

Lapátszög-szabályzás hatása a nyomatékra

Impact of the wind turbine blade's pitch angle on the torque

Hetyei Csaba*, Dr. Szlivka Ferenc**

*Óbudai Egyetem, Biztonságtudományi Doktori Iskola, Budapest, Magyarország

**Óbudai Egyetem, Bánki Donát Gépész és Biztonságtechnikai Mérnöki Kar, Budapest, Magyarország
hetyei.csaba@phd.uni-obuda.hu; szlivka.ferenc@bgk.uni-obuda.hu

Összefoglalás — A napjainkban jelentkező egyre nagyobb energiaigény miatt, mindinkább előtérbe kerülnek a megújuló energiaforrások. Cikkünkben a vízszintes tengelyű szélturbinák lapátozásának numerikus áramlási szoftverrel történő vizsgálatát mutatjuk be. Szimulációink során a szélkeréken ébredő nyomatékot a lapát lapátszög-szabályzás (Pitch Control) függvényében elemeztük.

Kulcsszavak: Szélturbina, szabályzás, lapátszög-szabályzás, CFD, megújuló energia.

Abstract — Today's increasing demand for energy is becoming more and more prevalent the renewable energy sources. In this article, we will inspect the HWAT's (horizontal axis wind turbine), using a CFD (Computational Fluid Dynamic) software. With this simulation method, we will examine the torque on the blades with different pitch angles.

Keywords: Wind turbine, control system, pitch control, CFD, renewable energy.

1 BEVEZETÉS

A napjainkban jelentkező egyre nagyobb energiaigény miatt mindinkább előtérbe kerülnek a megújuló energiaforrások, köztük a szélenergia is.

Az első elektromos áramot termelő szélerőművet 1887-ben építették, de elterjedésük csak az 1980-as olajválság idején kezdődött. Azóta telepítésük növekvő tendenciát mutat, ami jól látszik a telepített szélerőmű teljesítményeken. 2000-ben összesen 17,4 GW, 2010-ben 197,9 GW, 2015-ben 432,4 GW teljesítményű szélturbina állt rendelkezésre a világon [1].

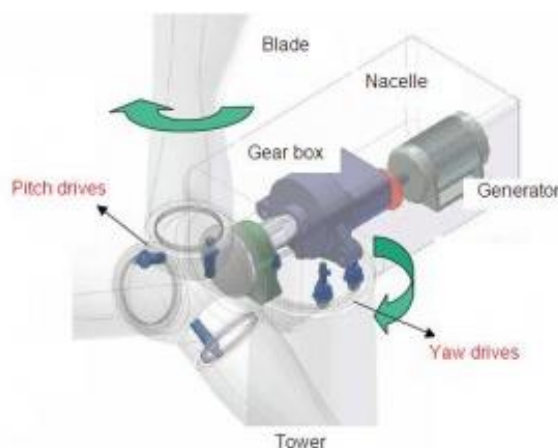
A technikai fejlődésnek köszönhetően a szélturbinák minden egysége fejlődött, köztük a szélerőművek lapátozási rendszere és annak a szabályása is. Cikkünkben a Pitch controllal azaz a lapátszög-szabályzással foglalkozunk.

2 LAPÁTSZÖG-SZABÁLYZÁS RÖVID ISMERTETÉSE

A lapátszög-szabályzásra a szél ingadozása miatt van szükség, mert a szél nem mindig ugyanakkora sebességgel fúj. Változó szélesség esetén változó forgási sebességgel forog a szélkerék, így változó a szélerőmű energiatermelése.

Az elektromos hálózat számára – az optimális energiatermelés miatt – kedvezőbb az egyenletes mennyiségű és minőségű elektromos áram. Ezért alkalmazzák a szélerőművek a lapátszög-szabályzást.

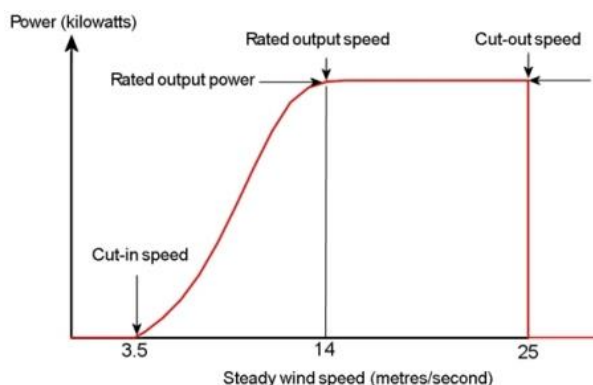
Napjainkban a szélerőművek jellemzően kétféle szabályzással vannak felszerelve, a Pitch és a Yaw controllal, melyeknek a működését a következő ábra szemlélteti.



1. ábra. Pitch és Yaw control szemléltetése [2]

A szélességtől függően változik a szélerőmű energiatermelési karakterisztikája. Az indulási szélességnél és az optimális szélességnél nem feltétlenül azonos lapátállás a kedvező. A lapátszög-szabályzásnak e problémára jelent megoldást.

A következő ábrán a szélerőművekre jellemző energiatermelési karakteristika látható a szélesség függvényében.



2. ábra. Szélerőművek energiatermelési jelleggörbéje a szélesség függvényében [3]

A szélörvények forgásának „hajtómotorja” a szél, melyben véges nagyságú energia rejlik és nagysága a szélsébségtől függ.

A szélben rejlő teljesítmény a következő egyenlettel számítható ki:

$$P_{szél} = \frac{1}{2} \cdot \rho \cdot A \cdot v^3 \cdot C_p(\lambda, \beta) \quad (1)$$

Ahol,

- ρ , a sűrűség,
- A , a szélkerék munkavégző keresztmetszete,
- v , a szél sebessége,
- C_p , a szélkerék teljesítménytényezője
- λ , gyorsjáratú tényező
- β , lapátszög-szabályzás szöge.

Az egyenletben C_p , a szélkerék teljesítmény tényezője, ami két paramétertől, a gyorsjáratú tényezőtől (λ) és a lapátszög-szabályzás szögétől (β) függ. Elméleti maximumával Betz foglalkozott, aki megállapította, hogy 16/27-ed az ideális szélkerék teljesítménytényezője.

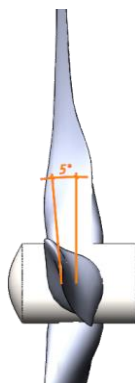
λ , azaz a gyorsjáratú tényező azt mutatja meg, hogy a szélkerék legkülső pontjának sebessége hányszorosa a szabadáramlásban a szél sebességének. Kiszámítása a következő módon lehetséges:

$$\lambda = \frac{R \cdot \omega}{v} \quad (2)$$

Ahol,

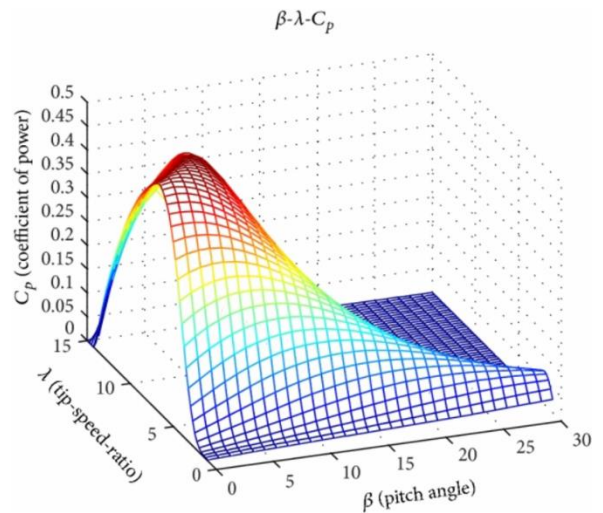
- R a szélkerék sugara,
- ω , forgási sebesség,
- v , szélsébsége a szabadáramlásban.

A β , azaz a lapátszög-szabályzás szögértékét a következő ábra szemlélteti.



3. ábra. β szög a CAD modellünkben

A két paraméter ismeretében a teljesítmény tényező ábrázolható, jelleggörbéje a következő diagramon látható.

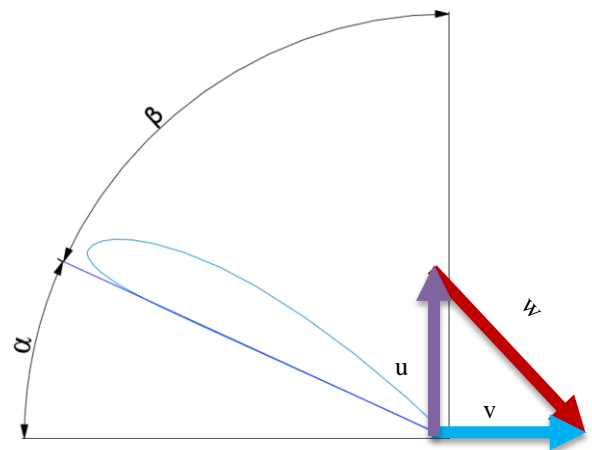


4. ábra. $C_p(\lambda, \beta)$ jelleggörbéje [4]

A lapátszög-szabályzás célja, hogy a szélörvény az energetikailag optimális teljesítménnyel, vagy azt megközelítve üzemeljen. Változó szélsébség esetén (v) a lapát úgy forduljon, hogy a forgási sebesség (ω) ne változzon és biztosítsa az egyenletes energiatermelést.

Amennyiben a forgási sebesség nem változik, a szélkerék szögsebessége (ω) és a gyorsjáratú tényező (λ) is állandó marad, a forgásból származó teljesítmény sem változik.

A lapátmozgás egyik metszete mellett kialakuló sebességháromszög a következő ábrán látható, ahol α -val az állásszög-, β -val a lapátszög-szabályzás szögértékét jelöltük.



5. ábra. Sebességháromszög a szélkerék lapátmozgásán

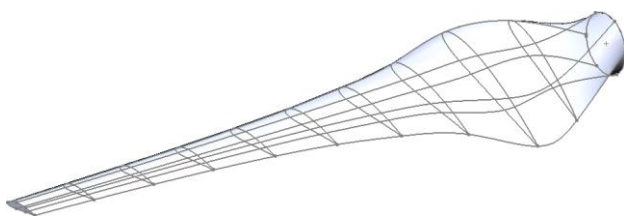
3 GEOMETRIÁK ELŐÁLLÍTÁSA

A szimulációkhoz egy 15 méter hosszú lapátot készítettünk és ezzel vizsgáltuk a lapátszög-szabályzást. A lapátgeometria adatai a következő táblázatban láthatók.

1. táblázat. Lapát geometriai adatai

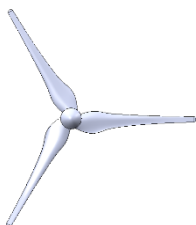
Metszet	Távolság [m]	Húrhossz [mm]	Profil csavarodás	Profil
11.	15	591	0,6°	NACA 4415
10.	13,5	655	1,2°	
9.	12	735	2,1°	
8.	10,5	837	3,1°	
7.	9	971	4,5°	
6.	7,5	1153	6,5°	
5.	6	1416	9,4°	
4.	4,5	1818	14°	
3.	3	2469	22,5°	
2.	1,5	3325	41,2°	
1.	0	D1100	41,2°	Kör

Az elkészített lapát az alábbi volt.

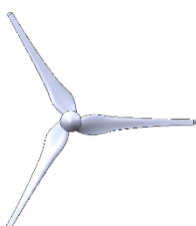


6. ábra. NACA 4415 számprofilból készített lapát

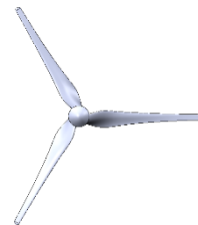
A vizsgálatokhoz használt kiindulási állapotot 0°-nak neveztük el, és hozzá képest a lapátokat a forgási tengelyük körül elforgattuk -5°, -3°, -1,5°, -1°, -0,5°, 0,5°, 1°, 1,5° 3° és 5°-kal. Az így kapott tizenegy konfigurációból három a következő ábrán látható.



7. ábra. Vizsgált geometria $\beta = -5^\circ$



8. ábra. Vizsgált geometria $\beta = 0^\circ$



9. ábra. Vizsgált geometria $\beta = 5^\circ$

A kialakított geometriákkal a szélkeréken ébredő nyomatékokat vizsgáltuk egy véges térfogat alapú szimulációs szoftver segítségével.

4 VÉGES TÉRFOGAT SZIULÁCIÓ

A numerikus áramlási szimulációs szoftverek közül a SOLIDWORKS Flow Simulation-jét választottuk, ami egy véges térfogat módszerre (VTM) épülő áramlási szoftver a SOLIDWORKS CAD rendszerébe integrálva.

A szimulációs szoftver a rendelkezésre álló teret véges térfogatú cellákra bontja, és az így kapott térrészekre a megmaradási tételek segítségével kiszámolja a nyomás, a sebesség és a hőmérséklet mezőket. Ez jellemzően a következő transzport egyenletre épül:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V U dV + \oint_A \underline{F} dA = \int_V S_V dV + \oint_A \underline{S}_A dA \quad (2)$$

Az egyenletben

- $\frac{\partial U}{\partial t}$, az időfüggő tag ($\frac{\partial U}{\partial t} = 0$, állandósult állapot),
- U, egy megmaradó mennyiség térfogati sűrűsége,
- F, az adott jellemző fluxusa,
- S_V , térfogati forrás az adott F fluxusra,
- S_A , felületi forrás az adott F fluxusra,
- V, ellenőrző térfogat,
- A, az ellenőrző térfogat felülete.

A szoftver a tér diszkrétizált részeire egy kiindulási értékkel elvégzi a számításokat. Az így kapott eredményekkel újabb iterációkat végez, míg a szimuláció el nem éri az előírt leállítási kritériumot.

5 SZIMULÁCIÓ PEREMFELTÉTELEI

A szimulációhoz egy minden oldalán nyitott téglatest formájú teret használtunk. Az áramlási tér mérete 260 x 120 x 120 méter volt, amiben a tér közepén az áramlási tér elejétől 100 méterre helyezkedtek el a szélkerekek.

A térbe belépő levegő áramlási sebessége 10 m/s volt. A szélkerekek minden esetben csúszó hálós módszerrel 40 fordulat/perc sebességgel forogtak.

Az eddig ismertetett geometriai és peremfeltételek alapján a szélkerék gyorsjáratú tényezője $\lambda = 6,283$.

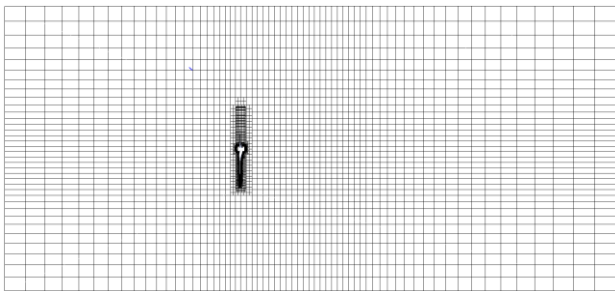
A turbulencia leírásához k-ε modellt használtunk. A szélkeréken ébredő nyomatékot célként definiáltuk, így ezt konvergenciafeltételként írtuk elő.

A csúszóháló és a forgás közben kialakuló örvények miatt a vizsgálat minden esetben időfüggő volt, automata időlépéssel. A szimuláció leállításához három feltételnek kellett teljesülni,

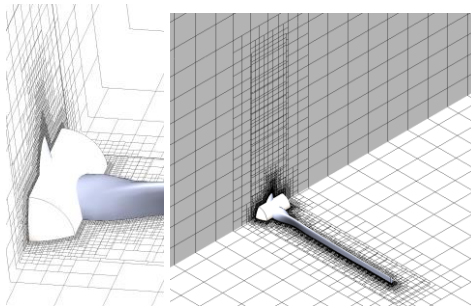
- a szélkerék forgási tengelyére nézve a rajta ébredő nyomaték konvergálnia kellett,
- minimum 1500-at kellett iterálnia,
- a szimulációnak minimum 2,5 (fizikai) másodpercig kellett futnia.

Az első feltétel konfigurációtól függően a 800. és az 1100. iteráció között teljesült, mely kb. 0,9 és 1,3 (fizikai) másodpercnek felelt meg. A szimuláció 2,5 (fizikai) másodpercig történő futtatása az 1850. és a 2350. iteráció között valósult meg (konfigurációtól függően).

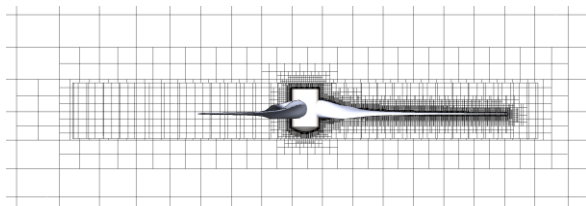
A tér felbontására téglatest hálót készítettünk, amit a test közelében határréteg hálózással sűrítettünk. Az egyik konfigurációhoz kapott véges térfogat háló a következő ábrán látható.



10. ábra. Az áramlási tér véges térfogat hálózása



11. ábra. Kiindulási (0°) állapot hálózása (felőlnézeti és oldalnézeti sík)

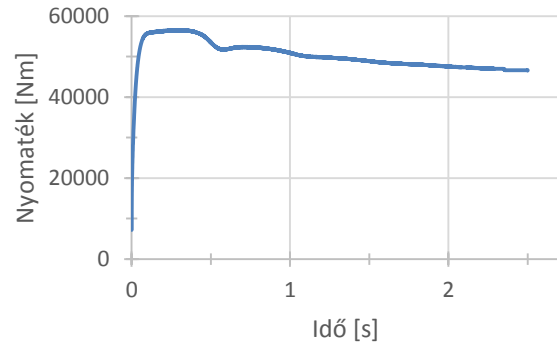


12. ábra. Kiindulási (0°) állapot hálózása (felül nézet sík)

A szimulációkhoz használt geometriák eltérő felülettel rendelkeztek, így a végestérfogat háló elemszáma is eltérő volt, konfigurációtól függően 1,1-1,3 millió cella.

6 SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA

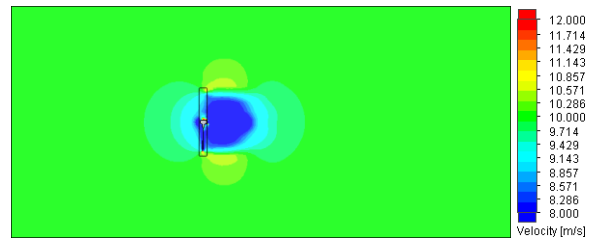
A következő ábra a szélkeréken ébredő nyomaték alakulását mutatja be, az iterációk függvényében.



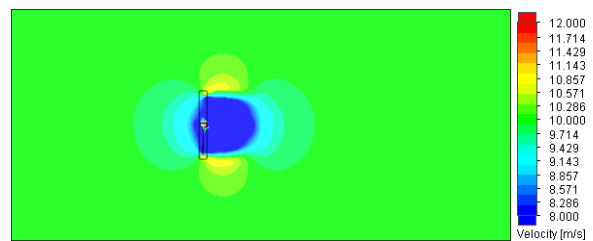
13. ábra. Nyomaték alakulása az iterációk függvényében

A grafikonon megfigyelhető, hogy a nyomaték egy ugrással indul, majd hirtelen csökken, ezt követően lassulva csökken és beáll egy adott értékre. Ennek a jellegnek két oka van. Az egyik, hogy az áramlásnak ki kellett alakulnia és állandósulnia kellett, a másik pedig a véges térfogat módszer matematikai háttere.

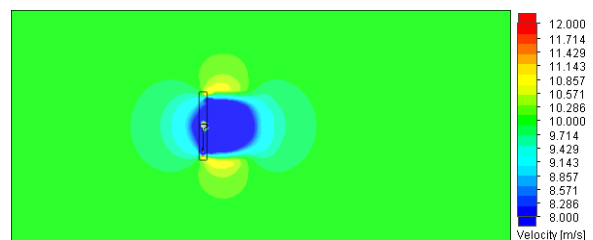
A szimuláció végén a következő áramlási képeket kaptuk a szélkerék középsíkjaiban:



14. ábra. Sebességmező a szélkerék középsíkjaiban $\beta=-5^\circ$

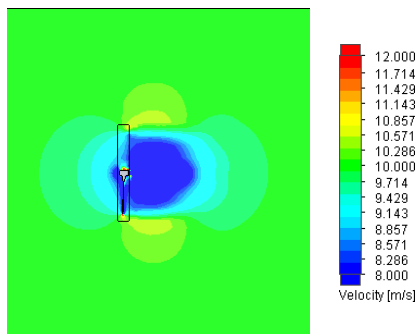


15. ábra. Sebességmező a szélkerék középsíkjaiban $\beta=0^\circ$

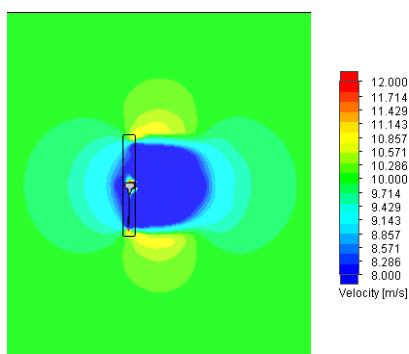


16. ábra. Sebességmező a szélkerék középsíkjaiban $\beta=5^\circ$

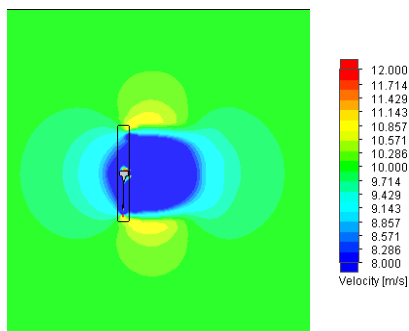
Az áramlási kép nagyított képe a következő ábrákon láthatók.



17. ábra. Sebességmező a szélkerék középsíkijában $\beta = -5^\circ$ (nagyított)

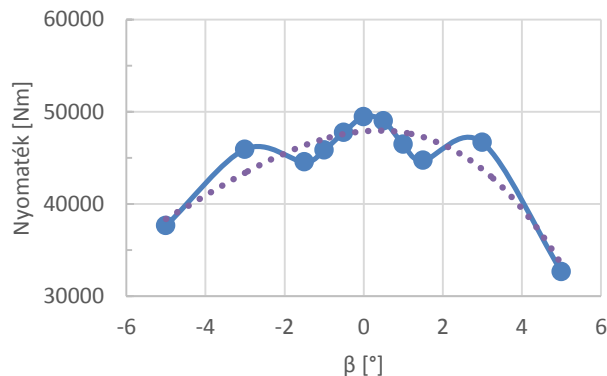


18. ábra. Sebességmező a szélkerék középsíkijában $\beta = 0^\circ$ (nagyított)



19. ábra. Sebességmező a szélkerék középsíkijában $\beta = 5^\circ$ (nagyított)

A szimulációk eredményeit az alábbi táblázat és diagram mutatja be.



20. ábra. Szimuláció eredményeinek grafikus ábrázolása

2. táblázat. Nyomatékok alakulása a szimuláció végén

Szög	-5°	-3°	-1,5°
Nyomaték [Nm]	37648	45935	44554
Szög	-1°	-0,5°	0°
Nyomaték [Nm]	45854	47776	49453
Szög	0,5°	1°	1,5°
Nyomaték [Nm]	49018	46462	44739
Szög	3°	5°	
Nyomaték [Nm]	46667	32682	

A diagramot megvizsgálva megállapítottuk, hogy a legalacsonyabb nyomatékértékek a két szélső szögértéken, a legmagasabbak a kiindulási állapoton jelentkeztek.

Jelen szimulációsorozattal meghatározható az eredményekből a $C_p(\lambda, \beta)$ függvény $\lambda = 6,2832$ esetre a vizsgált tartományban. Folytatva a szimulációkat a vizsgált geometriára előállítható a teljesítménytényező függvénye.

7 ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünkben röviden ismertettük a lapátszög-szabályzás elméleti háttérét és egy szimulációs folyamatot, amivel meghatározható a teljesítménytényező (C_p).

A nyomaték értékekből és a forgási sebességből meghatározható az a mechanikai teljesítmény, melyet a szélkerék végzett, és ebből a teljesítményből meghatározható C_p értéke is.

Szimulációink során a $\lambda = 6,2832$ -t több β szögre vizsgáltuk az áramlást. A szimulációk folytatásával kaphatunk egy eredmény mátrixot, amiből az adott geometriánkra $C_p(\lambda, \beta)$ függvénye meghatározható.

$C_p(\lambda, \beta)$ ismeretében a [4]-es és az [5]-ös forrásban ismertetett szabályzástechnikai módszerekkel a

szélerőművek már megépítésük előtt modellezhetők, így a szabályzástechnikai rendszer fejlesztése mellett, a telepítés helyére lehet optimalizálni őket.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] Global Wind Power Cumulative Capacity https://en.wikipedia.org/wiki/Wind_power#/media/File:Global_Wind_Power_Cumulative_Capacity.svg (2017.09.18.)
- [2] A Pitch és a Yaw Control <https://abm-website-assets.s3.amazonaws.com/pddnet.com/s3fs-public/legacyimages/NabtescoDiagram.jpg> (2017.10.12.)
- [3] Szélerőművek energiatermelési jellegörbéje a szélesebbesség függvényében [http://www.wind-power-program.com/Images/turbine_characteristics.htm/Typical%20power%20output%20\(500%20x%20330\).jpg](http://www.wind-power-program.com/Images/turbine_characteristics.htm/Typical%20power%20output%20(500%20x%20330).jpg) (2017.11.21.)
- [4] $C_p(\lambda, \beta)$ kép: G. Cao, K. M. Grigoriadis, Y. D. Nyanteh: LPV Control for the Full Region Operation of a Wind Turbine Integrated with Synchronous Generator, *The Scientific World Journal*, 2015. DOI: 10.1155/2015/638120, 2015, https://www.researchgate.net/publication/275049813_LPV_Control_for_the_Full_Region_Operation_of_a_Wind_Turbine_Integrated_with_Synchronous_Generator (2017.11.21.)
- [5] Varga Zs. Márton, Szélturbina modellezése 2013. <http://sirkan.iit.bme.hu/dokeos/courses/BMEVIII355/work/5196a5dc21063Szelturbina.pdf> (2017.10.08.)