

SZÉLKERÉK KÖRNYEZETÉBEN KIALAKULÓ HANGTERHELÉS VIZSGÁLATA

NOISE ANALYSIS OF A WIND TURBINE AND IT'S IMPACT ON THE ENVIRONMENT

HETYEI Csaba; KISS Sándor; SZLIVKA Ferenc

(ORCID: 0000-0003-2915-4540); (ORCID: 0000-0002-8449-8779); (ORCID: 0000-0002-3298-4142)

hetyei.csaba@phd.uni-obuda.hu; kiss.sandor@uni-nke.hu; szlivka.ferenc@bgk.uni-obuda.hu;

Absztrakt

Jelen közleményben egy képzeletbeli szélkerék környezetében kialakuló hangterhelés vizsgáljuk. Áttekintjük a hangterhelésszinteket és annak a számítási módját. Ezt követően ismertetjük a vizsgált szélturbinánkat és az áramlástan peremfeltételeket.

Az így kapott eredményekből meghatározzunk néhány nevezetes hangteljesítményszinthez tartozó távolságot, amik ismeretében becsülhetővé válik, hogy milyen hangszigeteléssel kell ellátni a szélturbina környezetébe telepítendő üzemünket.

Kulcsszavak: Szélenergia, szélturbina, akusztika, Proudman formula

Abstract

In our article we are examining the noise impact of a wind turbine. We will explain the basic theories or the noise levels and it's calculation methods, and it's simulation procedure.

From the results, we determine the distance for some notable sound power levels. This distances will help estimate the sound-proofing for our imaginary factory.

Keywords: Wind energy, Wind turbine, acoustic, Proudman formula

A kézirat benyújtásának dátuma (Date of the submission): 2017.12.19.

A kézirat elfogadásának dátuma (Date of the acceptance): 2018.03.12.

BEVEZETÉS

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

Ennek a szegmensnek a növekedése jól látszódik a telepített szélenergia teljesítményeken. 2000-ben összesen 17,4 GW, 2010-ben 197,9 GW, 2015-ben 432,4 GW teljesítményű szélturbina állt rendelkezésre a világon [1]. Az első szélenergia-átalakítót, ami elektromos áramot termelt, 1887-ben építették, de előtérbe csak az 1980-as olajválság idején kerültek. Azóta telepítésük növekvő tendenciát mutat.

A növekvő tendenciával nem csak az energiatermelés mennyiség nő, hanem a szélenergia-átalakítók „rejtett hibáinak” megismerése is, például a környezetre gyakorolt hatásuk.

Ezek a hatások közül cikkünkben egy szélturbina okozta hangterhelést, azaz a szélenergia-átalakító okozta zajt fogjuk vizsgálni. A vizsgálatunk helye egy képzeletbeli üzemudvar lesz, ahol célunk meghatározni azt a távolságot, aminél az ott dolgozókat nem zavarja a szélturbina által keltett zaj.

A HANG

Általános megfogalmazás szerint zajnak tekinthető minden olyan hanghatás, ami az emberi tevékenység során zavaró. Hangnak alapvetően két dolgot nevezünk, fizikailag egy rugalmas közeg rész állapotának ingadozását, ami terjed a közegben, és egy olyan hatást, amely az élőlények hallószervén keresztül különböző élettani hatásokat vált ki. A hang a hangforrásból kiindulva, rugalmas közegben minden irányba terjed, amely során gyengül majd elhal. Erre egy jó példa a beszéd, ugyanis beszéd közben a hangszálainkkal rezgésbe hozzuk a levegőt, ez a rezgés hullámként eljut egy másik ember hallószervébe, és ott olyan hatásokat vált ki, hogy az illető meghallja, amit mondunk.

A hang keletkezése során a hangforrásból a hanghullámok lépnek ki és terjednek rugalmas közegben. Azt a teret, amit a hang bejár, hangtérnek nevezzük. Amennyiben a hanghullámok terjedés közben különböző akadályokba ütköznek, visszaverődnek, elnyelődnek, áthatolnak, törnek, illetve elhajolnak.

A hangokat különböző mennyiségekkel jellemezhetjük, ilyen például a frekvencia, hangsebesség, hangnyomás, hangteljesítmény és a hangintenzitás. Ezek közül csak a hangnyomást és a hangteljesítményt ismertetjük röviden.

A hanghullámok terjedése miatt a hangtérben a közeg sűrűsége nőhet és csökkenhet, így különböző nyomásértékek alakulhatnak ki. Ezek a nyomásértékek jellemzően sokkal kisebbek, mint a környezeti légnyomás, például egy beszélgetés során a beszélőtől 1 m távolságra 0,1 – 1 Pa hangnyomás alakul ki, míg a környezeti légnyomás 101 325 Pa.

Az emberi fül számára a legkisebb hangnyomás érték, amit észlelni tud, $2 \cdot 10^{-5}$ Pa, a fájdalomküszöb körülbelül 20 Pa. A két küszöbérték közötti hat nagyságrendnyi különbséget a könnyebb kezelhetőség, illetve az emberi észlelés jellegzetességei miatt a szintekkel szokták megadni, mértékegysége dB. Hangnyomásszintet a következő képlettel lehet kiszámítani:

$$L = 10 \cdot \log\left(\frac{p}{p_0}\right)^2 = 20 \cdot \log\frac{p}{p_0} \quad (1)$$

A képletben,

- L, a hangnyomás szint,
- p, a hangnyomás,
- p_0 , az észlelés szempontjából legkisebb hangnyomás (értéke: $2 \cdot 10^{-5}$ Pa).

A képletbe behelyettesítve a fájdalomküszöbnek megadott 20 Pa-t, megkaphatjuk ennek az értéknek a hangnyomás szintjét a következő módon:

$$L = 10 \cdot \log \left(\frac{p}{p_0} \right)^2 = 20 \cdot \log \frac{20 \text{ Pa}}{2 \cdot 10^{-5} \text{ Pa}} = 120 \text{ dB} \quad (2)$$

A hangnyomásból származtatható a hangteljesítmény, aminek a legkisebb emberi füllel észlelhető értéke 10^{-12} W. A hangteljesítményszint a következő képlettel számítható ki:

$$L_P = 10 \cdot \log \frac{P}{P_0} \quad (3)$$

A képletben,

- L_p , a hangteljesítmény szint,
- P , a hangteljesítmény,
- P_0 , a referencia hangteljesítmény érték (10-12 W).

A következő táblázatban néhány nevezetes hangteljesítményszint látható.

Hangtér	L_p [dB]
Suttogás	20 - 30
Csendes lakótelep éjjel	40
Normál beszéd	50
Étterem, iroda	60
Forgalmas út, kiáltás	80
Benzinmotoros fűrés	110

1. táblázat Néhány nevezetes hangteljesítményszint

VÉGES TÉRFOGAT SZIMULÁCIÓRÓL

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

Véges térfogat módszerről általánosságban

A VTM alapú 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 a számolás jellemzően a következő transzport egyenletre épül:

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_V U dV + \oint_A \underline{F} d\underline{A} = \int_V S_V dV + \oint_A \underline{S}_A d\underline{A} \quad (4)$$

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

Proudman formula [3]

SOLIDWORKS Flow Simulation-ön belül elérhető akusztikai szimuláció az áramlástan szimuláció eredményeiből becsüli a hangteljesítményt a Proudman formulával.

A Proudman formula a VTM alapú áramlástan szimulációkban a hangteljesítmény számítására egy bevett módszer. A formula egy térfogategységre vett izotrópikus turbulenciából származtatja a hangteljesítményt a következő képlet alapján:

$$P_a = \alpha \cdot \rho_0 \cdot \left(\frac{u^3}{l}\right) \cdot \frac{u^5}{a_0^5} \quad (5)$$

Az egyenletben,

- P_a , a hangteljesítmény,
- α , egy mérésekből származó állandó,
- ρ_0 , a közeg sűrűsége,
- u , a turbulencia viszkozitása,
- l , a turbulencia hosszléptéke,
- a_0 , a hangsebesség.

Az egyenletbe behelyettesítve a k - ε turbulenciamodell állandóit a következő felírást kapjuk:

$$P_a = \alpha_\varepsilon \cdot \rho_0 \cdot \varepsilon \cdot M_t^5 \quad (6)$$

ahol,

$$M_t = \frac{\sqrt{2 \cdot k}}{a_0} \quad (7)$$

Az egyenletben,

- α_ε , egy mérésekből származó állandó (értéke 0,1),
- ε , a turbulens örvény disszipációja,
- M_t , a turbulens Mach szám,
- k , a turbulens kinetikai energia.

Az így kapott hangteljesítményből az előzőekben ismertetett formulával meghatározható a vizsgált térfogategységre a hangteljesítmény szintje:

$$L_P = 10 \cdot \log \frac{P_a}{P_0} \quad (8)$$

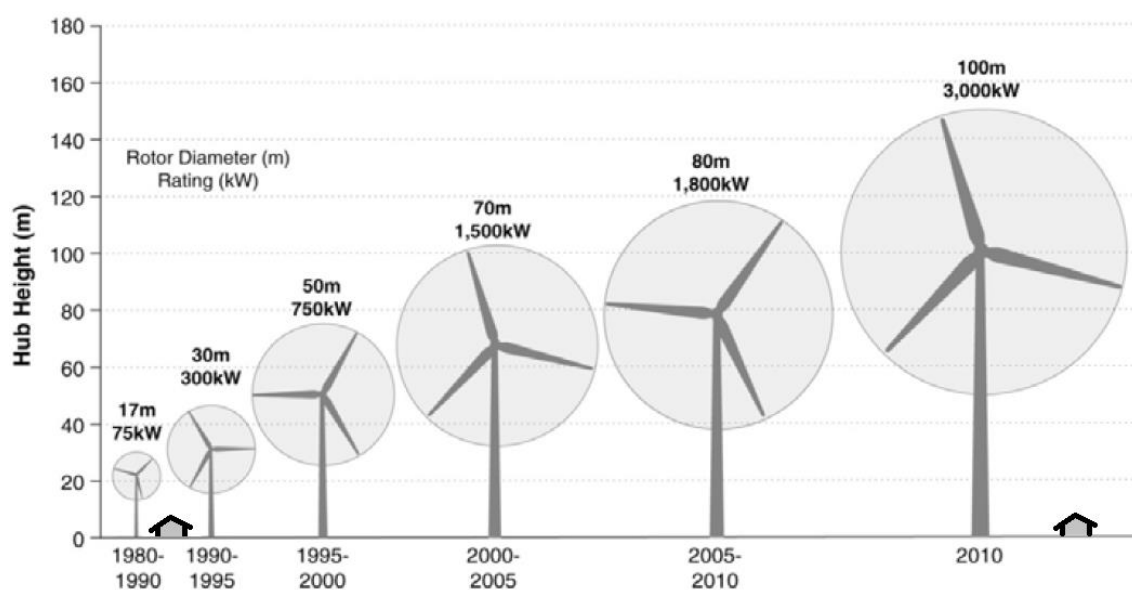
ahol,

- P_0 , a térfogategységre származtatott referencia hangteljesítmény (értéke 10^{-12} W/m^3).

VIZSGÁLT FELADAT ISMERTETÉSE

Az előzőekben ismertettek alapján egy képzeletbeli gyárudvarra szeretnénk telepíteni egy szélturbinát, aminek a hangterét vizsgáljuk.

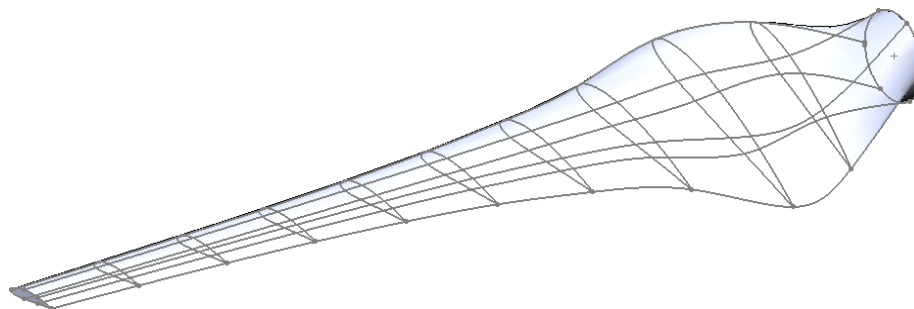
Vizsgálatunk tárgyának egy Ø30 méter lapátátmérvő szélturbinát választottunk, aminek a közelítőleges méretei a következő ábrán láthatók.



1. ábra Szélturбина méretei a névleges teljesítményük és a magasságuk függvényében [4]

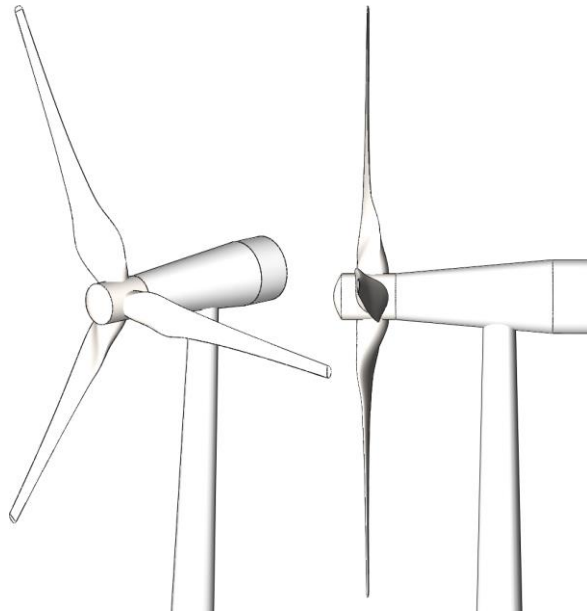
Vizsgált geometria

A készítettünk egy 15 méter hosszú lapátot, NACA 4415-ös profilból, ami a következő ábrán látható.



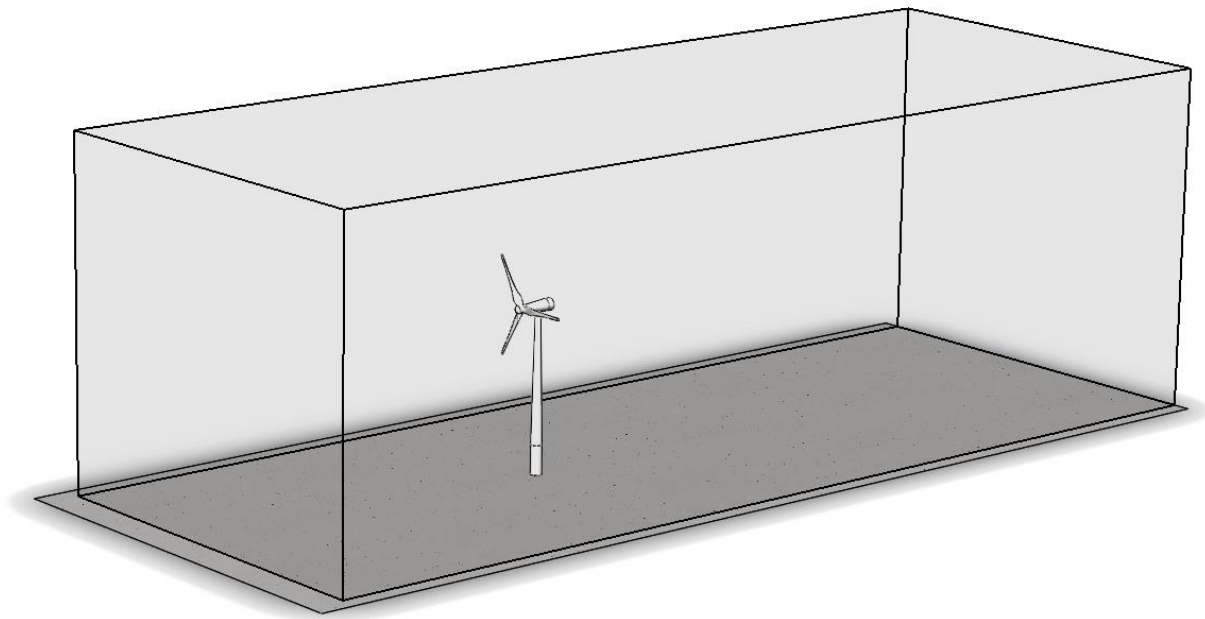
2. ábra Szélkerék lapát

A lapátot körben kiosztottuk háromszor, majd egy lekerekített orrú hengeres testet választottunk gondolának. A gondolát egy 45 méter magas oszlopra tettük.



3. ábra A gondola és az oszlop felső része

Az így kapott szélturbinánkat a következő képen látható áramlási térbe helyeztük el.



4. ábra Áramlási térben

Szimuláció peremfeltételei

Az áramlási terünk egy 290 x 110 x 95 méter nagyságú hasáb volt, amiben a szélkerék a térfogat „elejétől” 100 méterre helyeztük el a térrész közepén.

Általában a szélkerekeket 25 m/s-os szélességnél szokták leállítani. Mi az álló szakaszban szeretnénk volna szimulálni, így 30 m/s-os szélességet definiáltunk peremfeltételnek.

A szélkerék körül kialakuló örvények miatt, időfüggő szimulációt futtattunk, aminek leállítási feltételének a szélkerék mögött a tengellyel egyvonalban, illetve a lapátok végénél a tengellyel párhuzamosan 25 méterenként az áramlási tér végig felvettünk pontokat, ahol az áramlási sebesség és a nyomás konvergenciáját vizsgáltuk.

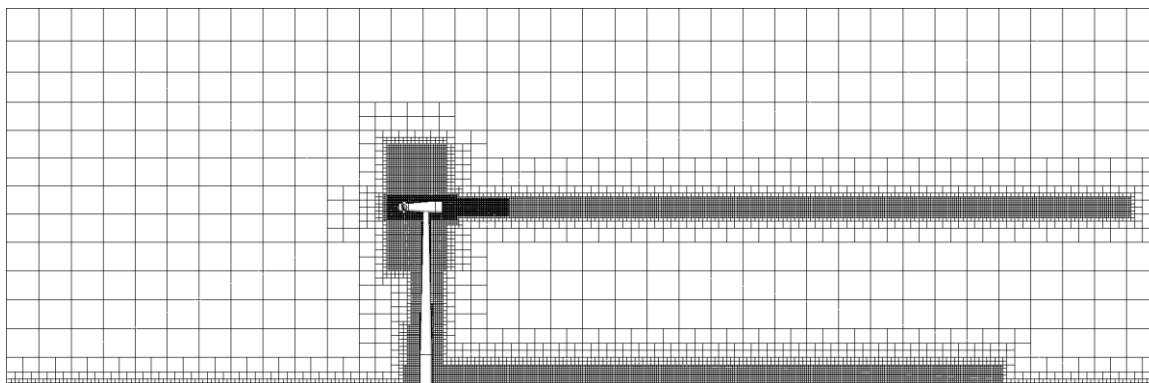
A vizsgált helyeken jellemzően a nyomás előbb kezdtek el konvergálni (kb. 400-500. iterációnál), mint a sebesség. A szimuláció nagyjából 8500 iterációig futott, ami 64 (fizikai) másodpercnek felel meg.

A turbulencia leírásához az előzőekben már említett k- ϵ modellt használtuk.

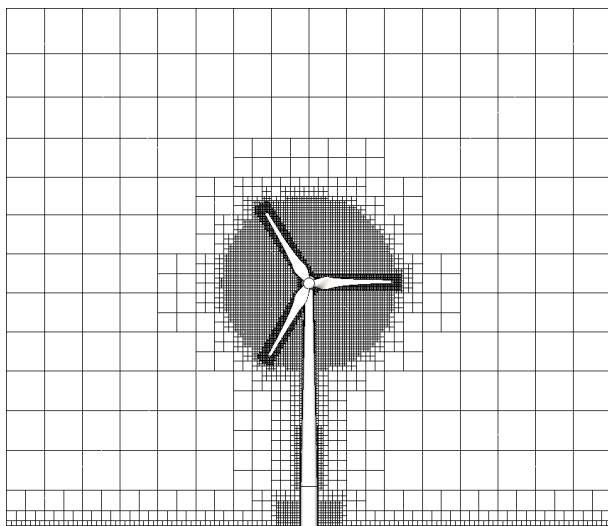
Az összes felületet ideálisnak tekintettük ($Ra = 0 \mu\text{m}$), így sem az érdességgel, sem a felületi hibákkal, egyenetlenségekkel nem számoltunk.

Hálózás

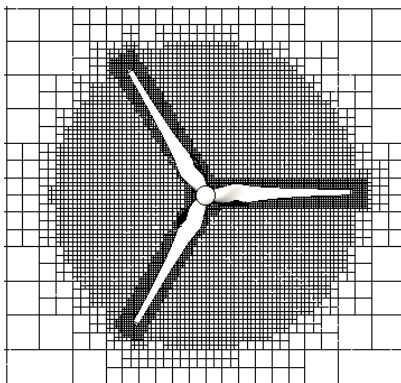
A tér felbontására téglatest hálót készítettünk. Az áramlási tér alaphálója 16 x 13 x 36 (7 488) cellaelemet tartalmazott, amit az áramlási térben, illetve a felületek mentén felosztottunk. A szélturbina mögött, és a turbina környezetében négyszer sűrítettünk a hálón oldalfelezéssel. A szélkerék lapátozásnál és orrkupolájánál hatszor-, az összes többi felületen ötször sűrítettünk a hálón oldalfelezéssel. Így a 908 997 cellát kaptunk. A hálózásról néhány síkban a következő ábrákon látható egy-egy metszet.



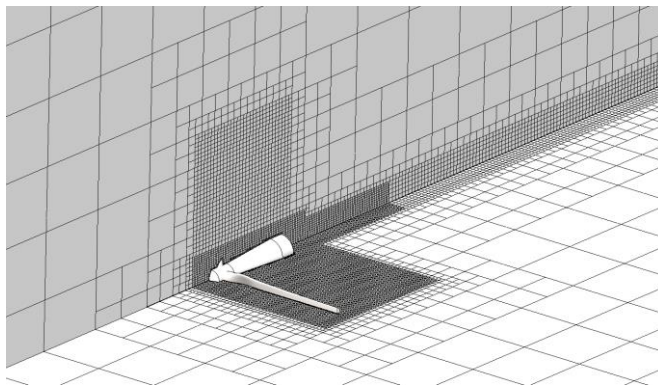
5. ábra Áramlási tér hálója (oldalnézet)



6. ábra Áramlási tér hálója (az oszlop középsíkjában)



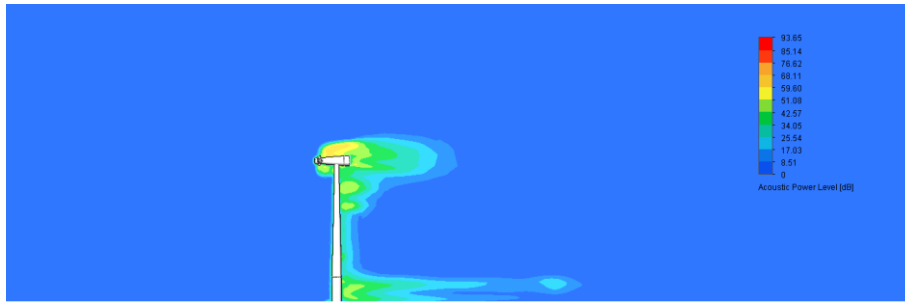
7. ábra Véges térfogat háló a szélkerék középsíkjában



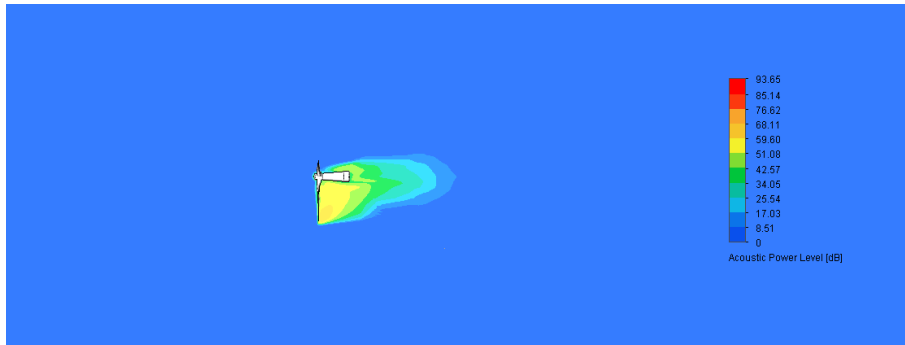
8. ábra Véges térfogat háló a szélkerék környezetében

SZIMULÁCIÓ EREDMÉNYEI

A következő ábrákon a szélturbina környezetében kialakuló hangteljesítményszinteket lehet látni.

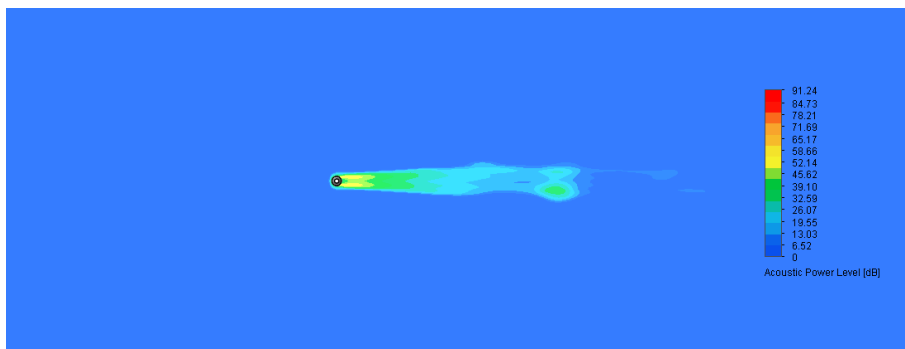


9. ábra Hangtér a szél turbina középsíkjában (oldalnézet)

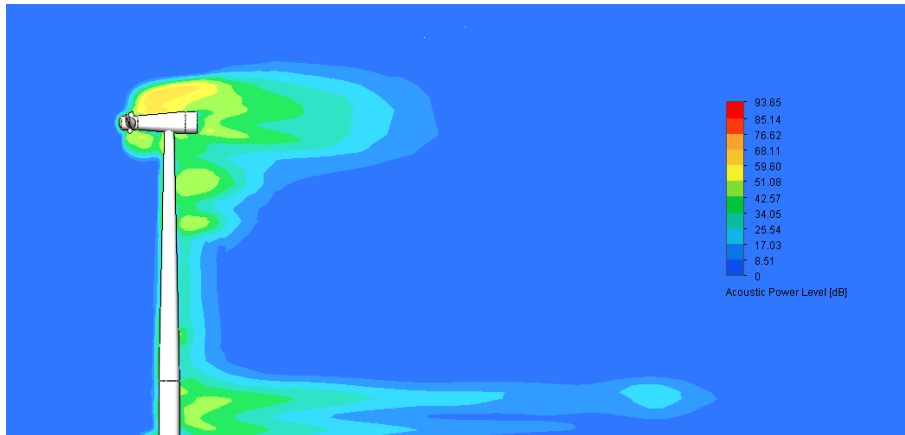


10. ábra Hangtér a szél turbina középsíkjában (felülnézet)

Az előző ábrákat megvizsgálva megállapítható, hogy a legnagyobb zaj a szélkerék környezetében alakul ki, viszont a leghosszabb turbulencia a tartóoszlop aljánál, a talaj mentén található. Ebben a régióban a kapott eredményeknél nagyobb zajszinteket mérnénk a valóságban a talaj egyenetlensége és a levegővel érintkező felületek érdessége miatt.

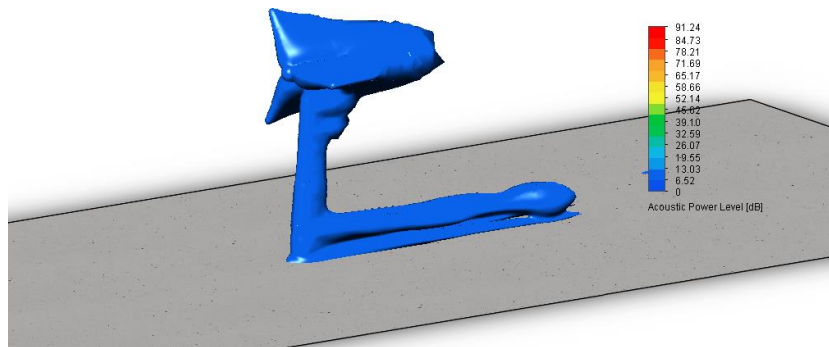


11. ábra Hangtér a talaj felett 5 méterrel

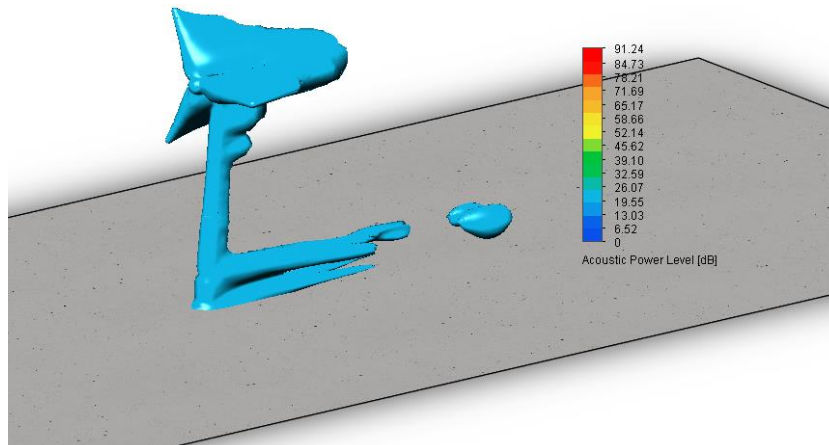


12. ábra Hangtér a szélturbina középsíkjában (oldalnézet, nagyított)

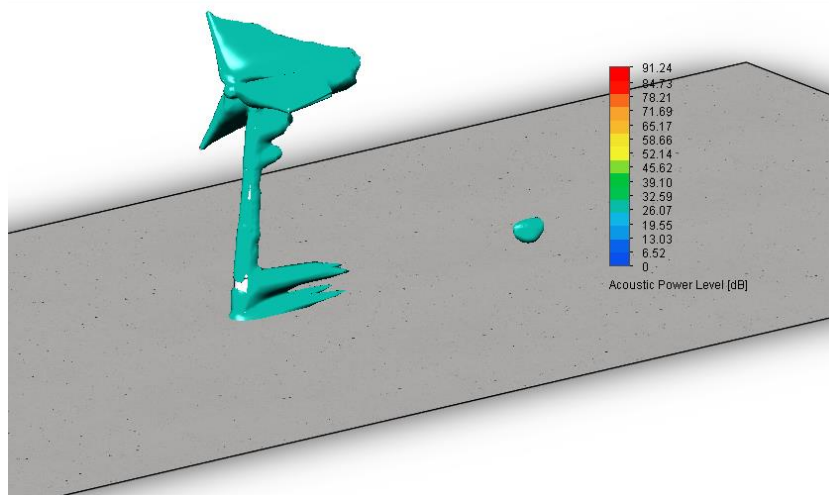
A könnyebb szemléltetés miatt, a következő ábrákon a kapott eredményeink felületi ábrái (isosurface plot) láthatók 10 – 50 dB-es szintig.



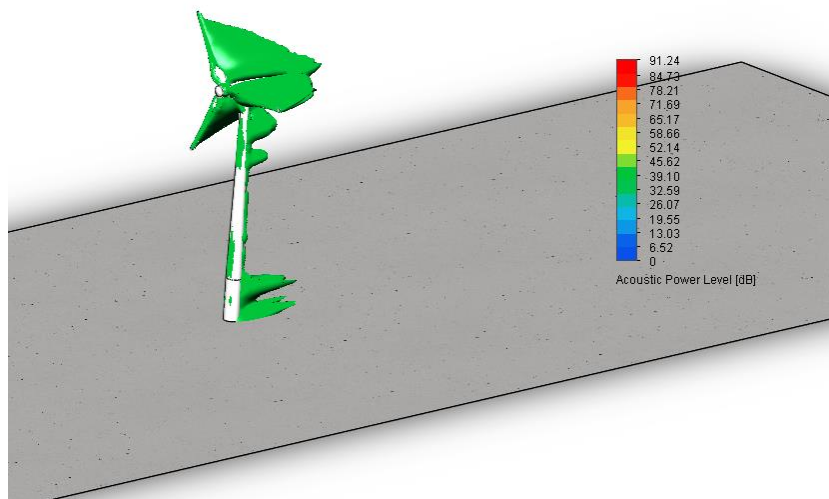
13. ábra 10 dB-es hangteljesítményszint isosurface plotja



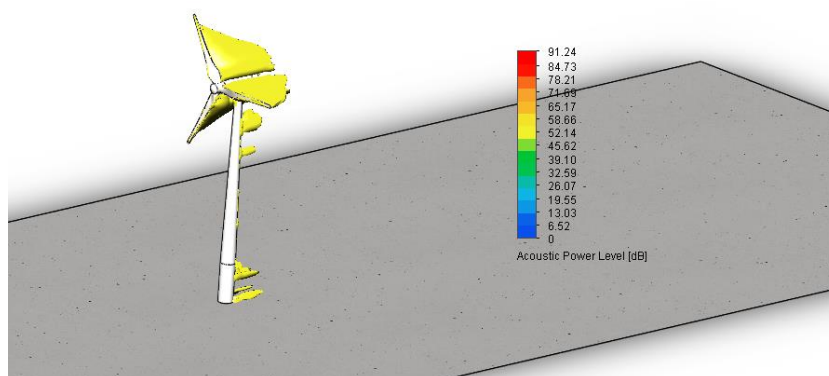
14. ábra 20 dB-es hangteljesítményszint isosurface plotja



15. ábra 30 dB-es hangteljesítményszint isosurface plotja

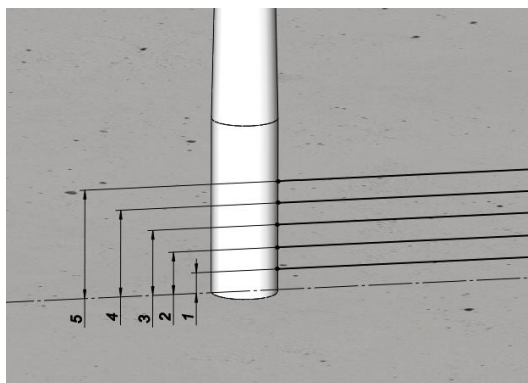


16. ábra 40 dB-es hangteljesítményszint isosurface plotja

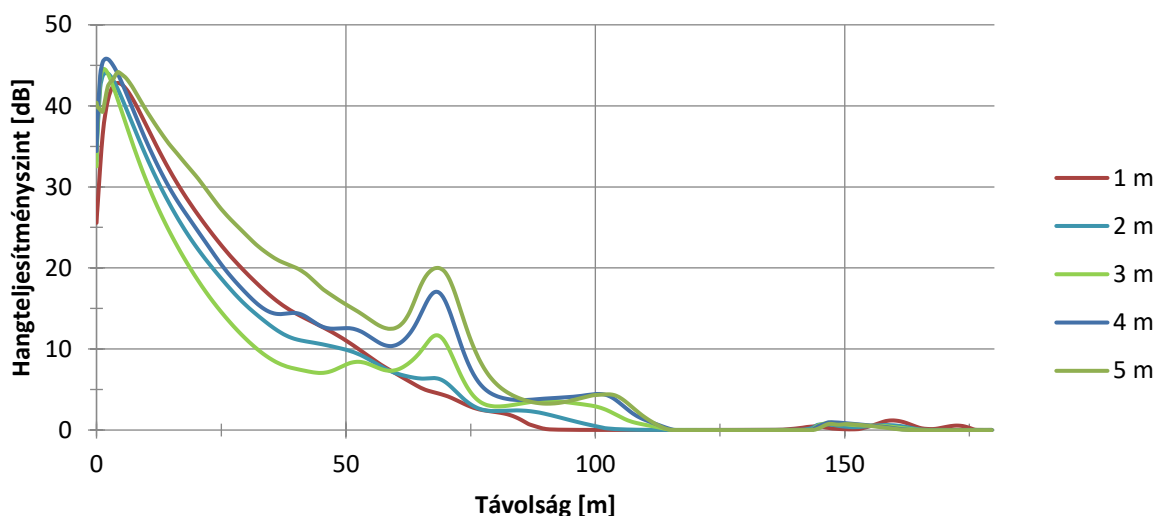


17. ábra 50 dB-es hangteljesítményszint isosurface plotja

Az eredmények grafikonon történő ábrázolásához felvettünk öt vonalat 1 méterenként a talajtól. Ezek a vonalat mentén a tartóoszlop mögötti térrészre lekérdeztük a hangteljesítményszinteket.



18. ábra Referencia távolságok



19. ábra Hangteljesítményszint szint alakulása a szélkerék mögött a távolság függvényében

Az előző ábrán megfigyelhető, hogy mindegyik görbe esetén 45 dB környékén van a maximum, az oszlop közvetlen közelében. Ezt követően csökken mindegyik magasságban a zaj értéke.

A 30 dB-es értéket (ami nagyjából a suttogásnak felel meg) 16,3 -, 12,6 -, 10,3 -, 14,2 -, és 21,6 méterrel az oszlop mögött éri el 1-, 2-, 3-, 4-, és 5 méteres magasságban a zajszint az oszlop mögött.

Az áramlási térben kialakuló örvények miatt, kb. 60 méterrel az oszlop mögött 3, 4 és 5 méteres magasságnál lokális hangnyomásszint csúcs alakul ki, ami után a hangnyomásszint tovább csökken.

A 10 dB-es értéket, az 1 méteres magasságban 52,5 méterrel az oszlop mögött -, 2 méteres magasságban 50,3 méterrel az oszlop mögött -, 3 méteres magasságban 70,5 méterrel az oszlop mögött -, 4 méteres magasságban 73,8 méterrel az oszlop mögött -, és az 5 méteres magasságban 75,9 méterrel az oszlop mögött éri el a hangteljesítményszint.

Az eredményeket tovább vizsgálva 1 dB alá 101-, 112-, 105-, 107-, és 112 méterrel az oszlop mögött csökken a hangteljesítményszint. Ezt a távolságot követően az eredményeink tovább csökkennek majd felerősödnek fél dB környékére és így lépnek ki az áramlási térből.

ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkünkben egy Ø30 méteres átmérőjű álló szélturbinát vizsgáltunk, amit 30 m/s-os széllel fújtunk meg és az így kialakuló zajszintet vizsgáltuk. A vizsgálathoz egy numerikus áramlástan szimulációs szoftvert használtunk, ami az áramlási teret kiszámolta és abból a Proudman formulával meghatározta a hangteret.

Kezdeti problémafelvetésünk egy képzeletbeli üzem volt, ahol a szélkerék, mint zajforrás zavarhatja az ott dolgozókat nem megfelelő zajszigetetés, nyitott ablakok vagy egyéb okok miatt. Így az oszlop mögött a talajszint közelében kapott eredményeket függvény formájában a lekérdeztük és meghatároztuk a 30 dB, 10 dB és 1 dB-es hangteljesítményszinthez tartozó távolságot.

Eredményeink rávilágítottak arra, hogy egy Ø30 méteres átmérőjű szélturbina keltette zajok mekkorák lehetnek a vizsgált áramlástan feltételek mellett. Az eredmények kiindulási alapként felhasználhatóak szélturbina telepítés zajszintbecsléséhez és további akusztikai vizsgálatukhoz.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [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] Szlivka Ferenc: Áramlástechnikai gépek, Főiskolai Kiadó, Dunaújváros, 2008. ISBN 978-963-87780-6-2. p. 214-231.
- [3] SOLIDWORKS Flow Simulation 2017 User's Guide - Noise Prediction
- [4] Szélturbina méretei a névleges teljesítményük és a magasságuk függvényében
https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/0/08/Wind_turbine_size_increase_1980-2010.png (2017.12.08.)