



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS
TÉZISFÜZETE

HETYEI CSABA

Szélkerekek egymásra hatásának áramlástan modellézése, optimalizálása

Témavezető: Dr. habil Szlivka Ferenc

**BIZTONSÁGTUDOMÁNYI
DOKTORI ISKOLA**

Budapest, 2022. 09. 21.

Tartalomjegyzék

1	Summary	3
2	A kutatás előzményei	4
3	Célkitűzések	5
4	Vizsgálati módszerek	6
5	Új tudományos eredmények.....	14
	Tézis 1.	14
	Tézis 2.	14
	Tézis 3.	15
	Tézis 4.	16
	Tézis 5.	16
6	Az eredmények hasznosítási lehetősége	17
7	Irodalmi hivatkozások listája	17
	7.1 A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények	19
	7.2 További tudományos közlemények	19

1 Summary

I divided my dissertation into three parts. In the first, I was doing literature research, I reviewed the renewable energy sources, highlighting wind energy. At the beginning of this chapter, I described the historical background of wind energy from windmills to wind turbines. Then, I was presenting the different types of wind turbines, where one was the Counter-Rotating Dual-Rotor Wind Turbines (CO-DRWT) which I used for my research. Next, I was introducing wind energy utilization in the urbanized region. At the end of the first chapter, I presented the theoretical background of energy utilization.

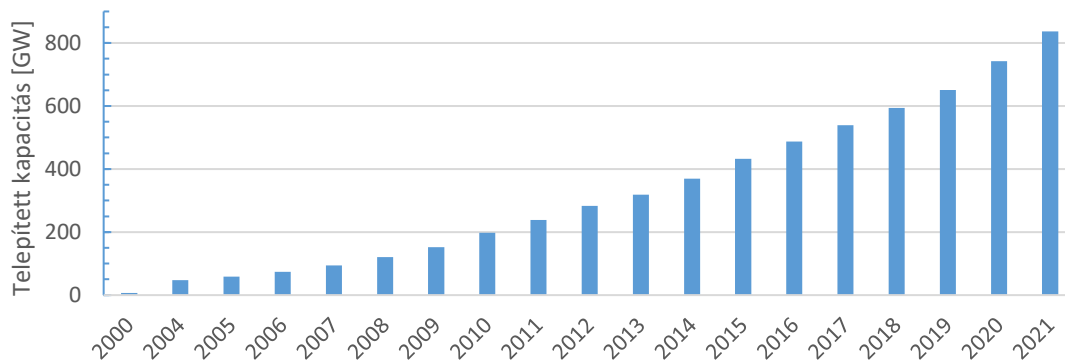
In the second chapter, I was explaining shortly the theoretical background of the Computational Fluid Dynamics (CFD), starting with the governing equations (continuity, Navier-Stokes, and the energy conservation), next, I was presenting turbulence and the flow field near the walls and their models in CFD. After the brief fluid dynamics introduction, I was continuing with the finite volume method and its mesh generations, and the SIMPLE (Semi-Implicit Method for Pressure-Linked Equation) algorithm, which is one of the solving algorithms for the governing equations. Then I was shortly present the rotating region types in CFD and the two ones, which I used. By closing the chapter, I described the errors and uncertainties in the CFD simulations.

In the third and final chapter, I presented my simulations with different CO-DRWTs. I introduced a measurement with the same CO-DRWT geometry. For my studies, I was using the same boundary conditions which was used for the measurement, therefore I was able to use it for comparison. With my simulations, I analysed the CO-DRWT with different axial and radial gaps and with different rotor sizes. As a result, I was able to plot the power coefficient of a CO-DRWT depending by the rotors' layout and sizes. For the simulation, which was made with the same rotor size, I create a surface for the estimating the optimum. At the end of the chapter, I compared my results with the measurement.

2 A kutatás előzményei

Napjaink egyre nagyobb energiaigénye, valamint a nukleáris és egyéb természeti katasztrófáktól való félelem következtében a megújuló energiaforrások mindinkább előtérbe kerültek. Az országok energiamixében megjelent a zöldenergia. A területi és gazdasági lehetőségek függvényében a megújuló erőforrások egy része alaperőműként működik, másik részük valamilyen támogató-, kiegészítő erőműként üzemel. Az energetikai biztonság érdekében a hagyományos és megújuló erőforrásokra támaszkodó erőműveknek összhangban kell működniük, technológiailag és gazdaságilag elvárható optimális színvonalon. Doktori kutatásomban a megújuló energiaforrások közül a szélenergiával foglalkoztam és azon belül is a vízszintes tengelyű ikerszél turbinákkal.

A szélenergia hasznosítása nem újkeletű. Napjaink szélenergia hasznosításának egyik legemblematikusabb eszköze a háromlapátos vízszintes tengelyű szél turbina, mely a 70-es évek olajválsága után kezdett elterjedni [1]. A világon telepített szél erőművek teljesítménye 2000-től 2021-ig a következő ábrán látható.



1. ábra. Telepített turbinák teljesítménye 2000-től 2021-ig [2 - 6]

A telepített turbinák számával együtt a turbinák változatossága is nőtt, a városokban kezdenek elterjedni a kis teljesítményű turbinák, így növelve a lakott régiók energetikai biztonságát. Az eltérő telepítési módokon kívül, az utóbbi évtizedekben megjelentek a nemhagyományos szél turbinák is, melyekre három példa a 2. ábrán látható.



2. ábra. Keresztengelyű szélturbina [7], Archimédeszi csavarturbina [8], több rotoros szélturbina [9]

Fentiekén kívül a nemhagyományos szélturbináknak számos egyéb változata van. Kutatásom során a harmadik képen látható turbinatípussal, az ellenirányú ikerszélturbinákkal (Counter Rotating Dual Rotor Wind Turbine, CO-DRWT) foglalkoztam. A többrotoros turbinák közül azért esett a választásom a CO-DRWT-re, mert energiatermelése kedvezőbb, mint az egyrotorosoké [10]. Ezen felül az egymással ellentétes irányba forgó ikerturbinák teljesítménytényezője nagyobb, mint az azonos irányba forgóké [11].

3 Célkitűzések

A turbinák hatásfokának meghatározása a teljesítménytényező (c_p) segítségével történik, mely a gyorsjáratú tényezőtől (λ) függ. A következő egyenletek az egyrotoros turbina (SRWT) teljesítménytényezőjének, illetve a rotor gyorsjáratú tényezőjének kiszámítási módját ismertetik [12].

$$c_p = \frac{P_{rotor}}{P_{szél}} = \frac{T \cdot \omega}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot F \cdot v_{\infty}^3} \quad 2.1$$

$$\lambda = \frac{r \cdot \omega}{v_{\infty}} \quad 2.2$$

Az egyenletekben c_p , a teljesítménytényező, T , a turbina lapátjain ébredő nyomaték, ω , a turbina szögsebessége, ρ , az áramló közeg sűrűsége, F , a turbina lapátjai által végigsöpört felület és v_{∞} , az áramló közeg sebessége a szabadáramlásban, λ , a gyorsjáratú tényező, r , a turbina sugara, és ω , a turbina szögsebessége.

Ikerturbinák esetén a 2.1-es egyenlet a következők szerint változik.

$$c_p = \frac{P_{rotorok}}{P_{szél}} = \frac{T_1 \cdot \omega_1 + T_2 \cdot \omega_2}{\frac{1}{2} \cdot \rho \cdot F \cdot v_\infty^3} = \frac{P_{rotor\ 1} + P_{rotor\ 2}}{P_{szél}} = \frac{P_{rotor\ 1}}{P_{szél}} + \frac{P_{rotor\ 2}}{P_{szél}} \quad 2.3$$

$$= c_{p1} + c_{p2}$$

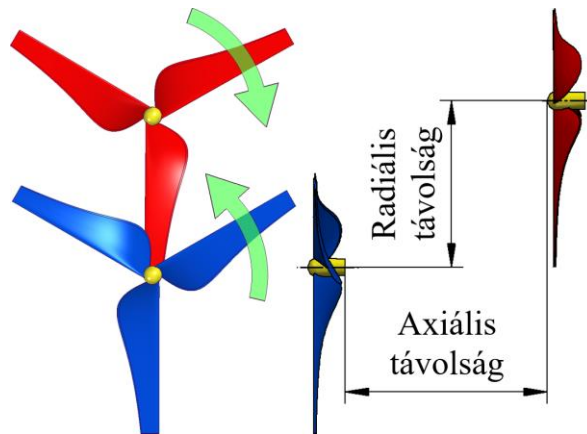
Az előző egyenletben az 1-es alsóindex az első rotorra, a 2-es alsóindex a második rotorra vonatkozik.

Numerikus áramlástanai szimulációk segítségével a turbinák lapátjain ébredő nyomaték, azok forgási sebessége lekérdezhető mennyiség. Az áramlási térbe belépő közeg sűrűsége, és sebessége egy-egy peremfeltétel, míg a turbinák által végigsöpört felület a szimulációhoz használt geometrián lemérhető.

Az egyrotoros turbina (SRWT) teljesítménytényezőjének meghatározásával elsőként Betz foglalkozott 1919-ben. Az általa készített idealizált modell szerint az SRWT teljesítménytényezője $c_p = 16/27 \approx 0,59259$ [12]. Betz óta számos modell készült, ezek közül talán a legismertebb a GGS modell, mely szerint az SRWT teljesítménytényezője legfeljebb $c_p = 0,30113$ lehet [13]. A mérések és a numerikus áramlástanai szimulációk alapján a szélturbinák hatásfoka a valóságban a GGS és a Betz modell között helyezkedik el [14]. Ikerturbinák esetén a teljesítménytényező a két rotor teljesítménytényezőjének összege.

4 Vizsgálati módszerek

Kutatásomhoz egy végestérfogat alapú numerikus hő- és áramlástanai szimulációs szoftvert használtam, mellyel a 3. ábrán látható ikerturbinát vizsgáltam. Kutatásom során az ikerturbina hátsó rotorjának méretét, axiális és radiális helyzetét változtattam. Az axiális és radiális mozgatásnak köszönhetően különféle elrendezéseket vizsgáltam, míg a hátsó rotor méretének változtatásával az összteljesítménytényező váltázását figyeltem meg.

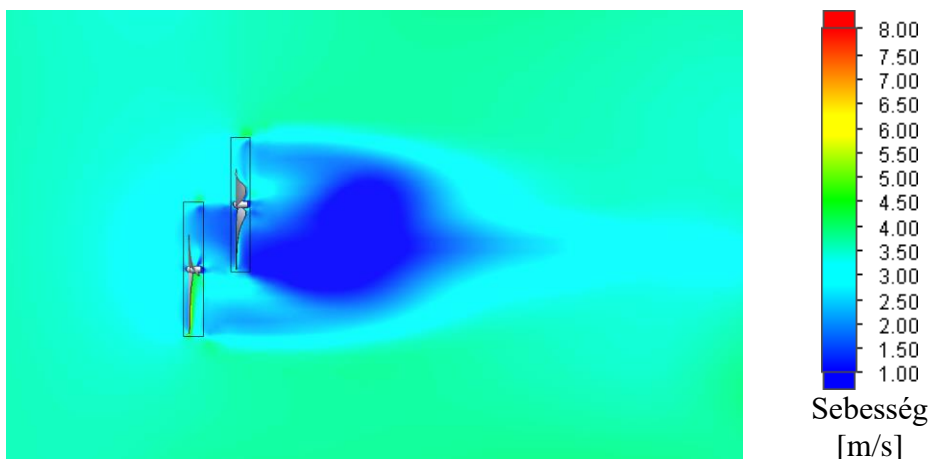


3. ábra. Kutatásomhoz használt ikerturbina geometriája (forgási irányok és a radiális és az axiális távolság jelölésével)

Rendelkezésemre állt egy validáló mérés, melyet dr. habil. Szlivka Ferenc és mérőtársai végeztek 2011-ben [15], így a szimulált eredményeket mért értékekkel össze tudtam hasonlítani.

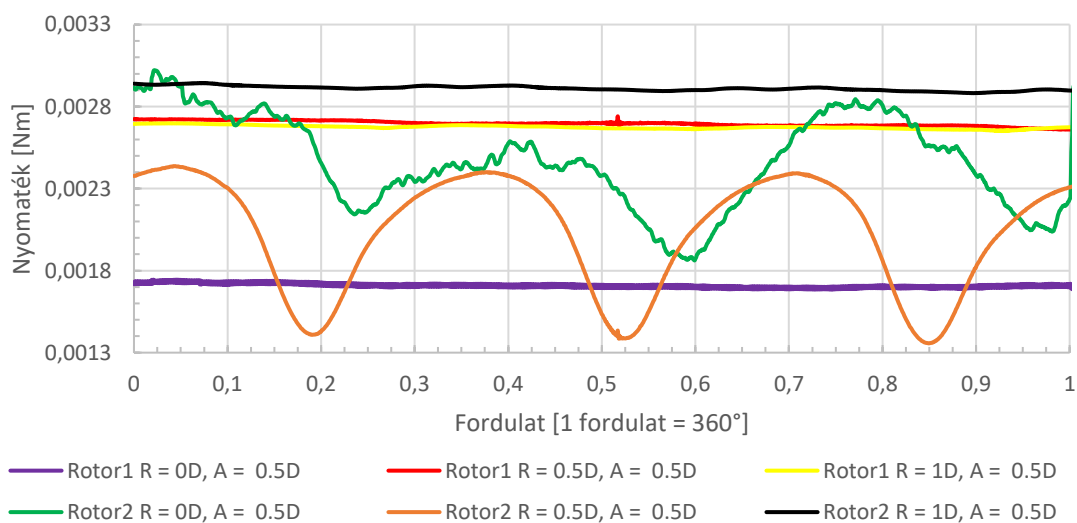
Szimulációimhoz a mérési körülményeket reprodukáltam. A turbinák $\lambda = 4$ gyorsjáratú tényezővel forogtak azonos és eltérő átmérők esetén is. A környezeti nyomás 1 atm, azaz 101 325 Pa, az áramló közeg a szimulációs szoftver anyagadatbázisában lévő levegő nevű közeg volt. Az áramló közeg sebessége szabadáramlásban $v_\infty = 3,79 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ volt. Szimulációimhoz Simcenter FLOEFD-t használtam $k - \varepsilon$ turbulenciamodellel, melynek eredményeit egyes esetekben összehasonlítottam Ansys CFX-ben futtatott szimulációval, ahol SST turbulenciamodellt alkalmaztam. Szimulációim során a validáló mérés geometriáját használtam. A pozíciókat mind axiális (A), mind radiális irányban (R) az első rotor átmérőjével ($D = D_1 = 200 \text{ mm}$) dimenziótlanítottam. A mértékegységtelenített távolságokon kívül a méretarányt is változtattam. A hátsó rotor mérete a kiindulási méret ($M = 1$ méretarány, $D_2 = 200 \text{ mm}$) fele ($M = 0,5$ méretarány, $D_{2_M=0,5} = 100 \text{ mm}$) és kétszerese ($M = 2$ méretarány, $D_{2_M=2} = 400 \text{ mm}$) között mozgott.

A szimulációkat lefuttatva, egy jellemző áramlási kép alakult ki, mely a 4. ábrán látható. Megfigyelhető, hogy az első turbina a zavartalan áramlásból kinyeri a levegőben rejlő kinetikus energiát, és lassítja azt. A második turbina a rendelkezésére álló zavart áramlást tovább lassítva hasznosítja az áramlásban lévő energiát. A legnagyobb sebességek a lapátvégeken fellépő örvényleválásoknál voltak megfigyelhetők (tranzien szimulációk esetén). Az ábrán látható konfiguráció $A = 0,5D$, $R = 0,5D$, ahol az axiális eltolás és a radiális eltolás is fél-fél átmérőnyi, azaz 100-100 mm.



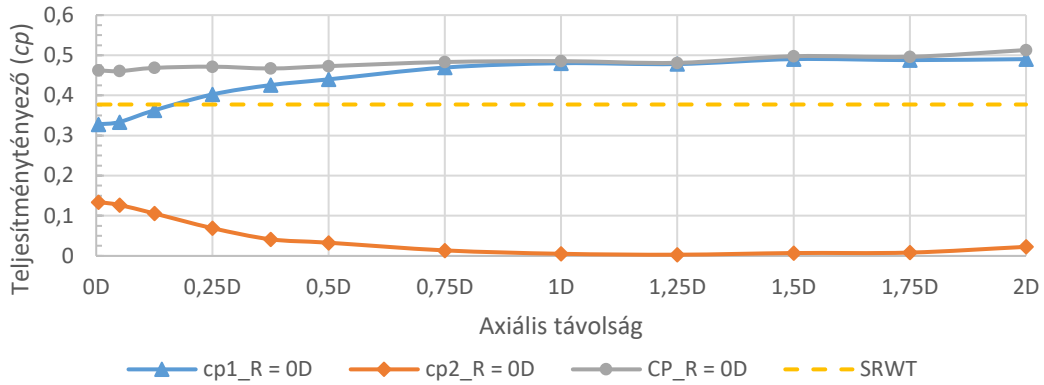
4. ábra. $A = 0,5D$ és $R = 0,5D$ eltolások esetén, a turbinák környezetében kialakuló áramlási tér (időfüggő szimuláció)

Állandósult esetben a szimuláció végeredménye egyetlen nyomatékérték, melyre a turbulencia hatása modellezve volt. Időfüggő esetben a turbulenciát nem modelleztem, hanem szimuláltam a turbulencia modellnek megfelelően. A tranziens szimuláció eredménye egy adatsor volt, mely a vizsgált időpillanatokban tartalmazta a rotorokon ébredő nyomatékértékeket. Az 5. ábrán egy fordulat alatt ható nyomatékok értékei láthatóak $R = 0D$, $R = 0,5D$, $R = 1D$ és $A = 0,5D$ esetekben.

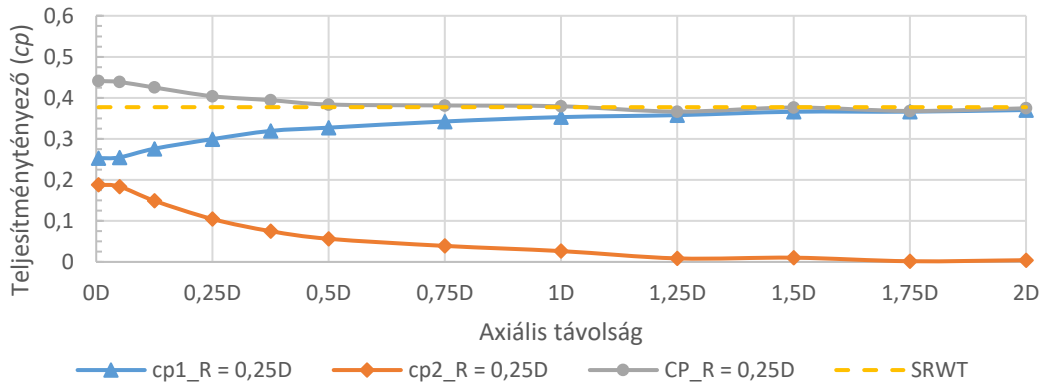


5. ábra. Nyomaték változása a turbinalapátokon a forgásszög függvényében

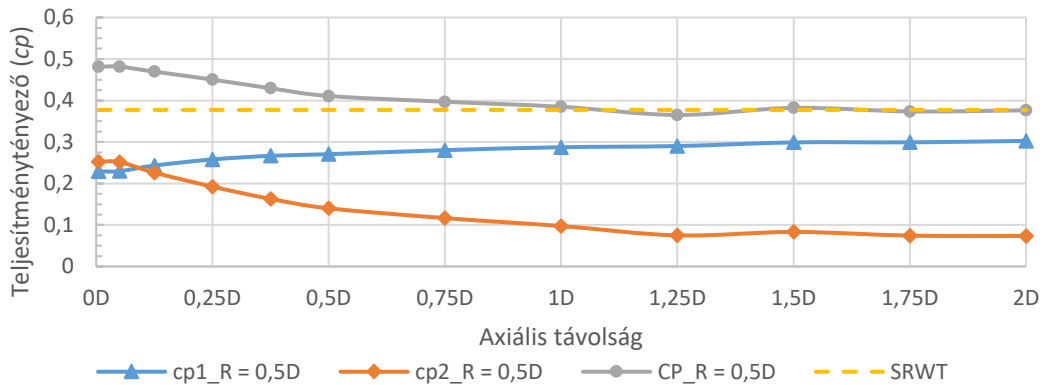
A 6 - 10. ábra az ikerturbina konfigurációk rotorjainak teljesítménytényezőit (c_{p1} és c_{p2}), az ikerturbina összteljesítménytényezőjét (c_p), illetve egy egyrotoros turbina (SRWT) teljesítménytényezőjét mutatja.



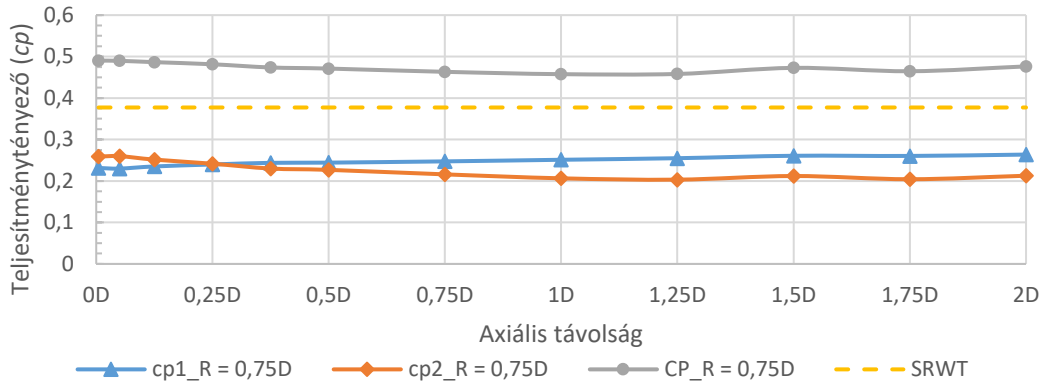
6. ábra. $R = 0D$ radiális távolság esetén az ikerturbina első és hátsó rotorjainak teljesítménytényezői, az ikerturbina összteljesítménytényezője és egy egyrotoros turbina teljesítménytényezője



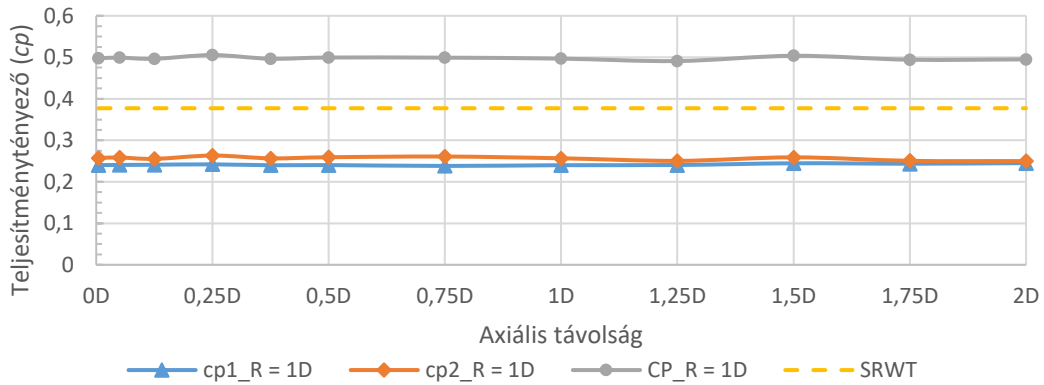
7. ábra. $R = 0,25D$ radiális távolság esetén az ikerturbina első és hátsó rotorjainak teljesítménytényezői, az ikerturbina összteljesítménytényezője és egy egyrotoros turbina teljesítménytényezője



8. ábra. $R = 0,5D$ radiális távolság esetén az ikerturbina első és hátsó rotorjainak teljesítménytényezői, az ikerturbina összteljesítménytényezője és egy egyrotoros turbina teljesítménytényezője



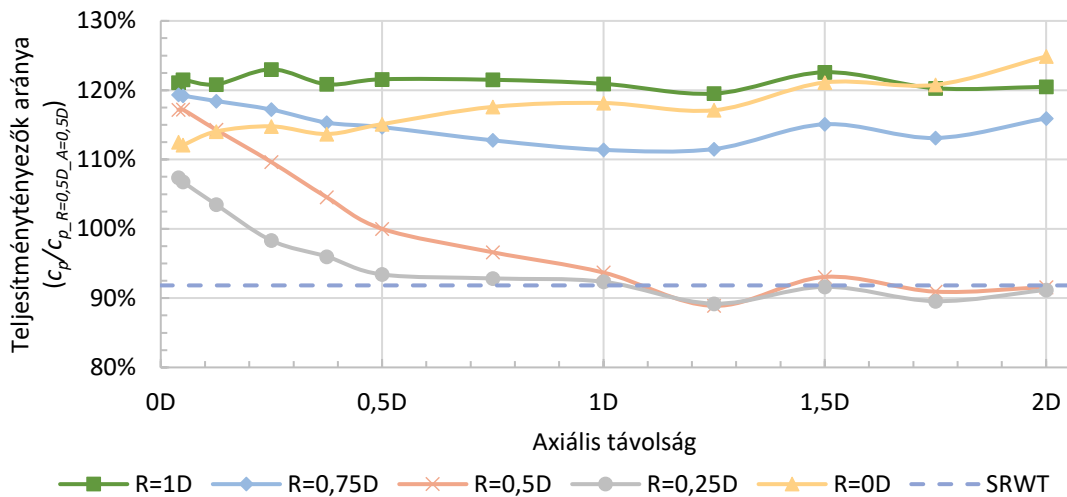
9. ábra. $R = 0,75D$ radiális távolság esetén az ikerturbina első és hátsó rotorjainak teljesítménytényezői, az ikerturbina összteljesítménytényezője és egy egyrotoros turbina teljesítménytényezője



10. ábra. $R = 1D$ radiális távolság esetén az ikerturbina első és hátsó rotorjainak teljesítménytényezői, az ikerturbina összteljesítménytényezője és egy egyrotoros turbina teljesítménytényezője

A vizsgált ikerturbina elrendezések teljesítménytényezőinek könnyebb összehasonlítása érdekében, az egyik mérési pozíciót ($A = 0,5D$, $R = 0,5D$) választottam viszonyítási pontnak. A kiválasztott pozíciónál a szimulált teljesítménytényező állandósult állapotban Mixing Plane technikával $c_p = 0,410819$ volt. A 11. ábrán a vizsgált pozíciók összteljesítménytényezői láthatók, a kiválasztott ponthoz viszonyítva, százalékos formában.

Megállapítható mind időfüggő (5. ábra), mind állandósult állapotú szimulációk alapján (6 - 10. ábra), hogy a két turbina egymásra hatása nem szüntethető meg, illetve az ikerturbinák összteljesítménytényezői (c_p) az axiális és a radiális távolság változtatásával befolyásolhatóak (11. ábra). Összehasonlítva az egyrotoros turbina (SRWT) teljesítménytényezőjével, az ikerturbina c_p -je jellemzően nagyobb, viszont egyes pontokban az SRWT teljesítménytényezőjével megegyező vagy akár kisebb is lehet.

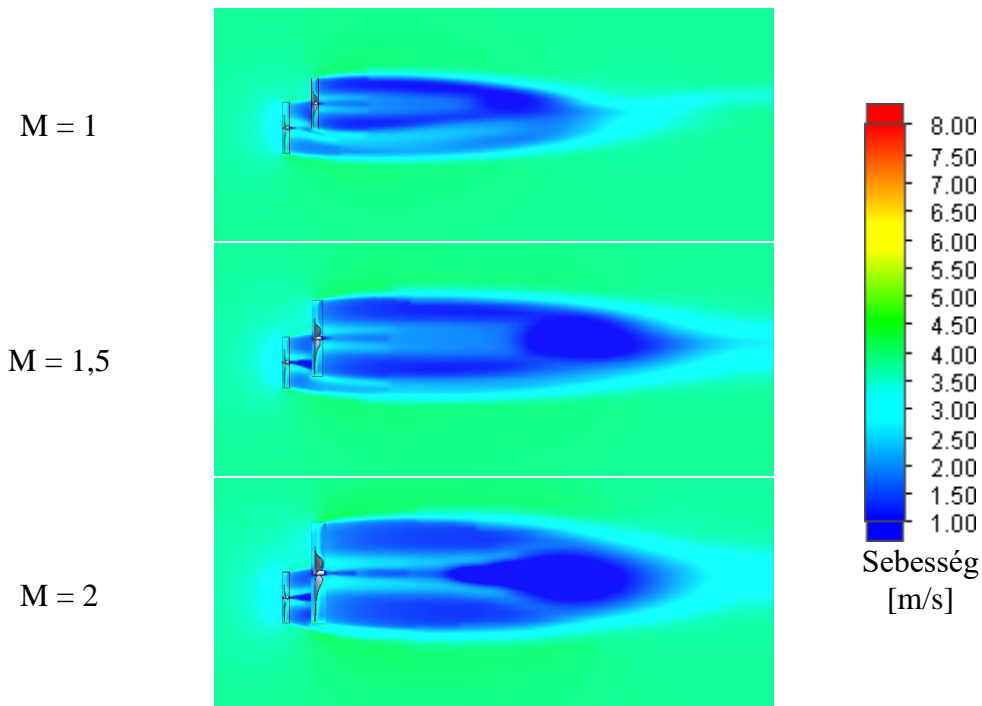


11. ábra. Radiális és axiális eltolás hatása a teljesítménytényezőre az $A = 0,5D$ és $R = 0,5D$ esethez viszonyítva

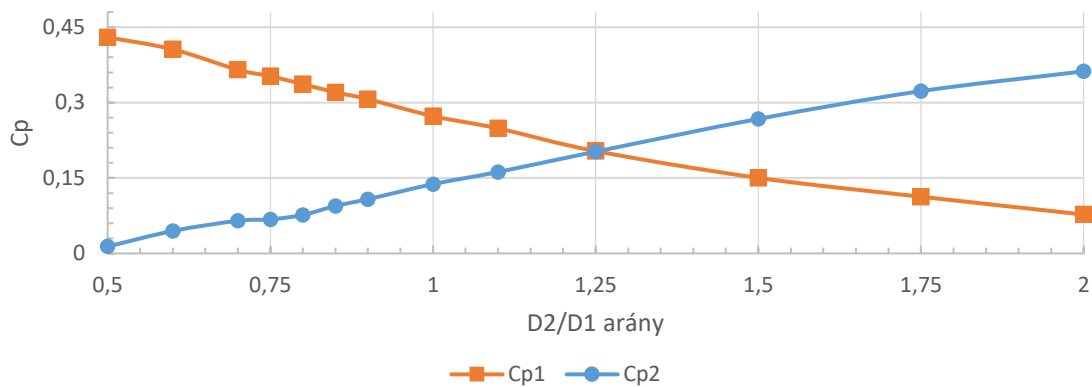
Kutatásom folytatásaként megvizsgáltam, hogy a hátsó rotor méretének változása, hogyan befolyásolja az ikerturbina összteljesítménytényezőjét. Ezekhez a szimulációkhoz a hátsó rotor méretét a kiindulási méret fele ($M = 0,5$) és kétszerese ($M = 2$) között változtattam. A lefuttatott szimulációk közül néhány eset a 12. ábrán látható. Megfigyelhetőek eltérések az azonos átmérővel végzett szimulációkhoz (4. ábra) képest. Ilyen eltérés a második turbina nyoma, továbbá az, hogy a 4. ábrán egy időfüggő szimuláció, míg a 12. ábrán állandósult állapotú szimulációk láthatóak.

Az azonos átmérővel végzett szimulációkhoz hasonlóan, a két rotoron ébredő nyomatékából meghatároztam a rotorok teljesítménytényezőjét és az ikerturbina összteljesítménytényezőjét (C_p). A méretarány függvényében a két turbina teljesítménytényezőjét a 13. ábra mutatja, míg az összteljesítménytényezőt százalékos formában a 14. ábra. A turbinák összteljesítménytényezőjének százalékos összehasonlításához az azonos átmérőjű turbinákat, azaz az $M = 1$ méretarányt vettem alapul.

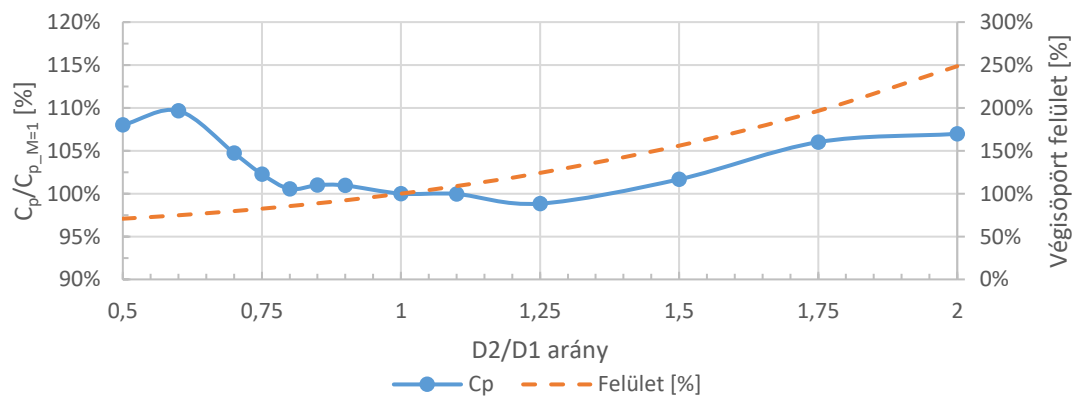
Eltérő átmérővel végzett szimulációim alapján megállapítható, hogy az ikerturbina rotorjai ezekben az esetekben is hatnak egymásra (13. ábra). Az ikerturbina összteljesítménytényezőjére az eltérő méretarányok kedvezően hatnak, míg a közel azonos méretarányok hatása csekély, illetve egyes pozíciókban a kiindulási teljesítménytényezőt ($M = 1,25$) még ronthatja is az átmérők változtatása.



12. ábra. $A = 0,5D$, $R = 0,5D$, $M = 1$, $M = 1,5$ és $M = 2$ méretarány esetén a turbinák környezetében kialakuló áramlási tér állandósult állapotú szimuláció esetén

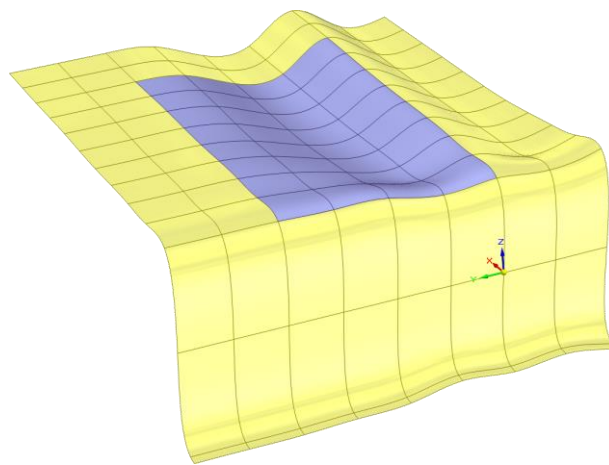


13. ábra. Az első és a hátsó rotorok teljesítménytényezői (c_{p1} és c_{p2})



14. ábra. Az ikerturbina teljesítménytényezője (folytonos vonal) a lapátok által végigsöpört felület (szaggatott vonal) változása az $M = 1$ arányhoz viszonyítva

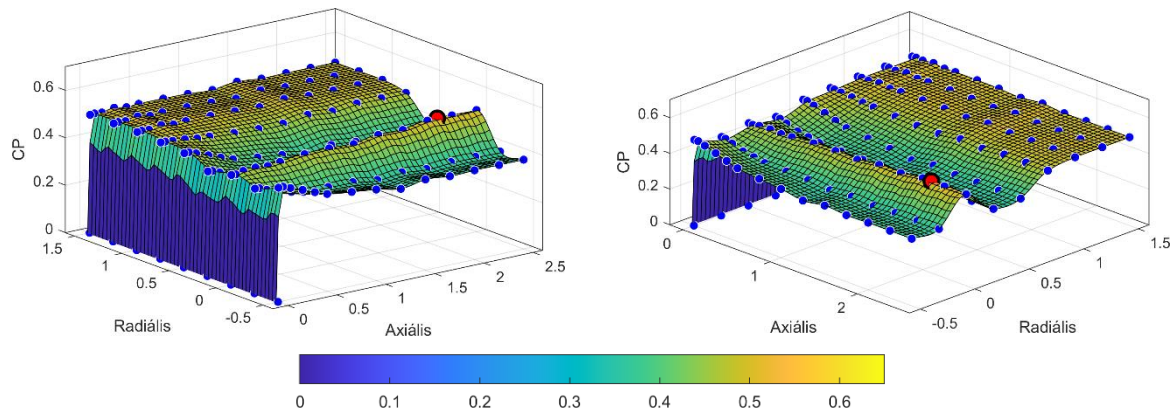
Doktori kutatásom zárásaként az azonos átmérővel végzett szimulációk összteljesítménytényezőire egy felületet illeszttem, melyet mind axiálisan, mind radiálisan megnöveltem. Axiális irányba $A = 2,5D$ távolságig az $A = 2D$ c_p értékeit, míg radiálisan $R = 1,5D$ távolságig az $R = 1D$ teljesítménytényezőinek értékeit másoltam tovább. Axiális irányba a negatív tartományba az $A = -0,05D$ távolságig a teljesítménytényezőket úgy tükröztem, hogy a c_p -k a szimulált értékek negatív értékei legyenek. Az $R = -0,5D$ távolságig az eredményeket azonos előjellel tükröztem. A 15. ábrán az optimalizációhoz létrehozott felület látható. Sárga színnel a feltételezésekkel létrehozott felületrész, míg lilával az eredeti szimulált pontokra illesztett felület látható.



15. ábra. Eredeti és a feltételezett felület köbös spline interpolációval (perspektív megjelenítés)

Az előzetesen leírt pontokra lineáris, poly33, poly55 és köbös spline interpolációval egy-egy felületet illeszttem. A négy különböző interpoláció közül a köbös spline interpolációt választottam, mivel az így létrehozott felület a referenciapontokra illeszkedik. A köbös spline interpoláció alapján optimumnak az $R = 0D$ radiális és $A = 2,1D$ axiális pozíciót választottam, ahol $c_p = 0,5140$.

Köbös spline interpoláció esetén a 16. ábrán látható felületet kaptam. Az ábrán a fenti optimum pozícióját fekete szegélyű piros körrel kiemelve jelöltem.



16. ábra. Szimulált és feltételezett c_p -kre illesztett felület cubicinterp interpolációval és a legnagyobb érték jelölésével

5 Új tudományos eredmények

Tézis 1.

Bizonyítottam, hogy disszertációmban bemutatott ellenirányban forgó ikerturbina (CO-DRWT) geometriájával, $\lambda = 4$ gyorsjáratú tényezővel és a validáló méréshez azonos áramlási peremfeltételek esetén köbös spline illesztéssel relatív kis tartományon belül (axiálisan 0,005D-től 2,5D-ig, míg radiálisan -0,5D-től 1,5D-ig), **vannak olyan ikerturbina elrendezések, melyek az egyrotoros turbina teljesítménytényezőjénél kedvezőbbek és vannak olyanok, amelyek energetikailag kedvezőtlenebbek** (11 - 16. ábra). Kutatásomhoz használt geometriával és peremfeltételekkel, a vizsgált tartományon belül az ikerturbina összteljesítménytényezője $c_{p_min} = 0,3535$ és $c_{p_max} = 0,5140$ között változott, mely ugyanebből a geometriából készített egyrotoros turbina (SRWT) teljesítménytényezőjének 94% és 136%-a.

Kapcsolódó publikáció: [P1]

Tézis 2.

A disszertációmban bemutatott ellenirányban forgó ikerturbínával és $\lambda = 4$ gyorsjáratú tényezővel, relatív kicsi axiális távolság esetén (0,005D-től 2D távolságig) **az ikerturbínák egymásra hatása megfigyelhető és nem szüntethető meg az $R = 0D$ és az $R = 1D$ radiális tartományon belül**. Állandósult állapotú szimulációk alapján (6 - 10. ábra) az $R = 0D - 1D$ tartományban a két rotor teljesítménytényezője (c_{p1} és c_{p2}) az axiális távolság változtatásával változik. $R = 1D$, azaz egy átmérőnyi radiális távolság esetén a két rotor teljesítménytényezője közel azonos a vizsgálati tartományban, míg ennél kisebb radiális távolságok esetén ($R = 0D$, $R = 0,25D$, $R = 0,5D$) az első rotor teljesítménytényezője az axiális távolság növelésével nő, míg a hátsó rotoré csökken.

Időfüggő szimulációk alapján fél átmérőnyi axiális távolságban, azaz $A = 0,5D$ távolságnál, ha a turbinák közötti radiális távolság zérus ($R = 0D$), a második rotoron ébredő nyomaték és az abból számított teljesítmény egy periodikusan változó érték, melyet a turbulencia nagy mértékben befolyásol. A radiális távolság növelésével a második rotoron az első turbina hatása csökken, a lapátokon ébredő nyomaték szinusz függvényhez hasonló, periodikus érték, melyen a turbulencia hatása nem figyelhető meg. Egy átmérőnyi sugárirányú eltolás esetén ($R = 1D$), az első rotor hatása a másodikkra zérus, vagy zérus közeli (5. ábra).

Kapcsolódó publikáció: [P1] [P2]

Tézis 3.

Disszertációmban bemutatott ellenirányban forgó ikerturbina geometriájával, $\lambda = 4$ gyorsjáratú tényezővel, egy átmérőnyi radiális tartományon belül ($R = 0D$ -tól $R = 1D$ -ig) **bebizonyítottam, hogy a radiális távolság változtatása hatással van az ellenirányú ikerturbina összteljesítménytényezőjére.** Egy adott radiális távolsághoz tartozó összes teljesítménytényező átlagos értékét vizsgálva, az $R = 1D$ eset bizonyult energetikailag legkedvezőbbnek, melyet az $R = 0D$, majd az $R = 0,75D$, $R = 0,5D$ és az $R = 0,25D$ esetek követték (11. ábra).

Az $R = 1D$ összes axiális eltolásánál kapott teljesítménytényező átlaga 32%-kal nagyobb volt, mint az egyrotoros turbináé azonos áramlástanai feltételek mellett. A vizsgált radiális eltolásnál a legnagyobb teljesítménytényező 34%-kal, míg a legkisebb 30%-kal nagyobb volt, mint az egyrotoros turbina teljesítménytényezője.

Az $R = 0D$ összes axiális eltolásánál kapott teljesítménytényező átlaga 27%-kal nagyobb volt, mint az egyrotoros turbináé azonos áramlástanai feltételek mellett. A vizsgált radiális eltolásnál a legnagyobb teljesítménytényező 36%-kal, míg a legkisebb 22%-kal nagyobb volt, mint az egyrotoros turbina teljesítménytényezője.

Az $R = 0,75D$ összes axiális eltolásánál kapott teljesítménytényező átlaga 26%-kal nagyobb volt, mint az egyrotoros turbináé azonos áramlástanai feltételek mellett. A vizsgált radiális eltolásnál a legnagyobb teljesítménytényező 30%-kal, míg a legkisebb 21%-kal nagyobb volt, mint az egyrotoros turbina teljesítménytényezője.

Az $R = 0,5D$ összes axiális eltolásánál kapott teljesítménytényező átlaga 10%-kal nagyobb volt, mint az egyrotoros turbináé azonos áramlástanai feltételek mellett. A vizsgált radiális eltolásnál

a legnagyobb teljesítménytényező 28%-kal nagyobb, míg a legkisebb 3%-kal kisebb volt, mint az egyrotoros turbina teljesítménytényezője.

Az $R = 0,25D$ összes axiális eltolásánál kapott teljesítménytényező átlaga 5%-kal nagyobb volt, mint az egyrotoros turbináé azonos áramlástanai feltételek mellett. A vizsgált radiális eltolásnál a legnagyobb teljesítménytényező 17%-kal nagyobb, míg a legkisebb 3%-kal kisebb volt, mint az egyrotoros turbina teljesítménytényezője.

Kapcsolódó publikáció: [P1]

Tézis 4.

Disszertációmban bemutatott ellenirányban forgó ikerturbinával, $\lambda = 4$ gyorsjáratú tényezővel, $A = 0,005D$ és $A = 2D$ közötti tartományban **megállapítottam, hogy az ikerturbinák rotorjai közötti axiális távolság hatással van a teljesítménytényezőre.** Ha a turbinák közötti interakció kicsi ($R = 1D$), az ikerturbinák összteljesítménytényezője közel állandó, a rotorok közötti tengelyirányú távolságnak nincs jelentős hatása az összteljesítményre. Ha a két rotor forgástengelye egy tengelyre esik ($R = 0D$), az ikerturbina összteljesítménytényezője 11%-kal növelhető a vizsgálati tartomány végére ($A = 2D$), a tartomány elejéhez ($A = 0,005D$) viszonyítva. A két szélsőérték között ($R = 0,25D$, $R = 0,5D$ és $R = 0,75D$) az összteljesítménytényező értékei kis axiális távolság esetén ($A = 0,005D - A = 0,125D$) nagyobbak, megközelítőleg $A = 0,5D$ -ig gyorsabban csökkennek, melyet lassabb csökkenés követ $A = 1D \sim 1,25D$ -ig (6 – 11. ábra).

Kapcsolódó publikáció: [P1]

Tézis 5.

Disszertációmban bemutatott ellenirányban forgó ikerturbina geometriával, $\lambda = 4$ gyorsjáratú tényezővel, az $A = 0,5D$, $R = 0,5D$ axiális és radiális eltolásokkal, $M = 0,5$ és $M = 2$ méretaránytartományon belül **megállapítottam, hogy az átmérők változtatásával az összteljesítménytényező növelhető, és a nagyobb teljesítménytényezők a vizsgálati tartomány két szélén találhatóak.** Az $M = 1$ méretarányhoz viszonyítva a vizsgálati tartományon belül a legnagyobb teljesítménytényező 9,6%-kal nagyobb ($M = 0,6$), míg a legkisebb 1,2%-kal kisebb volt ($M = 1,25$), mint a viszonyítási alap (14. ábra).

Kapcsolódó publikáció: [P3]

6 Az eredmények hasznosítási lehetősége

Bízom benne, hogy az általam vizsgált ikerturbinák a közeljövőben az energiamix fontos elemei lesznek, hiszen az egyrotoros turbinákhoz viszonyítva egységnyi területen nagyobb energiasűrűség érhető el velük.

Meglátásom szerint, az ikerturbinák először urbanizált régiókban fognak megjelenni, mivel ott a lakosság számára lokális energiatermelő eszközzé válhatnak. A decentralizálódó energiatermelő rendszerekben, valamint a városokon belül megjelenő smart grid hálózatban az ellátás biztonságát növelheti, továbbá üzem közben, károsanyag-kibocsátás nélkül üzemelne.

7 Irodalmi hivatkozások listája

- [1] „Rapid Transitions Alliance, From oil crisis to energy revolution – how nations once before planned to kick the oil habit,” Rapid Transitions Alliance (online), <https://www.rapidtransition.org/stories/from-oil-crisis-to-energy-revolution-how-nations-once-before-planned-to-kick-the-oil-habit/> [Hozzáférés dátuma: 2021. március 22.].
- [2] Global Wind Energy Council, „Global Offshore Wind Report 2017,” Brüsszel, Belgium, Global Wind Energy Council, , 2018., https://gwec.net/wp-content/uploads/vip/GWEC_PRstats2017_EN-003_FINAL.pdf
- [3] Global Wind Energy Council, „Global Offshore Wind Report 2020,” Brüsszel, Belgium, Global Wind Energy Council, , 2020., <https://gwec.net/global-offshore-wind-report-2020/>
- [4] „Global Wind Installation,” World Wind Energy Association (online), <https://library.wwindea.org/global-statistics/> [Hozzáférés dátuma: 2021. február 28.].
- [5] Global Wind Energy Council, „Global Wind Report 2021,” Brüsszel, Belgium, Global Wind Energy Council, 2021., <https://gwec.net/wp-content/uploads/2021/03/GWEC-Global-Wind-Report-2021.pdf>
- [6] Enerdata, „Global wind capacities increased by 94 GW in 2021 to 837 GW.” <https://www.enerdata.net/publications/daily-energy-news/global-wind-capacities-increased-94-gw-2021-837-gw.html> [Hozzáférés dátuma: 2022. május 15.]
- [7] W.-T. Chong, K.-H. Wong, C.-T. Wang, M. Gwani, Y.-J. Chu, W.-C. Chia és S.-C. Poh, „Cross-Axis-Wind-Turbine: A Complementary Design to Push the Limit of Wind Turbine Technology”, *Energy Procedia*, ISSN: 1876-6102, **105**, pp. 973-979, 2017., DOI: 10.1016/j.egypro.2017.03.430, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S187661021730471X>

- [8] B. Coxworth, „Screwy-looking wind turbine makes little noise and a big claim,” New Atlas (online),
<https://newatlas.com/the-archimedes-liam-f1-urban-wind-turbine/32263/> [Hozzáférés dátuma: 2021. március 3.].
- [9] L. Romański, J. Bieniek, P. Komarnicki, M. Dębowski és J. Detyna, „Estimation of operational parameters of the counter-rotating wind turbine with artificial neural networks,” *Archives of Civil and Mechanical Engineering*, ISSN: 1644-9665, **17**(4), pp. 1019-1028, 2017., DOI: 10.1016/j.acme.2017.04.010,
<https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S1644966517300626>
- [10] A. M. Labib, A. A. Gawad és M. M. Nasseif, „Effect of Aspect Ratio on Aerodynamic Performance of Archimedes Spiral Wind Turbine,” *EIJEST*, ISSN: 2682-3640, **32**, pp. 66-72, 2020., DOI: 10.21608/EIJEST.2020.45256.1017,
https://ejest.journals.ekb.eg/article_144060.html
- [11] A. Ozbay, W. Tian és H. Hu, „Experimental Investigation on the Wake Characteristics and Aeromechanics of Dual-Rotor Wind Turbines,” *Journal of Engineering for Gas Turbines and Power*, ISSN: 1528-8919, **138**(4), pp. 1-15, 2016., DOI: 10.1115/1.4031476,
<https://asmedigitalcollection.asme.org/gasturbinespower/article-abstract/138/4/042602/384839/Experimental-Investigation-on-the-Wake>
- [12] F. Szlivka és I. Molnár, „Víz- és szélenergia hasznosítás,” EDUTUS Főiskola, 2012.,
https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0017_10_viz_es_szelenergia/adatok.html
- [13] A. N. Gorban, A. M. Gorlov és V. M. Silantyev, „Limits of the Turbine Efficiency for Free Fluid Flow,” *Journal of Energy Resources Technology*, ISSN: 1528-8994, **123**(4), pp. 311-317, 2001., DOI: 10.1115/1.1414137,
<https://asmedigitalcollection.asme.org/energyresources/article-abstract/123/4/311/450164/Limits-of-the-Turbine-Efficiency-for-Free-Fluid>
- [14] D. Hartwanger és A. Horvat, „3D Modelling of a Wind Turbine Using CFD,” *NAFEMS UK Conference 2008 - Engineering Simulation: Effective Use and Best Practice*, Cheltenham, 2008.,
https://www.researchgate.net/publication/228639792_3D_modelling_of_a_wind_turbine_using_CFD
- [15] F. Szlivka, I. Molnár, P. Kajtár és G. Telekes, „CFX Simulations by Twin Wind Turbine,” *2011 International Conference on Electrical and Control Engineering*, ISBN: 978-1-4244-8165-1, pp. 5780-5783, 2011. szeptember 16-18, Yichang, Kína, DOI: 10.1109/ICECENG.2011.6057550,
<https://ieeexplore.ieee.org/document/6057550>

7.1 A tézispontokhoz kapcsolódó tudományos közlemények

- P1 Cs. Heteyei és F. Szlivka, „Counter-Rotating Dual Rotor Wind Turbine Layout Optimisation,” *Acta Polytechnica*, ISSN: 1805–2363, **61**(2), pp. 342-349, 2021., DOI: 10.14311/AP.2021.61.0342 (**WoS, Scopus**),
<https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/6721>
- P2 Cs. Heteyei és F. Szlivka, „Review of the Aerodynamic Load on a Dual-Rotor Wind Turbine’s Blade,” *Biztonságtudományi Szemle*, ISSN: 2676-9042, **3**(1), pp. 91-110, 2021.,
<https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/113>
- P3 Cs. Heteyei és F. Szlivka, „Rotor Size Optimisation of a Counter-Rotating Dual-Rotor Wind Turbine,” *Biztonságtudományi Szemle*, ISSN: 2676-9042, **2**(4), pp. 89-104, 2020.,
<https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/86>

7.2 További tudományos közlemények

- P4 Cs. Heteyei és F. Szlivka, „Spread of Sneezing and Coughing in a Subway Car,” *Biztonságtudományi Szemle*, ISSN: 2676-9042, **3**(2), pp. 37-60, 2021.,
<https://biztonsagtudomanyi.szemle.uni-obuda.hu/index.php/home/article/view/105>
- P5 Cs. Heteyei és F. Szlivka, „Axial Gap Optimisation of Half Diameter Shifted Counter Rotating Dual Rotor Wind Turbine,” *Interdisciplinary Description of Complex Systems*, ISSN: 1334-4676, **18**(3), pp. 389-399, 2020., DOI: 10.7906/indecs.18.3.9 (**WoS**),
<http://indecs.eu/index.php?s=x&y=2020&p=389-399>
- P6 Cs. Heteyei és R. Nagy, „Review of Wind Turbine Failures, Highlighting Fire Accidents,” *Műszaki Katonai Közlöny*, ISSN: 2063-4986, **30**(2), pp. 43-56, 2020., DOI: 10.32562/mkk.2020.2.4
<https://folyoirat.ludovika.hu/index.php/mkk/article/view/3462>
- P7 Cs. Heteyei, I. Molnár és F. Szlivka, „Comparing different CFD software with NACA 2412 airfoil,” *Progress in Agricultural Engineering Sciences*, ISSN: 1786-335X, **16**(1), pp. 25-40, 2020., DOI: 10.1556/446.2020.00004 (**Scopus**),
<https://akjournals.com/view/journals/446/16/1/article-p25.xml>
- P8 Cs. Heteyei és F. Szlivka, „Roof Pitch Angle Examination for Wind Turbine Installation,” *Műszaki Tudományos Közlemények*, ISSN: 2601-5773, **11**, pp. 81-84, 2019., DOI: 10.33894/mtk-2019.11.16,
<https://www.sciendo.com/article/10.33894/mtk-2019.11.16>

- P9 Cs. Heteyei és F. Szlivka, „Szélturbina telepítéséhez tető dőlésszögének vizsgálata,” *Műszaki Tudományos Közlemények*, ISSN: 2601-5773, **11**, pp. 81-84, 2019., DOI: 10.33895/mtk-2019.11.16,
<https://eda.eme.ro/handle/10598/31211>
- P10 Cs. Heteyei és F. Szlivka, „Szélturbina telepítéshez előterelők vizsgálata lakótelepi környezetben,” *Bánki Közlemények*, ISSN: 2560-2810, **2(2)**, pp. 36-45, 2019.,
<http://bk.bgk.uni-obuda.hu/index.php/BK/article/view/88>
- P11 Cs. Heteyei és F. Szlivka, „Lapátszög-szabályzás hatása a nyomatékra,” *Bánki Közlemények*, ISSN: 2560-2810, **1(1)**, pp. 83-88, 2018.,
<http://bk.bgk.uni-obuda.hu/index.php/BK/article/view/40>
- P12 Cs. Heteyei és F. Szlivka, „Szélkerék környezetében kialakuló hangterhelés vizsgálata,” *Hadmérnök*, ISSN: 1788-1929, **13(1)**, pp. 20-32, 2018.,
http://www.hadmernok.hu/181_02_heteyi.php
- P13 Cs. Heteyei és F. Szlivka, „Szélturbina burkolatgeometriájának hatása a nyomatékra,” *GÉP*, ISSN: 0016-8572, **68(3)**, pp. 84-87, 2017.,
<http://gepujsag.hu/index.php/hu/ujsgag/gep-2017-evi-lapszamok/180-2017-3>
- P14 Cs. Heteyei, „Szélkerekek energetikai helyzete,” *Hadmérnök*, ISSN: 1788-1929, **12(3)**, pp. 265-278, 2017.,
http://www.hadmernok.hu/173_24_heteyi.php
- P15 Cs. Heteyei, „Lapradiátorok hatásfokának vizsgálata és modellezése,” *Dunakavics*, ISSN: 2064-5007, **3(2)**, pp. 15-33, 2015.,
http://dunakavics.uniduna.hu/online_1502.pdf