

# 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].

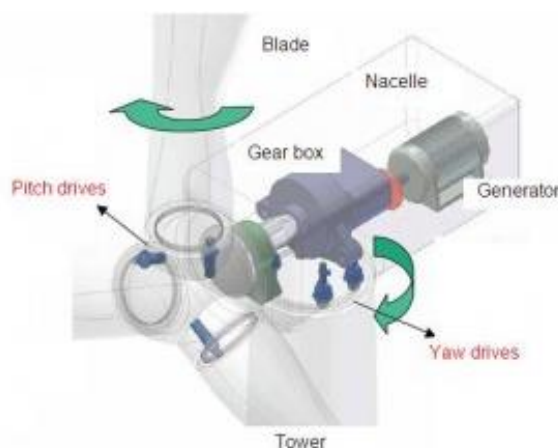
A technikai fejlődésnek köszönhetően a szélturbinák minden egysége fejlődött, köztük a szélerőművek lapátozási rendszere és annak a szabályása is. Cikkünkben a Pitch controllal azaz a lapátszög-szabályzással foglalkozunk.

### 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.

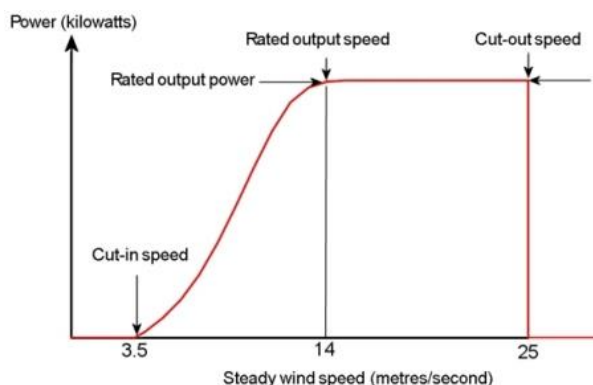
Napjainkban a szélerőművek jellemzően kétféle szabályzással vannak felszerelve, a Pitch és a Yaw controllal, melyeknek a működését a következő ábra szemlélteti.



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,

- $\rho$ , a sűrűség,
- $A$ , a szélkerék munkavégző keresztmetszete,
- $v$ , a szél sebessége,
- $C_p$ , a szélkerék teljesítménytényezője
- $\lambda$ , gyorsjáratú tényező
- $\beta$ , lapátszög-szabályzás szöge.

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

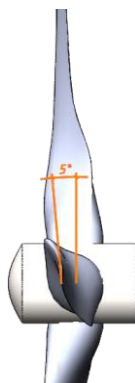
$\lambda$ , azaz a gyorsjáratú tényező azt mutatja meg, hogy a szélkerék legkülső pontjának sebessége hányszorosa a szabadáramlásban a szél sebességének. Kiszámítása a következő módon lehetséges:

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

Ahol,

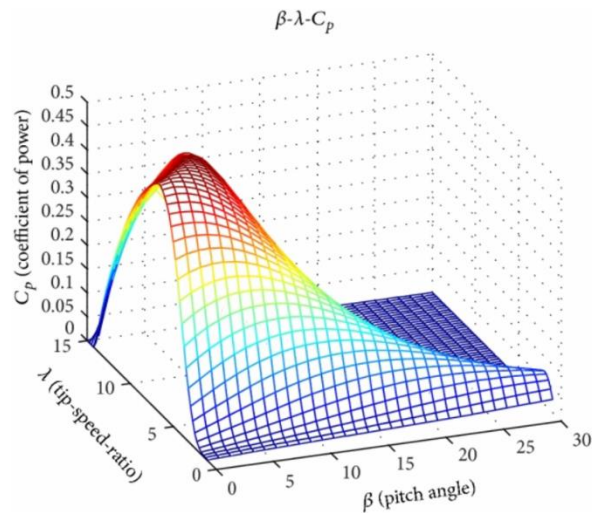
- $R$  a szélkerék sugara,
- $\omega$ , forgási sebesség,
- $v$ , szélsébsége a szabadáramlásban.

A  $\beta$ , azaz a lapátszög-szabályzás szögértékét a következő ábra szemlélteti.



3. ábra.  $\beta$  szög a CAD modellünkben

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

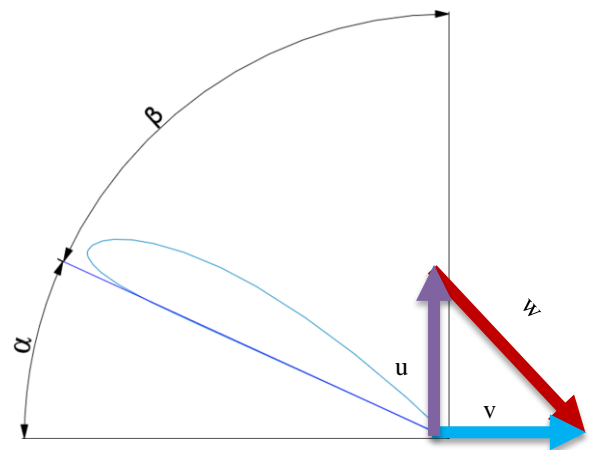


4. ábra.  $C_p(\lambda, \beta)$  jelleggörbéje [4]

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 ( $\omega$ ) ne változzon és biztosítsa az egyenletes energiatermelést.

Amennyiben a forgási sebesség nem változik, a szélkerék szögsebessége ( $\omega$ ) és a gyorsjáratú tényező ( $\lambda$ ) is állandó marad, a forgásból származó teljesítmény sem változik.

A lapátmozgás egyik metszete mellett kialakuló sebességháromszög a következő ábrán látható, ahol  $\alpha$ -val az állásszög-,  $\beta$ -val a lapátszög-szabályzás szögértékét jelöltük.



5. ábra. Sebességháromszög a szélkerék lapátmozgásán

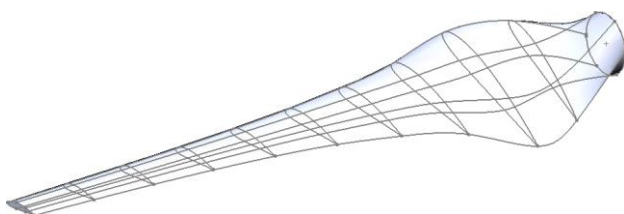
### 3 GEOMETRIÁK ELŐÁLLÍTÁSA

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

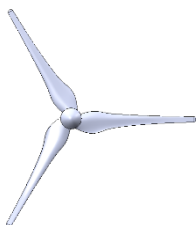
Metszet	Távolság [m]	Húrhossz [mm]	Profil csavarodás	Profil
11.	15	591	0,6°	NACA 4415
10.	13,5	655	1,2°	
9.	12	735	2,1°	
8.	10,5	837	3,1°	
7.	9	971	4,5°	
6.	7,5	1153	6,5°	
5.	6	1416	9,4°	
4.	4,5	1818	14°	
3.	3	2469	22,5°	
2.	1,5	3325	41,2°	
1.	0	D1100	41,2°	Kör

Az elkészített lapát az alábbi volt.

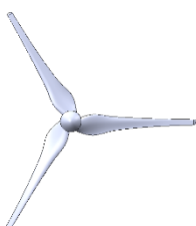


6. ábra. NACA 4415 számprofilból készített lapát

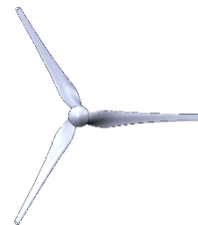
A vizsgálatokhoz használt kiindulási állapotot 0°-nak neveztük el, és hozzá képest a lapátokat a forgási tengelyük körül elforgattuk -5°, -3°, -1,5°, -1°, -0,5°, 0,5°, 1°, 1,5° 3° és 5°-kal. Az így kapott tizenegy konfigurációból három a következő ábrán látható.



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

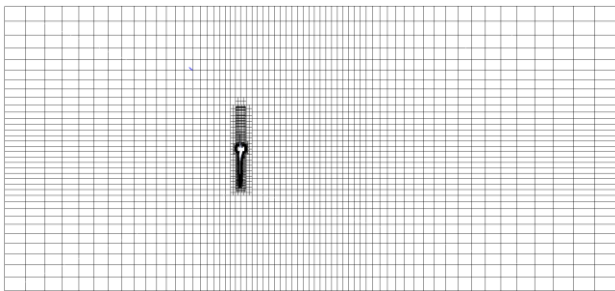
A turbulencia leírásához k- $\epsilon$  modellt használtunk. A szélkeréken ébredő nyomatékot célként definiáltuk, így ezt konvergenciafeltételként írtuk elő.

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

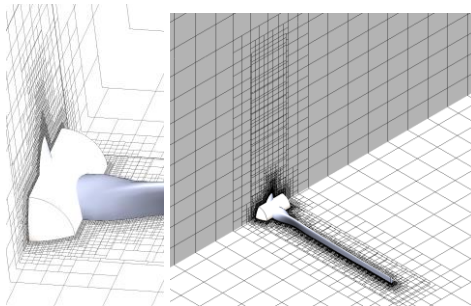
- a szélkerék forgási tengelyére nézve a rajta ébredő nyomaték konvergálnia kellett,
- minimum 1500-at kellett iterálnia,
- a szimulációnak minimum 2,5 (fizikai) másodpercig kellett futnia.

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).

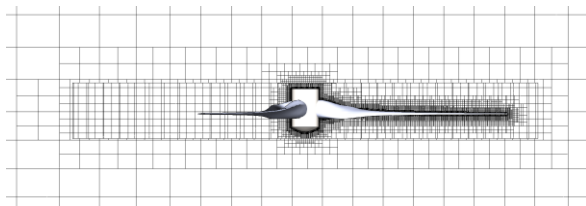
A tér felbontására téglatest hálót készítettünk, amit a test közelében határréteg hálózással sűrítettünk. Az egyik konfigurációhoz kapott véges térfogat háló a következő ábrán látható.



10. ábra. Az áramlási tér véges térfogat hálózása



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

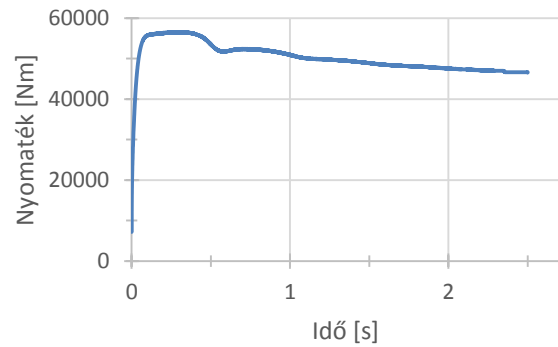


12. ábra. Kiindulási (0°) állapot hálózása (felül nézet sík)

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

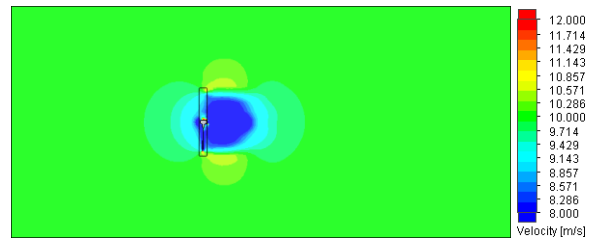
A következő ábra a szélkeréken ébredő nyomaték alakulását mutatja be, az iterációk függvényében.



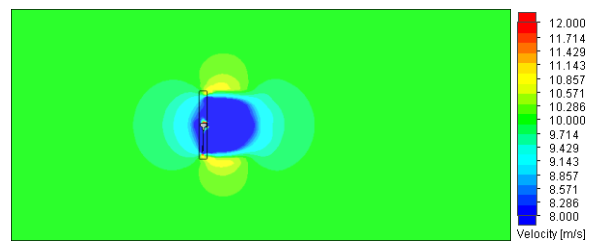
13. ábra. Nyomaték alakulása az iterációk függvényében

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.

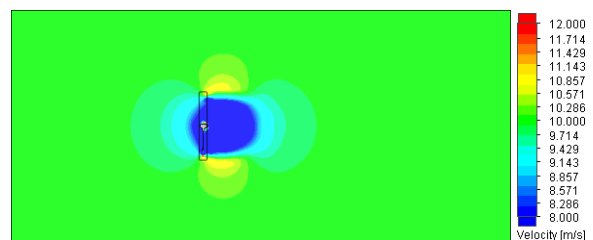
A szimuláció végén a következő áramlási képeket kaptuk a szélkerék középsíkjaiban:



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

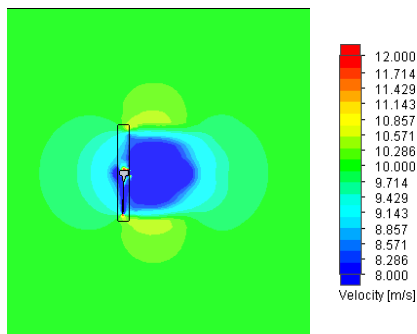


15. ábra. Sebességmező a szélkerék középsíkjaiban  $\beta=0^\circ$

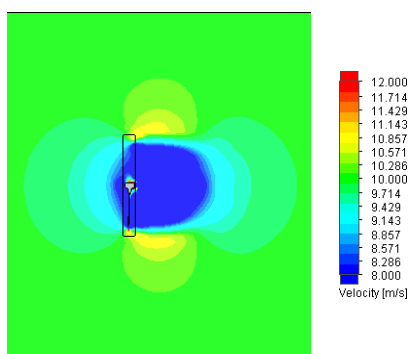


16. ábra. Sebességmező a szélkerék középsíkjaiban  $\beta=5^\circ$

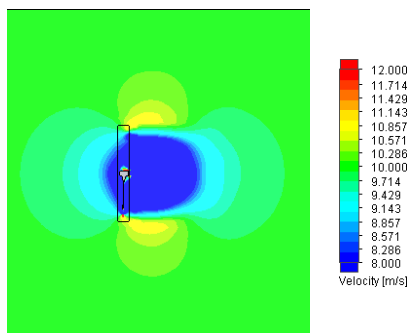
Az áramlási kép nagyított képe a következő ábrákon láthatók.



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

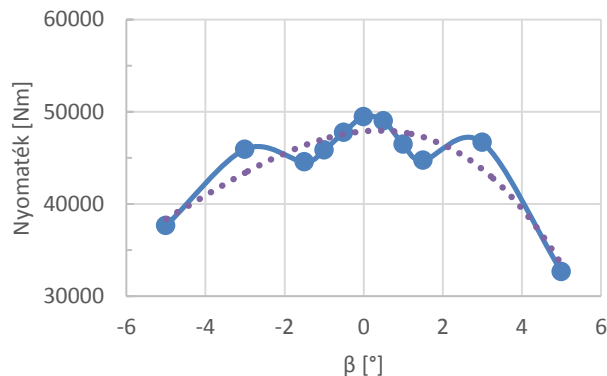


18. ábra. Sebességmező a szélkerék középsíkijában  $\beta = 0^\circ$  (nagyított)



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

<b>Szög</b>	<b>-5°</b>	<b>-3°</b>	<b>-1,5°</b>
<b>Nyomaték [Nm]</b>	37648	45935	44554
<b>Szög</b>	<b>-1°</b>	<b>-0,5°</b>	<b>0°</b>
<b>Nyomaték [Nm]</b>	45854	47776	49453
<b>Szög</b>	<b>0,5°</b>	<b>1°</b>	<b>1,5°</b>
<b>Nyomaték [Nm]</b>	49018	46462	44739
<b>Szög</b>	<b>3°</b>	<b>5°</b>	
<b>Nyomaték [Nm]</b>	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  $\beta$  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](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 szélesség 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](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/BMEV8355/work/5196a5dc21063Szelturbina.pdf> (2017.10.08.)