



Fejlesztési napló

Projekt címe:

Vertikális tengelyű, állítható fesztávolságú szélgenerátor fejlesztés

Beszámolási időszak:

2018. október 01.- 2019. március 31.

Fejlesztésvezető:

Jávorka Zsolt

Jelentést összeállította:

Miklós Zsolt

Lektorálta:

Jávorka Zsolt



A fejlesztésben résztvevők:

1. Jávorka Zsolt - Net'96 Kft ügyvezető – Fejlesztésvezető
2. Miklós Zsolt – Fejlesztési koordinátor
3. Borbás Péter - Gépésztechnikus
4. Hartung Balázs - Tervező mérnök
5. Ujfalvi Barnabás – CNC programozó
6. Mózs László – Szakmunkás

A projekt rövid bemutatása:

Jelen kutatás-fejlesztési projekt célja innovatív 1,2 és 3 kW-os vertikális tengelyű, állítható feszítávságú szélgenerátor fejlesztése. A hagyományos, köztudatban jobban jelenlévő horizontális szélturbinák lakott területtől távol eső, széljárta helyeken telepíthetők, mely erősen leszűkíti a felhasználók körét. A hagyományos rendszerekkel ellentétben a modern technológiát képviselő vertikális rendszer előnye, hogy nem függ a széliránytól, így bármilyen irányból érkező szél energiájának felhasználására alkalmas, illetve az oldalról érkező széllelőkések, viharos szelek sem fordítják ki a szélgenerátort a szélirányból. A technológia előnye, hogy vidéki, városi környezetben is felhasználható, így jelentős piaci igény kielégítésére alkalmas. További előny a vízszintes tengelyű megoldásokkal szemben a biztonság: jobban megfelel az életvédelmi és biztonsági előírásoknak, így nem szükséges úgynevezett biztonsági védőtávolságot hagyni körülötte, ami szintén alkalmassá teszi városias környezetben való elhelyezésre. Műszaki szempontból fentiekén túl a technológiát az teszi igazán versenyképpé, hogy abban az esetben is képes a szélgenerátor folyamatos energiatermelésre, amikor alacsony a szélesebesség, így kevésbé függ a környezeti adottságoktól, időjárási viszonyoktól hagyományosabb versenytársainál. A városi szélturbinák a napelemes rendszerekhez hasonlóan tetőre szerelhetők, esztétikus kialakításuknak köszönhetően a tető szerkezetéhez simulnak, nem rontják az épület látványát. A mikro szélturbinák működése közben a tető síkja által összegyűjtött és felgyorsított levegő kerül bevezetésre a turbinába, így már kisebb szélesebességénél is képes a rendszer energiát termelni. A jelenleg ismert technológia hátránya a mikro szélgenerátorok területén, hogy bár alacsony szélesebesség mellett is működnek, azonban nagy szélesebesség mellett gyakran túlpörögnek, leállnak, így állandó működésük nem biztosított, mely kiszámíthatatlanná teszi az energiatermelés, a befektetések megtérülésének számítását, így elterjedésük lassabb ütemű, mint a hasonló megoldást kínáló háztartási méretű napelemes rendszereké. Jelen beruházás eredményeképpen egy olyan szélgenerátor jön létre, melynek kialakítása, mechanikája, technológiája újdonságtartalmat hordoz az alábbi tekintetben:

- (1) A szélgenerátor zajkibocsátása 40dB zajtartomány alatt lesz
- (2) A szélgenerátor átmérője működés közben automatikusan állítható lesz, ezzel garantálva az optimális működést és teljesítményt szélesebességtől függetlenül.

A projekt újdonságtartalma tehát alapvetően a szélgenerátor mechanikájában, valamint a hozzá tartozó vezérlésben rejlik, mely lehetővé teszi a szélgenerátor átmérőjének működés közbeni automatikus állíthatóságát. Ennek előnye:

- (1) Folytonos, egyenletes teljesítményű működés
- (2) Ebből következően kalkulálható megtérülés, energia kiváltás
- (3) A kiszámíthatóságból adódóan a korábbinál piacképesebb termék

A fejlesztés eredményeképpen létrejövő termék tehát egy 1,2 és egy 3 kW-os vertikális tengelyű, állítható feszítávolságú szélgenerátor, mely a következő jellemzőkkel bír majd előzetes elképzeléseink szerint, melyek természetesen a tényleges kísérleti fejlesztés során körvonalazódnak majd. A rotor magasság mind a 1,2 kW-os, mind pedig a 3kW-os szélgenerátor esetében 3 méteres lesz előzetes elképzeléseink szerint, a rotor átmérője pedig 1,8 méter (1,2 kW) és 3,7 méter (3 kW). A rotor anyaga egységesen carbon-üvegszál kompozitból készül majd, a szélgenerátor szerkezete pedig szerkezeti acélból, előreláthatólag S355 szerkezeti acélból, mely az általános rendeltetésű, ferrit-perlit szövetszerkezetű ötvözetlen szerkezeti acél egyik fajtája, a minőségi csoport tekintetében a tényleges kísérleti fejlesztés során hozunk majd döntést. A szélgenerátor tömege várhatóan 180 kg lesz a 1,2 kW-os szélgenerátor esetében, 260 kg-os a 3 kW-os szélgenerátor esetében.

A 2018.10.01. – 2019.03.31. tartó időszakban elvégzett fejlesztés (ek), menetének leírása:

A projekt célkitűzéseinek megfelelően a következő alapvetésekből indult ki a fejlesztő csapat.

Függőleges tengelyű szélgenerátor fejlesztésének első lépése a rotor-átmérő és a rotor-hossz meghatározása, mivel alapvetően ezek a paraméterek adják meg a generátor teljesítményét. A fejlesztés megelőző kutatása során megvizsgáltuk a piacon kapható hasonló felépítésű modellek ezen paramétereit, majd áramlástanai vizsgálatok által meghatározható a termék-konceptió forgatónyomaték-görbéje (szélsébség-forgatónyomaték), amely illesztve az adott névleges teljesítményű generátorhoz, megadható a várható termelési teljesítmény. A szélgenerátoroknál adott szélsébséghez viszonyítva adják meg a névleges teljesítményt, amely az EU-ban 13 m/s. Végül az elkészült prototípus modelljének a geometriáját validálni kell, hiszen a gyártmánytervek és a prototípus elkészítésekor a koncepcióhoz képest változások lehetnek.

Számos megoldás létezik vertikális tengelyű szélgenerátorokra (Savonius, Darreius, H-lapát, stb.), melyek közül alapvetően a H-VAWT típusúak alkalmasak városi környezetben való felhasználásra, mivel ezek keltik a legkisebb aerodinamikai zajt.

Ez annak köszönhető, hogy ezen a típusok esetében szabványos szárnyprofil is alkalmazható a perdület képzésére felhasználva ezzel a profil által generált felhajtóerőt. A többi típus esetében „öblös, zsákos” jellegű elemek következtében jön létre a forgás, ahol a kilépő levegő okozta leválások keltenek aeroakusztikai zajokat, melyek ráadásul hibás tervezés esetében a tartószerkezetben fel is erősödhetnek. A projekt egyik elemeként aerodinamikai vizsgálatokkal (CFD) és iteratív tervezéssel megoldjuk, hogy a tervezett szélgenerátor 40 dB zajtartomány alatt maradjon 15 m/s szélsébségig. (Efölött a szél által keltett környezeti zajok elnyomják a mikro generátor zaját.)

A zaj kérdése mellett a másik probléma amelyet meg kell oldani ahhoz, hogy egy mikro szélgenerátort városi környezetben elterjedten alkalmazni lehessen az a működési tartomány. A kisméretű szélgenerátorok egyik problémája, hogy ugyan alacsony szélsébségnél elindulnak, de a kis tömeg és így tehetetlenség miatt, nagyon hamar „túlpörögnek” mely esetben a villamos generátor csak alacsony hatékonysággal vagy egyáltalán nem működtethető.

Ezeknek a generátoroknak megvan az optimális fordulatszám tartományuk, amelyben a legjobb hatásfokkal működnek ez egy 1-3 kW-os H-VAWT-nál tipikusan 1-8 m/s szélsébségnél adódik. Ezt leginkább a lapátok hosszával és a szélgenerátor átmérőjével lehet befolyásolni (esetleg a lapátok dőlésével és a profilhosszal is, de ily módon a változás nem számottevő), amelyek egy-egy típusnál adóttak.

A lapátok hosszának működés közbeni megváltoztatására nincs igazán műszaki lehetőség, viszont a körátmérőt (a szélgenerátor átmérőjét, fesztávolságát), speciális műszaki megoldással meg lehet változtatni működés közben, bár nincs olyan fellelhető típus a piacon, amely ezt a megoldást alkalmazza. Jelen fejlesztés ezt a piaci rést célozza egy olyan egyszerű mechanikai megoldással, amely nem jelent a gyártási költségekben számottevő növekedést.

A hatásmechanizmus leírása egyszerű: kis szél esetén nagy fesztávolságot alkalmazunk, hogy a generátor tengelyen nagy legyen a forgatónyomaték, így az kis szél esetén is elindul alacsony fordulatszámmal és így is marad amíg eléri a generátor az optimális fordulatszám-tartomány alsó határát. Az optimális fordulatszám tartományban a mechanika elkezd csökkenti az átmérőt, így a tartomány kitolható magasabb szélsébségre (akár 14-16 m/s körülire) és így megnövelhető az optimális működési tartomány és ezzel a hatásfok és a megtermelt energia mennyisége, főleg ha hozzávesszük, hogy a felső termelési küszöb akár a 25 m/s-ot is elérheti az általános 15-17 m/s

helyett. Egyéb járulékos nyereség, hogy így a termék élettartama is megnövekszik, hiszen a nagyobb tartományban elérhető optimális fordulatszám jobban kíméli a mechanikai alkatrészeket, illetve a csúcs-fordulatszám is alacsonyabb lesz, ami szintén hozzájárul ehhez.

Ennek a terméknek (vagy prototípusnak) a vezérlése is teljesen egyedi, mivel meg kell valósítani a feszítávolság állítást, ami miatt mérni kell a működési jellemzőket (szélsébség, fordulatszám, leadott teljesítmény) és ezek alapján működtetni az állító aktuátort.

Ebből a fejlesztés szempontjából leszűrhető legfontosabb információk:

- H lapátozású generátor
- 1 és 3 kW teljesítmény
- állítható körátmérő

A fejlesztés kiindulásaként érdemes megvizsgálni a piaci konkurenciát, hiszen egyrészt meghatározhatóak a fejlesztés alapjai, mivel a lapát magasság és a körátmérő befolyásolja a leginkább a leadott teljesítményt, másrészt a kivitelezés módjával kapcsolatban is nyerhetünk információkat. Alacsony szélsébségen összevethetőek a piacon megtalálható modellek a fejlesztési kívánnal, mivel csak azután következik be átmérő állítás, miután a generátor elérte (vagy közelébe ért) a legnagyobb teljesítmény-leadási ponthoz. A következő táblázatban összegyűjtésre került néhány konkurens termék, a vonatkozó alapadatokkal:

	500		1000		2000		3000		
	rotor magasság	átmérő	rotor magasság	átmérő	rotor magasság	átmérő	rotor magasság	átmérő	rotor db
AEOLOS	2000	1600	2800	2000			3600	3000	3
Kliux zebra 1800					3000	2360			
ROPATEC T vision 3kw (1,3kw)			2200	3300					2
BAIWIND	2500	4000	3500	5000	3500	7000	3000	5000	3;4
SoloVAWT-X			1830	1230					6
ELO			1300	1300					
alibaba GS-3kW							3700	2500	3
hi-vawt ds3000									
vaata									

A táblázatban szereplő VAWT generátorok mindegyike tipikusan 1,5-2 m/s sebességnél kezd el forogni és csúcsteljesítményüket 10 m/s körül éri el. Felépítésük, formájuk a következők is lehetnek:



A projekt szempontjából az egyszerűbb, H típus vizsgálata szükségszerű, mely a fent látható csavart lapátozással is elérhető. A táblázatból látható – bár jelentősebb átmérő és lapát méretek vannak – a tipikus és vélhető átmérő/lapáthossz arány. Emellett érdemes megemlíteni, hogy a névleges teljesítmény gyártónként változhat, tipikusan 10 m/s körül ez az érték, de találunk alacsonyabbat (8 m/s) és magasabbat is (14 m/s). Emiatt nehéz eldönteni mi a jó választás, ezért áramlástanai modellezésre lehet szükség.

Mindezek mellett számos irodalmi referencia is segítségül hívható a VAWT paraméterek meghatározásához:

IEC 61400-2 2nd Ed., Wind turbines – Part 2: Design requirements for small wind turbines, 2006.

Hansen, Martin O.L., *Aerodynamics of Wind Turbine*, Earthscan, 2008.

Matsumiya, H., *et al.*, Field Operation and Track Tests of SHWT “Airdolphine under High Wind Conditions, EWEC2008, 2008.

Szolgáltató partnerünk Szigethy Dezső vezetésével, számos kísérleti szélgenerátor fejlesztésben vett részt. Az ott szerzett tapasztalatok, nagy segítséget nyújtanak a jelenlegi fejlesztésben. A következőkben rövid áttekintést szentelünk ezekről a kutatásokról.

Spirál lapátos VAWT fejlesztése

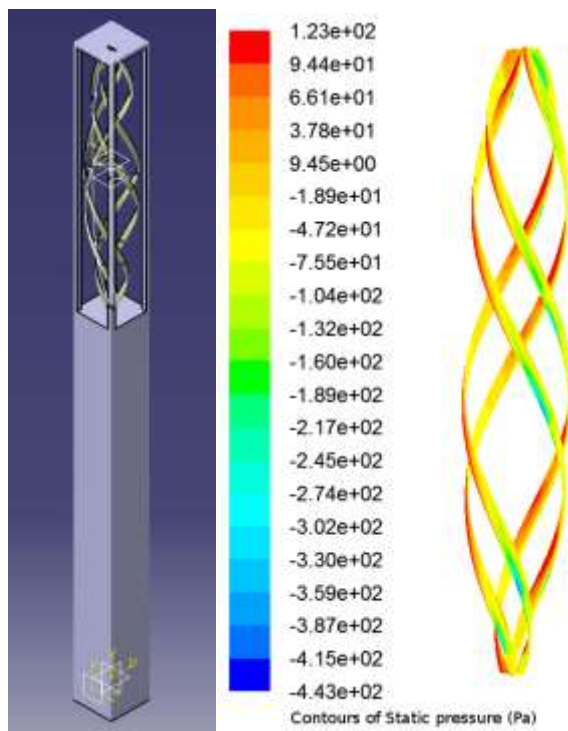
Az első koncepció amely az megrendelőtől érkezett a VAWT-62216 projektnevet kapta. A CFD szimuláció előtt diszkretizálásra került a generátor CAD modellje. A felületi hálót háromszög elemeket használva, átlagosan 9-11 mm élhosszúságú cellákból építettük fel. A térfogati háló a felületi hálóra épül ezért a felületi háló készítésekor oda kellett figyelni egyes minőségi követelményekre. Ilyenek például, hogy nem lehetnek túlságosan hegyes szögű háromszögek és nem megengedett a hirtelen méretbeli változás, különben a térfogati háló egyes elemei túlságosan

torzultak lehetnek, ami a számításokra is hatással van: rontja a pontosságot és destabilizálhatja a megoldási folyamatot.

A szimuláció peremfeltételei a valóságos rendszerhez mérten állítottuk be:

- 3 m/s majd 13 m/s szélesség,
- 101325 Pascal légköri nyomás,
- Levegő sűrűség 1,204 kg/m³,
- Hidraulikai átmérő: 6 m,
- A környezet határolófelületei „simmetry” típusúak, hogy ne legyen felületi letapadás,
- A szárnyak „wall” típusúak.

Csak a szárnyak kerültek diszkretizálásra jelen esetben, mivel a bemeneti adatok bonyolultsága miatt a tartószerkezet feleslegesen növelte volna a diszkrét elemek számát, így a számítás teljesítményigényét. A teljes modell 8,5 Millió elemet tartalmazott.



Csak a szárnyak kerültek diszkretizálásra jelen esetben, mivel a bemeneti adatok bonyolultsága miatt a tartószerkezet feleslegesen növelte volna a diszkrét elemek számát, így a számítás teljesítményigényét. A teljes modell 8,5 Millió elemet tartalmazott.

Minden egyes számítás 2000 iterációig tartott, ennél csak akkor kellett volna tovább, ha a reziduumok változása meghaladta a 0,1%-ot, de mivel a számítások 1300 iteráció körül konvergáltak, ezért erre nem került sor. Így a számítási idő 84 óra körül alakult.

A nyomásértékek vizsgálata alapján a xxxx-62216 modell esetében a forgatónyomaték 0,22 Nm 3 m/s szélsősebességnél, míg 4,6 Nm 13 m/s-nál. A CFD által meghatározható a lapáton ébredő nyomatékvektor iránya és így az origótól viszonyított távolságvektor és a tömegpont vektoriális szorzata a perdület, amely megadja a hozzávetőleges szögsebességet.

A fordulatszám és a nyomaték alapján számolható a rendszer teljesítménye, amelyet egy meglévő 14V-os referenciagenerátor (akkumulátor töltésre alkalmas) nyomatékgörbéjéhez hasonlítottunk.

A számítások alapján ezen változat teljesítménye kevéssé meghaladja az 300W-ot, 10 m/s szélsősebesség esetén. (Mivel itt a generátor és a szélkerék teljesítmény különbsége többszörös, ezért ez elméleti érték, hiszen ezt a generátor típust a forgatónyomaték alapján csak 4 m/s szélsősebesség felett tudja elindítani, ami a szélsősebesség eloszlásgyakoriságot figyelembe véve nagyon alacsony értéket adna a valóságban.)

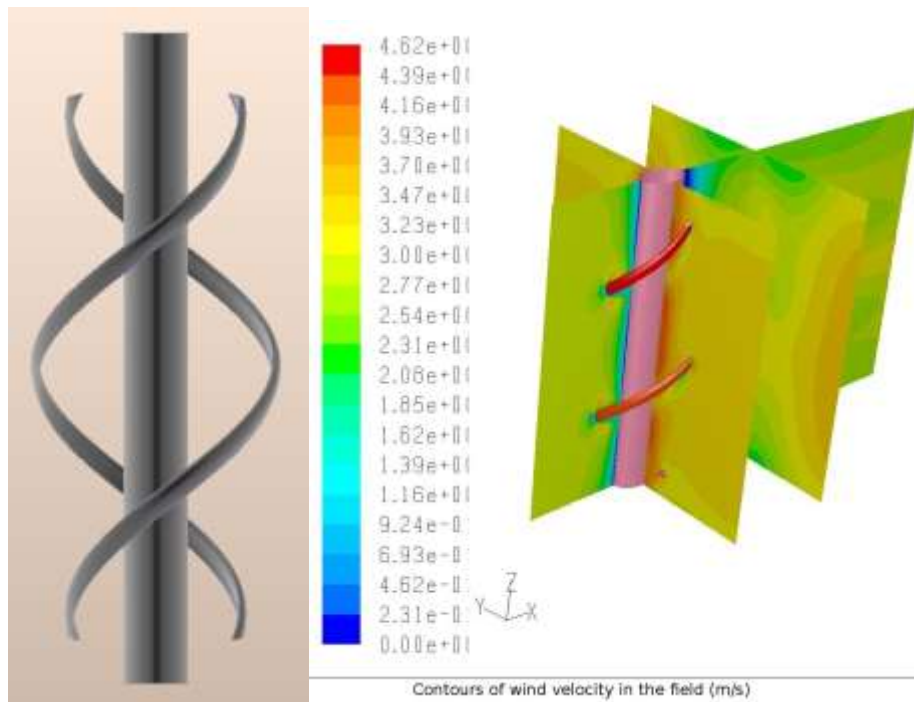
Kétpontos illesztés után egy másodfokú polinommal megadható a szélgenerátor jelleggörbéje, így számítható a teljesítmény a teljes széltartományra. $P_{sz} = 0,0063v^2 - 0,0017v$

A második változat CFD szimulációja: VAWT-702

Mivel a VAWT-62216 típusnál alacsony értékek adódtak a teljesítményre, így a teljes szerkezet átalakításra került. Az eredmények alapján a megbízott (R.C. Kft.) a rotorátmérő növelését javasolta, mivel ezzel növelhető leghatékonyabban a nyomaték. Az átmérő növelése viszont ebben a formában nem volt lehetséges, mivel a design-t alapvetően meghatározta. A megrendelő így a központi tartó mellett döntött, amelynek koncepció tervét át is adta.

A szimuláció az előzőekhez hasonló alapelvek mentén történt, azaz két számítás készült, 3 ill. 13 m/s szélsősebességnél.

A nyomatékok és a nyomatékvektorok meghatározása után a számítások szerint a VAWT-702 nyomatékgörbéje a következő összefüggés alapján számítható: $P_{sz} = 0,0507v^2 - 0,0246v$.

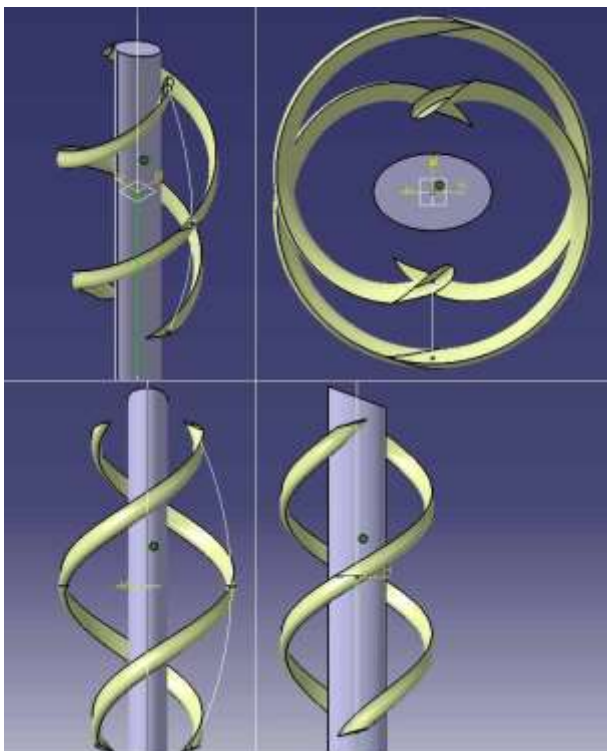


Így 10 m/s széltartományban a generátorhoz illesztett névleges teljesítmény 1800 W körül alakult.

Mivel az eddigiekben egy meg nem nevezett szárnyprofilt alkalmaztunk, a javaslatunk alapján az ilyen szélturbinák esetében használatos GOE435 profil használatával került áttervezésre a konstrukció, amely a feltételek szerint javíthat annyit a névleges teljesítményen, hogy elérjük a 2000 W-ot 10 m/s-os kívánt tartományban.

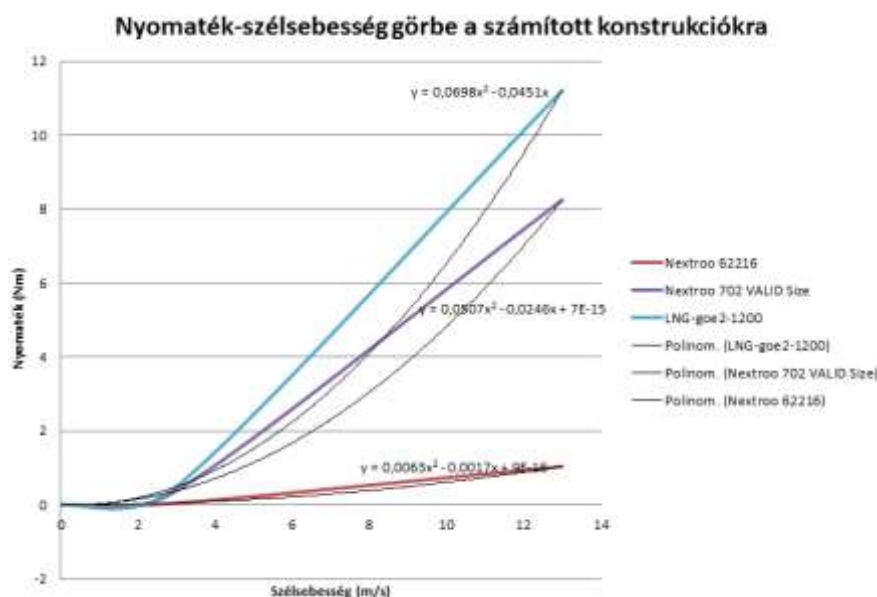
A harmadik változat CFD szimulációja: VAWT-GOE

A GOE profil alkalmazása mellett a rotorátmérőt a kívánt 1200 mm-en tartva, nagyobb, 280 mm profilhosszal modellezett lapátok kerültek betervezésre, amelyek az eddigi 185 mm (xxxx-702) helyett nagyobb felületen fogják be a szelet, és így nagyobb a vetített felület is, amely az aerodinamika alaptörvénye alapján [2] is nagyobb erőkart kell eredményezzen.



A számítások alapján a harmadik változat korábbi feltételek melletti vizsgálata során 10 m/s szélsébség esetén mintegy 2004 W névleges teljesítménnyel működhet.

A számítási eredményeket az alábbi diagram majd táblázat foglalja össze:



Táblázat: A két releváns modell teljesítmény-értékei a szélesség függvényében:

Szélesség		1	2	3	4	5	5,5	6	7	8	9	10	11	12	13
Nexroo 702 VAL size moment (Nm)		0	0,1536	0,3825	0,7128	1,145	1,398	1,6776	2,3121	3,048	3,8853	4,824	5,8641	7,006	8,2485
Teljesítmény a szélesség		0	57,31343	142,72	265,97	427,1	521,8	625,97	862,7239	1137	1449,73881	1800	2188,1	2614	3077,8
LNG-goe2-1200		0,0247	0,189	0,4929	0,9364	1,52	1,863	2,2422	3,1045	4,106	5,2479	6,529	7,9497	9,51	11,21
		7,581726	58,01402	151,3	287,43	466,4	572	688,25	952,934	1260	1610,85589	2004,093	2440,2	2919	3440,9
												18,80rad/s			

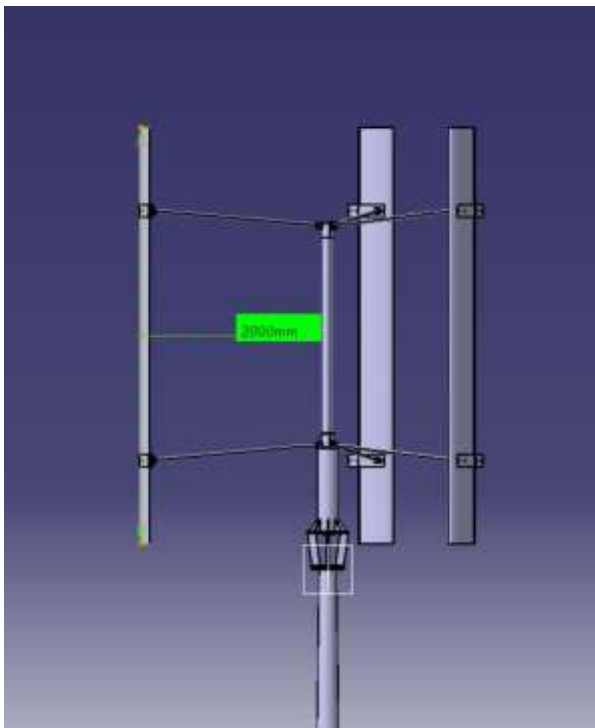
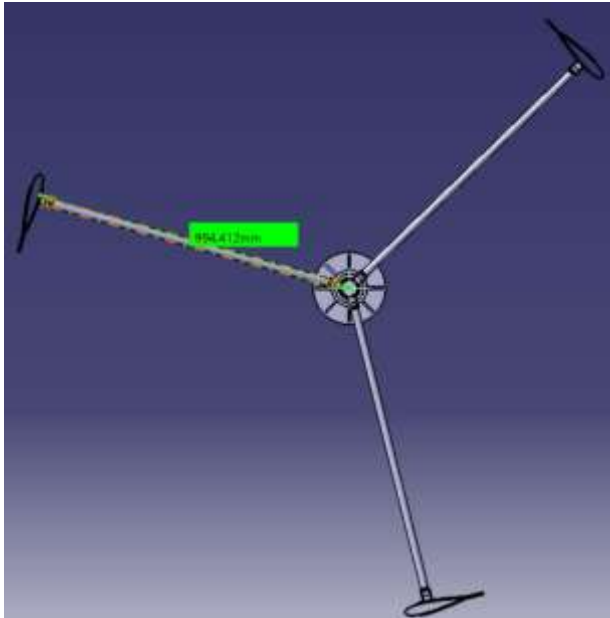
Ez alapján ez a forma tekinthető véglegesnek, így a továbbiakban meghatározásra került ugyanígy CFD-vel a méretezési szélesség-tartományban a szerkezetre ható erők. Két számítás készült 15 és 45 m/s sebesség beállításával. A 45 m/s a túlélési sebességnek felel meg amely esetén a teljes szerkezet nem szenvedhet tartós alakváltozást. Ezen szélesség esetén a teljes szerkezetre ható erők a szélesség irányában 2120 N és merőlegesen egyidejűleg 600N, amely a lapátok állásából adódik.

15m/s az a szélesség határ, ahol a szerkezetet fékezni kell (bár ez majd a gyakorlatban a tényleges fordulatszám ismeretében felülbíráható), és így, ezen sebességnél a szélteher okozta kihajlások nem okozhatnak működési rendellenességet.

Az korábbi fejlesztési tapasztalatokból levont következtetések alapján, már ezekre támaszkodva kezdtük el az állítható átmérőjű függőleges tengelyű szélgenerátor koncepciójának kidolgozását, amelyet egy egyszerű konstrukcióval vizsgáltunk áramlástani szempontból.

Egy VAWT szélgenerátor alapvető tulajdonságai a lapáthossz, az átmérő és a szárnyprofil húrhossz. Ezek a paraméterek határozzák meg a forgatónyomatékot, amelyből egyenesen következik a fordulatszám és az adott fordulatszámon levehető teljesítmény.

Az átmérő-lapáthossz kérdés eldöntése akkor lehetséges, ha áramlástanai vizsgálatokkal igazoljuk a nyomaték felépülését a szárnylapátokon. Alapvetően azt lehet látni a piaci vizsgálat eredményeként, hogy egy 2m átmérőjű, 2m lapáthosszal rendelkező generátor névleges teljesítménye 1-1.3 kW körök lehet. Emiatt, teszt céljából modellezésre került egy teszt-generátor, amelyen az áramlástanai paramétereket vizsgálni lehet. Ennek CAD modellje látható a következő ábrákon.



Ez a modell akár gyártható is lenne, de ennél tovább kell lépni az átmérő állítás szempontjait és műszaki megoldását biztosítva.

Koncepció áramlástani vizsgálatok

A modellezett szélgenerátor áramlástani vizsgálata készült el, amely igazolta a várakozásokat, amely szerint az illesztett generátor szerint, 1 – 1,3 kW teljesítmény adódik 10 m/s szélességnél. Fontos hangsúlyozni a generátor illesztés fontosságát, mivel típusonként más-más paraméterek szerint működnek, vagyis a nyomaték-fordulatszám paraméterekhez kell illeszteni a generátort, melynek kiválasztásában is segít az áramlástani modell.

Számítási módszer ismertetése

Egy villamos energiát termelő szélgenerátor legfontosabb tulajdonsága az általa produkált munka, vagyis a villamos generátorral átalakított és egységnyi idő alatt leadott villamos teljesítmény. Ez a teljesítmény függ a szélgenerátor formájától (feszítávolság, lapáthossz, az alkalmazott szárnyprofil, tartószerkezet alakja, stb.), a mechanikai-villamos átalakítás hatékonyságától (amelynek része a vezérlés is) és természetesen a szélesség nagyságától.

A névleges teljesítmény meghatározása tervezési fázisban hagyományos módon szélcsatorna vizsgálatokkal lehetséges, amelyhez meg kell építeni a szélgenerátor makettjét úgy, hogy azon méréseket lehessen végezni. A tervezést-modellépítést-mérést addig folytatjuk míg a megfelelő eredményeket nem kapjuk.

Egy másik módszer az amikor a digitális 3 dimenziós terveken a numerikus matematika segítségével végezzük el a vizsgálatot segítségül hívva a fizikai megmaradási törvényeket. Ezen módszer neve numerikus áramlástan (CFD – Computational Fluid Dynamics).

A CFD használatának módja ez esetben az lenne, hogy egy zárt térben (virtuális szélcsatorna) elhelyezzük a szerkezet CAD modelljét, majd a CAD geometriát előkészítjük a numerikus vizsgálatokhoz, amely a véges térfogatok módszerével történik. Ehhez a 3D teret az eredmények kívánt pontosságának megfelelően diszkretizáljuk, azaz létrehozuk a numerikus hálót. Az ily módon előkészített modellen alkalmazzuk a megmaradási törvényeket, amely során meg tudjuk határozni a tér nyomás- és sebességviszonyait, így a légnyomás eloszlását a lapátokon. A nyomásértékek elemzésével meghatározható a lapátra ható erők iránya és mértéke, és figyelembe véve a forgásközéppont távolsága, a tengelyre ható nyomaték is.

A nyomaték-szélesség görbéből meghatározható a rendszer karakterisztikája majd ennek illesztésével egy villamos generátor teljesítmény görbéjéhez, a közelítő névleges teljesítmény kb. 10% pontossággal, ahogy az egy valós makettkísérlet esetében is lenne amely pontatlanság abban az esetben a jelentős méretkülönbségből adódik. A CFD esetében a pontatlanságot az alkalmazott turbulenciamodellek egyszerűsített volta jelentheti, illetve a számítási kapacitás véges nagysága miatti diszkretizációs korlátok.

A vizsgálatok során kiderül, hogy a szélgenerátor milyen szélterületben működik, ehhez 1,2 és 3-53 m/s-ig, 10 m/s lépésként végzünk számításokat, továbbá átadásra kerülnek a magas szélterületben ható extrém erőhatások értékei is, melyek felhasználhatók a szerkezet tervezésénél a határértékek meghatározására.

A kiértékelt eredmények alkalmasak lesznek a szerkezet továbbfejlesztésére/javítására.

A CFD számítások elkészítése az alábbi munkafolyamatokból áll:

- 3D geometria „felkészítése”
- Felületi hálózás
- Térfogati hálózás
- Peremfeltételek megadása
- Gépi számítás elvégzése OpenFoam programmal
- Az eredmények kiértékelése
- Jelentés készítése.

A számítások 1:1 arányú modellel készülnek a Navier-Stokes egyenleteken alapuló programmal, megfelelő turbulenciamodellel használatával (k-omega SST).

A matematikai háttér ismertetése

Az egyfázisú áramlásokat legáltalánosabb formában 4 db., helytől és időtől függő ismeretlen függvényre felírt megmaradási egyenlet segítségével írhatjuk le. Az alapegyenletek megmaradási tétel alakjának szépsége, hogy a tömeg, az impulzus és az energia megmaradását azonos matematikai formában kezeli, amely általánosan is értelmezhető, ezek a Navier-Stokes egyenletek.

A Navier-Stokes (NS) egyenletrendszer írja le az egységnyi folyadék-térfogat mozgását. Szükséges volt az egyenletek egyszerűsítése, az analitikus megoldás megkönnyítése érdekében, ezért ideális folyadékkal számol a NS ($\mu = \text{áll.}$ és $\rho = \text{áll.}$):

$$\begin{aligned}\frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} &= g_x - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_x}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_x}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} &= g_y - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_y}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_y}{\partial z^2} \right) \\ \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} &= g_z - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + \nu \left(\frac{\partial^2 v_z}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 v_z}{\partial z^2} \right)\end{aligned}$$

A négy ismeretlen (v_x, v_y, v_z és p) meghatározásához szükséges negyedik egyenlet a folytonosság

$$\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$$

egyenlete, amely $\rho = \text{áll.}$ esetén a $\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} = 0$ alakban írható fel.

A műszaki gyakorlatban nemigen van szükség arra, hogy az áramlások időbeni változását is megfigyeljük, még akkor sem ha az áramlás turbulens, általában inkább csak az áramlási kép struktúrájára vagyunk kíváncsiak. Ráadásul ez a fajta időfüggő leírásmód nagyon számításigényes és bonyolult, ezért Reynolds levezette a NS egyenletrendszert időbeli átlagokra vonatkoztatva

(átlagsebességre és átlagnyomásra). Ezt nevezik Reynolds-averaged Navier-Stokes (RANS) egyenletrendszernek.

A modellezés során több turbulenciamodell alkalmazása jöhet szóba, amelyek azért kellenek mert a szélgenerátor lapátja (és az alkalmazott profil-forma) pont arra építenek, hogy az a lapát egyik oldalán alacsonyabb nyomás, míg a másik oldalán magasabb nyomásértékek alakuljanak ki, és így a nagy energiájú leválások a turbulenciaintenzitás értékét növelik. A szakirodalom alapján alapvetően két turbulenciamodell alkalmazható: a k-ε és a k-ω. [hivatkozás!!!] A k-ε turbulenciamodell a nevében említett két, a turbulencia leírására használt jellemzőt alkalmazza: a k a turbulencia kinetikus energiája, az ε pedig a turbulens kinetikus energia disszipációja, vagyis a turbulens kinetikus energia elnyelődése amikor az örvények mozgási energiája súrlódás útján hőenergiává alakul. A következő transzport-egyenletek jellemzik ezt a folyamatot:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \epsilon - Y_M + S_k$$

és

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \epsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \epsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\epsilon} \right) \frac{\partial \epsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\epsilon} \frac{\epsilon}{k} (G_k + C_{3\epsilon} G_b) - C_{2\epsilon} \rho \frac{\epsilon^2}{k} + S_\epsilon$$

ahol G a számított turbulens kinetikus energia (k – sebesség szerint, b – felhajtóerő alapján),

$$Y_M = 2\rho \epsilon M_t^2, \text{ és}$$

$$C_{1\epsilon} = 1.44, \quad C_{2\epsilon} = 1.92, \quad C_\mu = 0.09, \quad \sigma_k = 1.0, \quad \sigma_\epsilon = 1.3$$

- konstansok

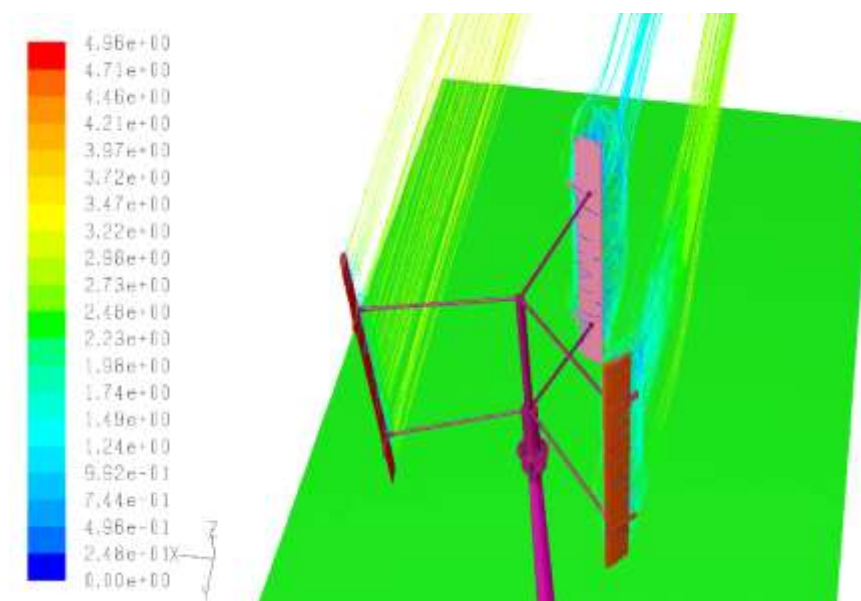
A standard k-ε a legrégebben használt turbulenciamodell. Két transzportegyenletet old meg külön-külön k-ra és ε-ra, amely lehetővé teszi a turbulens viszkozitás és a hosszlépték egymástól független meghatározását. Félig tapasztalati modell, mivel a k transzportegyenlete egy egzakt egyenletből egyszerűsítő feltételezésekkel származik, míg az ε transzportegyenlete a k egyenlet alapján készült dimenzió megfontolások alapján. A „Realizable” vagy magyarul megvalósulható k-ε modell két alapvető dologban különbözik az előzőtől:

- a turbulens viszkozitás meghatározására új egyenletet használ
- ε transzportegyenlete egzakt egyenletből elhanyagolásokkal és különböző feltételezésekkel lett levezetve.

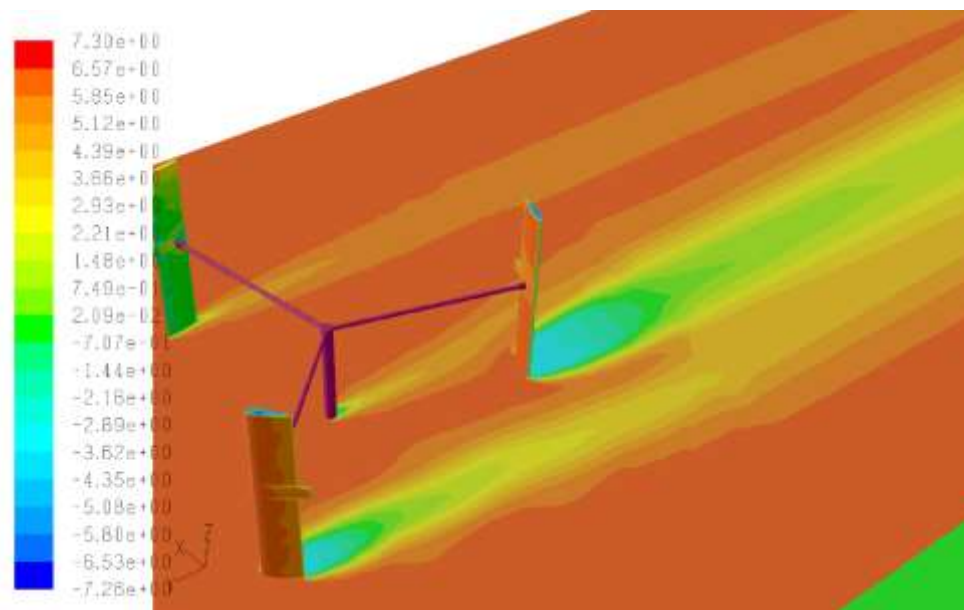
Azért hívják megvalósulhatónak, mert a modell kielégíti az egyes matematikai kényszereket a húzófeszültségek esetében a turbulens áramlások fizikájának megfelelően. Ez egy korszerű k-ε modell, így turbulens áramlások esetén pontosabb eredményeket szolgáltathat. A fő áramlás turbulens jellegére jelentős hatással van a fal jelenléte, illetve a fal menti határréteg, ezért a falközelbeli áramlás modellezése jelentősen befolyásolja a számítás pontosságát. A faltól távolodva az áramlás turbulens kinetikus energiája gyorsan nő, ennek következtében az áramlás pontos reprezentációja a fal mentén igen fontos. A Spalart-Allmaras és a k-ω modellek alapvetően a lamináris és az átmeneti réteg felbontására lettek kifejlesztve, ezzel szemben a k-ε modellnél nem ez volt az eredeti fejlesztési

koncepció, így a falközei zónát ismételtten modellezni kell. A falközei áramlás modellezésére kétféle módszert kínál a Fluent program: az egyik, hogy falfüggvénnyel számítja az áramlást a határréteg logaritmikus részében, úgy, hogy a lamináris alapréteg és az átmeneti réteg egy réteget alkot. A másik módszer pedig, hogy egy falközei modellel (Enhanced Wall Treatment) a lamináris alapréteget is külön megoldja, ehhez viszont a számítási igényt megnövelő részletes határréteg háló kell. A k - ω modell ϵ helyett ω -ra old meg egyenletet (ez a turbulencia második paramétere), ahol ω örvényfrekvencia fizikai tartalma megfelel ϵ/k -nak. A fal közelében kedvezőbben viselkedik a k - ϵ modellnél, viszont a szabad áramlásban rosszabb, ezért például az SST modell változat valójában a határrétegen kívül k - ϵ modellt old meg.

A modellezett szélgenerátor áramlástani vizsgálata készült el, amely igazolta a várakozásokat, amely szerint az illesztett generátor szerint, 1 – 1,3 kW teljesítmény adódik 10 m/s szélsébségnél. Fontos hangsúlyozni a generátor illesztés fontosságát, mivel típusonként más-más paraméterek szerint működnek, vagyis a nyomaték-fordulatszám paraméterekhez kell illeszteni a generátort, melynek kiválasztásában is segít az áramlástani modell.



A fenti ábrán 5 m/s szélsébség mellett láthatóak a lapátokról leváló levegő áramvonalai.

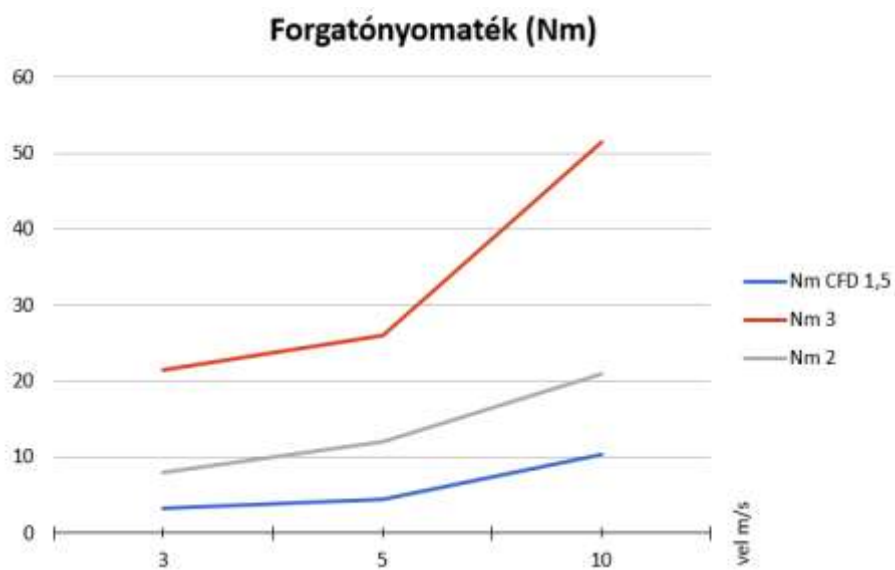


Az ábra a 10 m/s sebességnél kialakuló nyomásviszonyokat mutatja.

Ezek alapján, számos paramétert megvizsgálva adódik a következő táblázatban összefoglalt számítás eredménye:

Turbine diameter D (m) *	1,3	2,4		1,3		1,5		1,8	3	
H turbine height (m) *	2	2		3		3		3	3	
C blade width (m) *	0,2	0,2		0,3		0,3		0,3	0,3	
Number of blades *	3	3		3		3		3	3	
Wind speed (m / s) *	10	10		10		10		10	10	
turbine square meters area A = D * H	2,6			3,9		4,5		5,4	9	
Soundness turbine s *	0,46	0,25		0,69		0,6		0,5	0,3	
$s = (n * C) / D$										
TSR approximate value at which maximum power is achieved	2	2,94		1,56		1,7		1,9	2,62	
speed turbine	300	234		230		220	-23 rad/sec	200	170	
turbine efficiency cp	0,33	0,34		0,23		0,28		0,32	0,35	
Power generated (w)	514	980		538		756		1027	1900	

Itt már a forgatónyomaték is meghatározható, a példában 3, 2 és 1,5 m átmérőt láthatunk, 3, 5 és 10 m/s szélességnél:



Ahogy az előzőekben, CFD segítségével került meghatározásra az alkalmazható szárnyprofil tulajdonsága, amely ugyan kevésbé befolyásolja a teljesítmény leadást, de fontos megvizsgálni mennyit jelent hatásfok szempontjából, illetve következtetni lehet a vizsgálatok eredményéből az aeroakusztikai tulajdonságokra, amely a vállalásban is szereplő zajhatás minimalizálását is figyelembe veszi. A következő táblázat ennek a vizsgálatnak az eredményeit mutatja GOE és NACA profilokat vizsgálva:

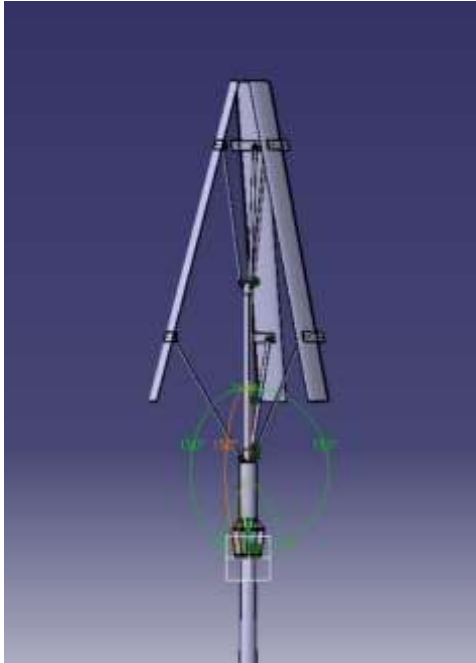
FORGATÓNYOMATÉK CFD

	1000		2000		3000		<--átmérő (mm)
naca 015 20cm	irány1	irány2	irány1	irány2	irány1	irány2	
3m/s	0,21	0,23	0,45		0,78		
5m/s	0,62	0,71	1,35		2,		
10m/s	2,75	3,1	5,9		8,9		
goe435 20 cm			rpm		rpm		
3m/s	0,39	0,23	25	0,75	64	1,34	
5m/s	1,12	0,8	125	2,44	107	4,25	
10m/s	4,55	3,87	250	10,9	214	18,43	
rotation 10m/s -30.4 rad/s	7,4		-26,18 rad/sec	13,28	-22,4 rad/sec	25,35	

A számításokból megállapítható a nyomaték, és a hozzávetőleges szögsebesség is a különböző szélesebségekre, amiket következetesen 3, 5 és 10 m/s értékekre vettünk fel. Ez alapján a GOE típus valamivel jobb eredményeket adott, amely a későbbiekben a tervezett szélgenerátor kapcsán már teljes konstrukció CFD számításokban kell igazolni. A GOE lapátnak a számítások szerint nagyobb a zajhatása, mivel a rövidebb élen tapasztalható leválások örvényeket generálnak.

Jelenlegi fejlesztés (ek) értékelése:

A 2018. októberében indult projekt első lépéseiként meghatározásra kerültek azok az irányelvek, melyek meghatározóak a kifejlesztett berendezés megvalósításában, az első mozzanatoktól az utolsóig. Meghatároztuk a projekt fázisait, azok tervezett időtartamát, a szükséges emberi erőforrásokat. Kutatásokat, számításokat végeztünk a projekt megvalósításával kapcsolatban, amelyek igazolták azt, hogy a tervezett szélgenerátorunk létjogosultságát nem kell megkérdőjeleznünk.

**A következő időszak várható fejlesztéseinek rövid leírása:**

A következő hónapokban a fenti tapasztalatok alapján kidolgozásra kerül a „variable VAWT” generátor koncepcionális mechanikai felépítése és a konkrét szerkezetre is elkészülnek az áramlástanai számítások, meghatározva azokat a paramétereket, amelyek a generátor illesztéshez szükségesek, vagyis az elektronikai tervezés kiindulópontjai.