \text{ s}^{-1}$ .

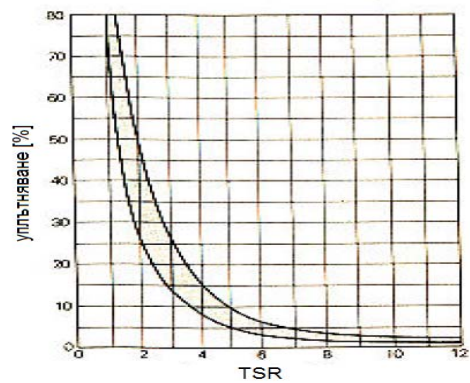


**Фиг. 2** Зависимост  $C_p=f(\lambda)$  [1]

От графиката на Фиг.3, представляваща факторът на уплътняване  $\sigma'(\lambda)$ , се вижда, че за  $\lambda=1,4$ :

$$\sigma'(\lambda) = \lambda \ell / R \approx 0,72,$$

което определя дължина на хордата  $\ell=0,3 \text{ m}$ .



**Фиг. 3** Зависимост на уплътняването спрямо  $\lambda$  [3]

За мощността на турбината се получава  $P_{wtr}=183,51 \text{ W}$ .

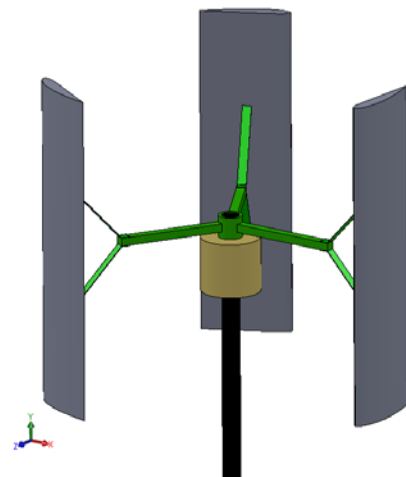
Линейната скорост на лопатките ще бъде  $V_b = R\omega_{wtr} = 8,4 \text{ m/s}$ , а въртящият момент на турбината  $T = \frac{P_{wtr}}{\omega_{wtr}} = 21,84 \text{ Nm}$

Обобщените данни за модела са дадени в Таблица 2.

**Табл. 2** Входни данни за модела на VAWT

Несмутена скорост на вятъра [m/s]	6
Плътност на въздуха [kg/m³] (при 25°C, налягане 101,325 kPa)	1,18
$\lambda$ (TSR)	1.4
Уплътняване	72%
Брой лопатки B	3
Профил на лопатките	NACA0018
Коефициент на мощността $C_p$	0,15
Височина на лопатките H [m]	1,2
Радиус на ротора на турбината R [m]	0,6
Хорда на лопатките l [m]	0,3
Ъглова скорост на ротора $\omega_{wtr}$ [s⁻¹]	14
Мощност $P_{wtr}$ [W]	27,53
Площ на ротора $A_d$ [m²]	1,44

### 3. Изграждане на моделът

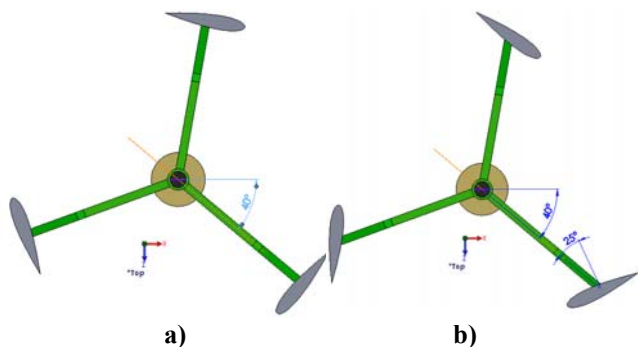


**Фиг.4** Пространствен компютърен модел на VAWT H-rotor

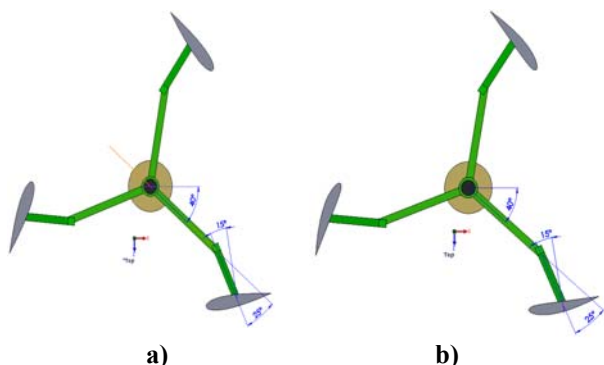
Компютърният пространствен модел се изгражда в средата на CAD системата SolidWorks –Фиг.4.

Формирането на профила на лопатките NASA0018 се базира на известни математически зависимости [4], чрез които се генерират координати XYZ на точки за съответните сечения. За постигане на достатъчна точност при изграждането на лопатката и впоследствие на нейната мрежа от крайни елементи, всяко сечение се изгражда от минимум 100 точки. За постигането на гладка повърхнина на лопатката се използва интерполация чрез кубични сплайни [5].

Вятърната турбина - Фиг.5 и Фиг.6 е асемблирана, като са дефинирани съответни връзки, позволяващи ориентирание на ротора в различни позиции, задаване на различни ъгли на завъртане на лопатките (pitch angles), както и използването на различни фамилии профили.



Фиг. 5 Ориентирание на ротора с лопатките  
 а) ротор завъртян на позиция  $\Theta=40^\circ$ , pitch angle  $\beta=0^\circ$ ;  
 б) ротор завъртян на позиция  $\Theta=40^\circ$ ,  $\beta=-25^\circ$



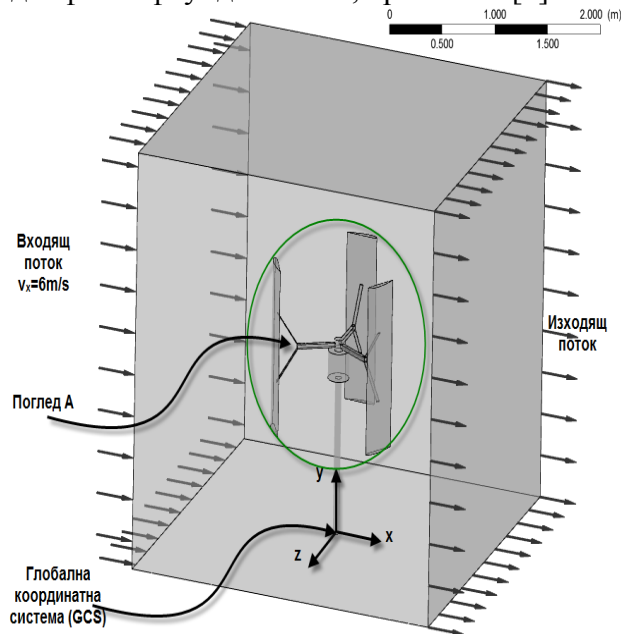
Фиг. 6 Смесено ориентирание на ротора с лопатките  $\Theta=40^\circ$ ,  $\beta=25^\circ$  и допълнително чупещо се рамо завъртяно на  $15^\circ$   
 а) NASA0018; б) NASA4415

След завършване на моделирането, геометрията се прехвърля за изследване чрез

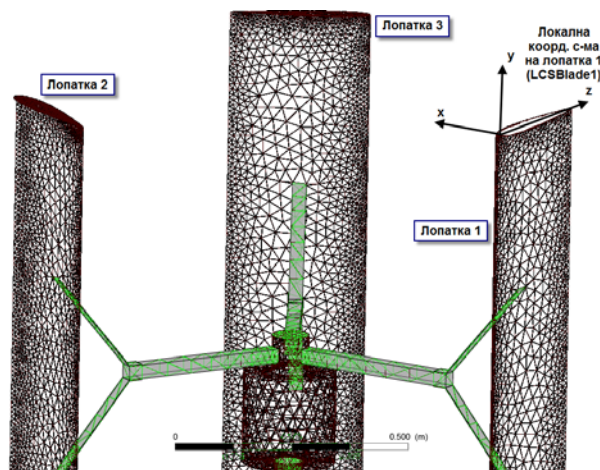
метода на крайните елементи (МКЕ) към пакета ANSYS.

Турбината се разполага във флуид – въздух (continuous fluid), при  $25^\circ\text{C}$  (isothermal) и налягане 101,325 kPa.

При флуидните симулации - Фиг.9 и Фиг.10, се прилага подхода на изчислителна флуидна динамика (CFD), основаващ се на изграждане на флуидни канали и решаване на уравненията на Navier-Stokes, описващи изменението на параметрите на всеки еднофазен флуиден поток, чрез МКЕ [7].



Фиг. 7 ВТ разположена във флуиден канал



Фиг. 8 Поглед А от Фиг.7

Изчислителни цели са налягането и скоростта на обтичане и породените сили и моменти.

За системата от флуидни канали, се прилагат еднакви мащабиращи параметри, с оглед на избягване на изчислителни грешки.

Параметрите на флуидната област са:

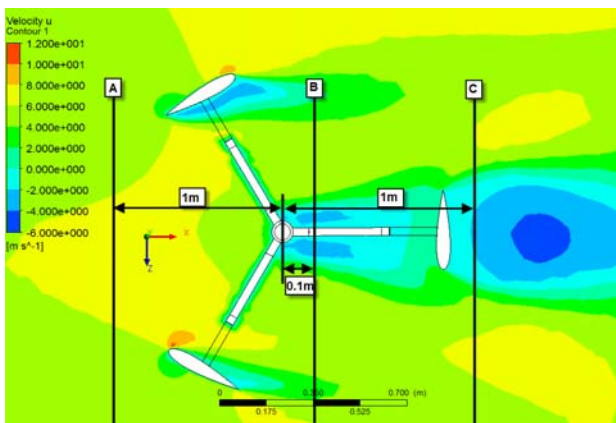
- число на Reynolds  $Re=1.112 \times 10^6$ ;
- число на Mach  $M \ll 1$  (поток с подзвукова скорост);
- непрекъснат флуид;
- турбулентен модел - shear stress transport;
- тип топлоотдаване - isothermal при  $25^\circ\text{C}$ ,
- ниво на турбулентна интензивност – средна от 5%;
- гранични условия – входяща скорост  $V_\infty = 6 \text{ m/s}$ , изходящо налягана  $p_w$  равно на атмосферното, при стените на флуидния канал сръзващото напрежение е нула, т.е. отсъства триене.

Качеството на мрежата е 87,7%, като това на елементите е 0,77, т.е. възможността за грешки в етапа на дискретизация е малка.

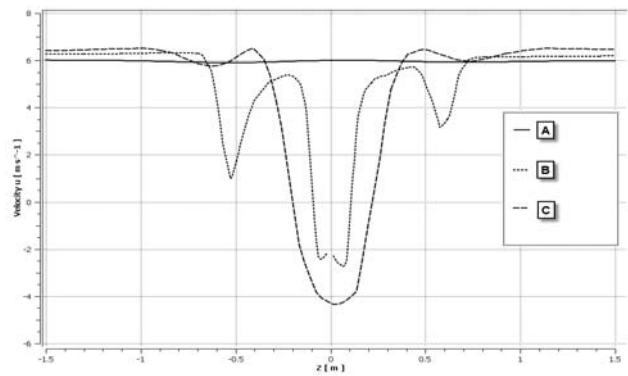
Глобалната координатна система (GCS) е разположена в центъра на основата на кулата и е ориентирана, както е показано на Фиг.7. На Фиг.8 е показана локалната координатна система (LCS) за лопатка 1. Съгласно ориентацията са възприети две основни повърхнини на лопатката, които са подложени на ветровото натоварване - повърхнина -x (наречена *blad1\_out*) и повърхнина +x (наречена *blad1\_in*). Посредством LCS се отчитат съответните нормални и тангенциални усилия, действащи върху всяка лопатка.

След завършване на CFD симулациите, е възможно отчитане и анализиране на резултатите в различни точки и равнини.

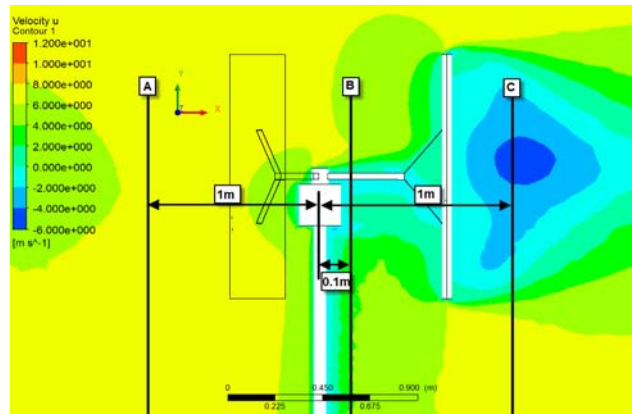
На фигури от Фиг.9 до Фиг.17 са представени резултати за изследвани случаи на лопатка тип *NACA0018* при  $\beta=90^\circ$ .



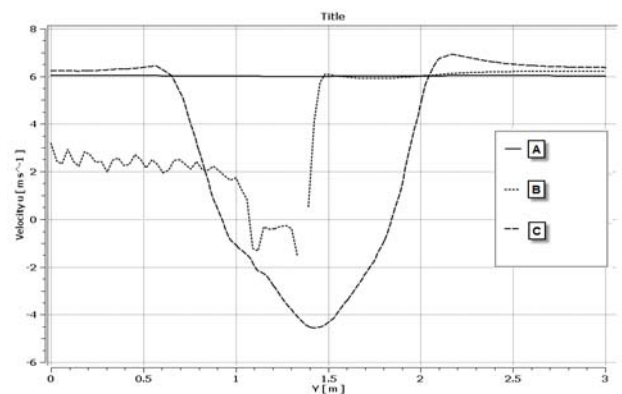
Фиг. 9 Разпределение на скоростта на флуида по ос x в надлъжно сечение ( $xz$  plane,  $y=1,36\text{m}$ , GCS) през средата на лопатките, позиция  $\Theta=0^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$



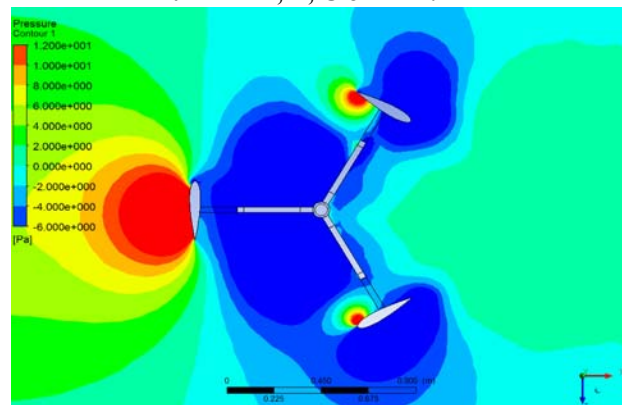
Фиг. 10 Разпределение на скоростта на флуида по линии А, В, С от Фиг. 9



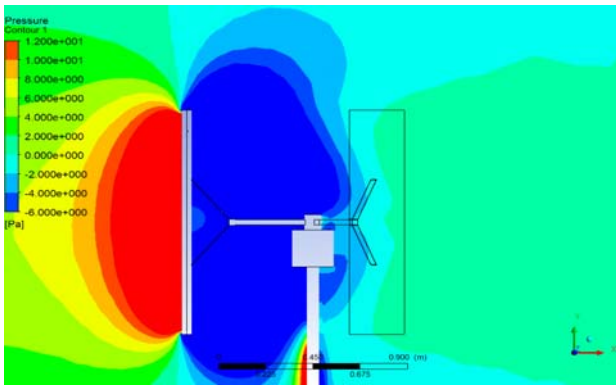
Фиг. 11 Разпределение на скоростта на флуида по ос x в надлъжно сечение ( $xy$  plane,  $z=0\text{m}$ , GCS) през средата на канала,  $\Theta=0^\circ$ ,  $\beta=90^\circ$



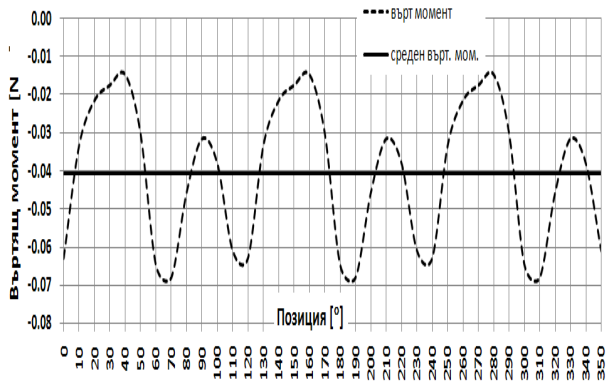
Фиг. 12 Разпределение на скоростта на флуида по линии А, В, С от Фиг.11



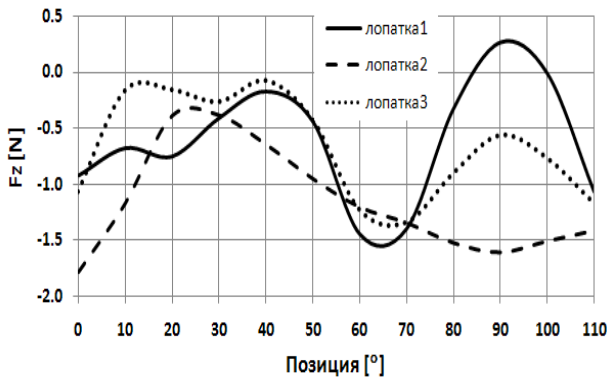
Фиг. 13 Разпределение на налягането на флуида в надлъжно сечение ( $xz$  plane,  $y=1,36\text{m}$ , GCS) през средата на лопатките,  $\Theta=60^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$



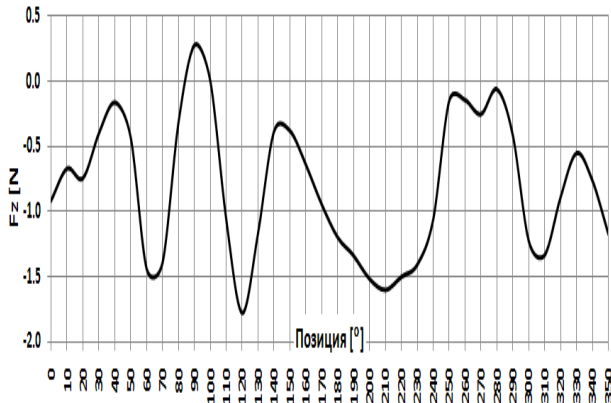
Фиг. 14 Разпределение на налягането на флуида в надлъжно сечение (xy plane, z=0m, GCS) през средата на канала,  $\Theta=60^\circ$ ,  $\beta=0^\circ$



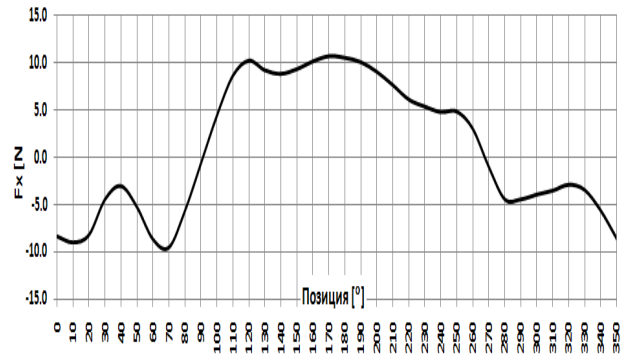
Фиг. 15 Въртящ момент (при спрян генератор) за различни позиции на ротора,  $\beta=0^\circ$



Фиг. 16 Тангенциална сила Fz върху всяка лопатка при завъртане на ротора от 0 до 110°,  $\beta=0^\circ$



Фиг. 17 Тангенциална сила Fz върху една лопатка при пълен оборот на завъртане на ротора  $\beta=0^\circ$



Фиг.18 Нормална сила Fx върху една лопатка при пълен оборот на завъртане на ротора,  $\beta=0^\circ$

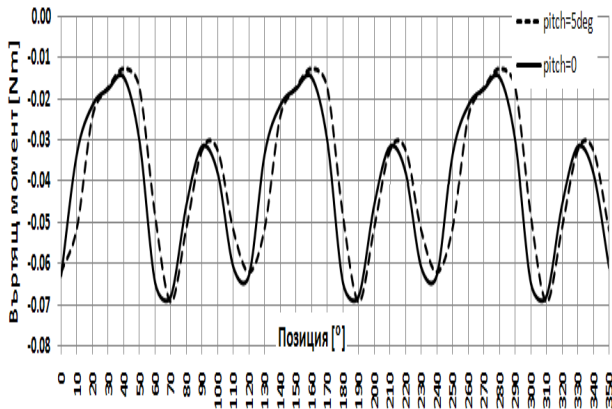
Табл.3 Нормална и тангенциална сила върху една лопатка при пълен оборот на завъртане

Позиция [°]	pitch angle = 90°		pitch angle = 95°	
	Тангенциална сила Fz [N]	Нормална сила Fx [N]	Тангенциална сила Fz [N]	Нормална сила Fx [N]
0	-0.921	-8.344	-0.951	-8.168
10	-0.675	-8.981	-0.783	-9.073
20	-0.750	-8.182	-0.823	-8.812
30	-0.407	-4.430	-0.490	-4.994
40	-0.169	-3.022	-0.094	-3.480
50	-0.437	-5.244	-0.190	-5.669
60	-1.443	-8.662	-0.930	-8.140
70	-1.396	-9.515	-1.766	-10.274
80	-0.324	-5.641	-0.902	-8.141
90	0.269	-0.625	0.050	-3.495
100	-0.006	4.444	0.263	1.676
110	-1.064	8.659	-0.449	6.543
120	-1.780	10.245	-1.426	9.706
130	-1.167	9.231	-1.791	9.732
140	-0.391	8.858	-0.547	8.687
150	-0.386	9.350	-0.314	8.894
160	-0.645	10.175	-0.498	9.835
170	-0.950	10.716	-0.800	10.597
180	-1.203	10.550	-1.081	10.697
190	-1.342	10.092	-1.238	10.362
200	-1.521	9.068	-1.434	9.543
210	-1.605	7.666	-1.491	8.559
220	-1.505	6.139	-1.498	6.903
230	-1.411	5.391	-1.470	5.967
240	-1.064	4.807	-1.338	5.061
250	-0.159	4.862	-0.506	4.850
260	-0.151	3.039	-0.084	4.383
270	-0.259	-0.980	-0.237	1.416
280	-0.068	-4.418	-0.172	-2.751
290	-0.421	-4.428	-0.052	-4.881
300	-1.231	-3.921	-0.884	-3.660
310	-1.338	-3.510	-1.142	-2.761
320	-0.895	-2.883	-0.736	-2.065
330	-0.557	-3.435	-0.501	-2.942
340	-0.768	-5.610	-0.713	-4.979
350	-1.175	-8.571	-1.190	-8.094

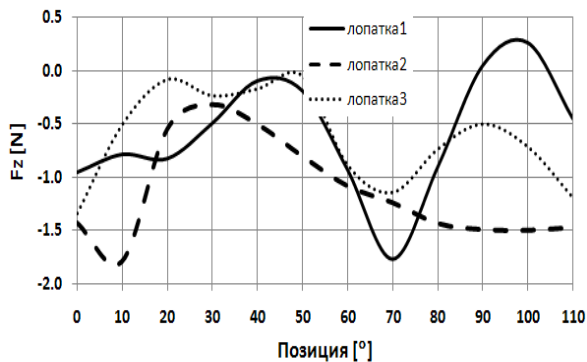
Фигури 9÷12 показват съществено изменение на скоростта на флуида с при преминаване през турбината. На Фигури 13÷14 е дадено налягането при положение когато лопатка 2 поема нормално насочено ветрово натоварване. На Фиг.15 е функцията на въртящия момент на VAWT при различни позиции на ротора. На Фиг.16 е представено тангенциалното усилие върху всяка една лопатка при различни позиции на ротора. На Фиг.18 и в Табл.3 са дадени стойностите и на нормалното усилие.

Съществено е, да се отбележи, че данните на графиките са отнесени към дебелината на сечението  $\delta$  и за да се получат реалните стойности е необходимо да се умножат с отношението  $H/\delta$ .

Извършени са и симулации с  $\beta=5^\circ$  Фиг.19-20.



Фиг. 19 Въртящ момент (при спрян генератор) за различни позиции на ротора, при различни  $\beta$



Фиг. 20 Тангенциална сила  $F_z$  върху всяка лопатка при завъртане на ротора от  $0$  до  $110^\circ$ ,  $\beta=5^\circ$

### Заклучение

Изграден е 3-D компютърен модел, с който могат да се симулират различни позиции на ротора, ъгли на завъртане на лопатките и да се анализират различни профили на турбинните лопатките. В резултат на CFD симулациите се получават характеристиките на флуидното поле (скорост и налягане), както и силите и моментите, възникващи от аеродинамичното взаимодействие.

Резултатите от числения анализ позволяват идентификацията на характеристиките и параметрите на апроксимиращи

аналитични модели, с помощта на които да се реализира оптимално управление на ветрогенератора.

### Благодарности

Авторите изказват благодарност на ФНИ на РБ, за финансирането на разработката по линията на договор ДО-02-348/2008 „Система за мониторинг, диагностика и управление на ветрогенератори”.

### Литература

- [1] Hau E., 2006, Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics, Springer;
- [2] Georgieva V., 2006, Wind Energy in Bulgaria, Ministry of Economy and Energy, Bulgaria;
- [3] Johnson G., 2004, Wind Turbine Power, Energy and Torque, USA;
- [4] Marzocca P., 2009 The NACA airfoil series, Clarkson University;
- [5] SolidWorks, 2012, Reference Guide;
- [6] Walker J., N. Jenkins, 2002, Wind Energy Technology, John Wiley and Sons;
- [7] Anderson J., 1995, Computational Fluid Dynamics: The Basics with Applications. McGraw-Hill Science;
- [8] Y. Staelens, A, 2003, Straight-Bladed Variable Pitch VAWT Concept for Improved Power Generation, Elsevier;
- [9] Miao J. et al, 2011, Wind-Tunnel Study on Aerodynamic Performance of Small VAWT, JCSME,;
- [10] ANSYS, Theory Reference;
- [11] Beri H., Y. Yao, 2011, Double Multiple Stream Tube Model and Numerical Analysis of Vertical Axis Wind Turbine, Energy and Power Eng., 3, 262-270;
- [12] Адърски К., Ю. Генов, К. Арнаудов, 2012, Моделиране и симулационно изследване на вятърна турбина с вертикална ос на въртене - тип H-rotor. Част I модел на аеродинамичното взаимодействие (в настоящия сборник);
- [13] Howell R., N. Qin, J. Edwards, N. Durrani, 2010, Wind tunnel and numerical study of a small vertical axis wind turbine, Renewable Energy 35 pp.412–422;
- [14] Nobile R., M. Vahdati, J. Barlow, A. Mewburn-Crook, Dynamic stall for a Vertical Axis Wind Turbine in a two-dimensional study, World Renewable Energy Congress, Linkoping, Sweden 2011- Proc., 4225-4232;
- [15] Castelli M.-R., G. Simioni and E. Benini, 2012, Numerical Analysis of the Influence of Airfoil Asymmetry on VAWT Performance, World Academy of Science, Engineering and Technology, 61, 312-321.

## MODELING AND INVESTIGATION OF VERTICAL AXIS WIND TURBINE – TYPE H PART 2 CFD SIMULATION

Yanko SLAVCHEV, Julian GENOV, Konstantin ARNAUDOV  
TU – Sofia, 1756, Bulgaria

In this paper is performed 3-D modeling and simulation study (fluid CFD simulations using finite elements) of a wind turbine with a vertical axis of rotation (VAWT type H-rotor). Simulations are made for various turbine positions and pitch angles. It was obtained the data for the torque, forces and power of the investigated wind turbine.