

JEGES SZÁRNYALAK AERODINAMIKAI VIZSGÁLATA

Csőre Balázs^a, Kollár László^b, Fenyvesi Dániel^{c*}

^a ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, Gépészmérőki BSc, 4. évf.

^b ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, egyetemi tanár

^c ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, egyetemi docens

ABSZTRAKT

A kutatás témája szélturbina lapátmetszetek jegesedésének hatása az aerodinamikai tényezőkre. A lapátokon felhalmozódott jég akár 50%-os teljesítményvesztéshez is vezethet szélerőművek esetén. A vizsgálat tárgya a NACA négyjegyű szárnyprofil sorozat néhány tagja. A tanulmányban a jegesedést az ónos szitálásra jellemző körülmények okozzák, és a szimulációk kimutatják a lapát geometriájának és az állásszög változtatásának hatását a kialakult jég alakjára, valamint a jég alakjának hatását az aerodinamikai tényezőkre. A kapott eredményekből következtetni lehet arra, hogy az egyes lapátgeometriák esetén milyen mértékben romlik a lapát aerodinamikája jegesedés hatására, illetve, hogy a lapátprofil érdemes-e olyan területen használni, ahol a jegesedéssel számolni kell.

Kulcsszavak: aerodinamika, jegesedés, CFD, szárnyalak

1. Bevezetés

Azok a földrajzi helyek, amik a szélturbinák telepítésére optimálisak, nagyon gyakran ki vannak téve jegesedésnek. A szélturbinából kinyert teljesítmény a sebesség és a sűrűség növekedésével növekszik. Hideg éghajlaton az alacsony hőmérséklet a levegő nagyobb sűrűségét eredményezi, ráadásul ez gyakran párosulhat nagyobb szélesebbességgel is (pl. domboldal, tengerpart). Az ilyen vidékek tehát tipikus példái annak, ahol a szélturbinából kinyerhető teljesítmény mennyisége kedvező, ugyanakkor jegesedést okozó időjárás is gyakran előfordul. A jegesedett szárnyalak csökkenti a felhajtóerőt és növeli az ellenállásért, ezáltal jelentősen rontja a turbina teljesítményét, ezenkívül káros rezgéseket, illetve szerkezeti meghibásodást is okozhat [1]. A jegesedést a Ansys Fensap-Ice, az áramlást az Ansys CFX szoftver segítségével vizsgáltuk meg. A szimulációk időben állandóak voltak. A vizsgálat síkáramlást feltételez, amely így elhanyagolja a 3D lapát(rács) szekunder áramlás jelenségeit. [2] alapján, igényes tervezés esetén, az agytól távolabb az áramvonalak, már hengermetsetekre (primer áramlásra) jól illeszkednek.

Függőleges tengelyű szélturbina esetén, az agy felé, a profilvastagság fokozatosan növekedik mert a lapátnak szilárdsági követelményeknek is meg kell felelnie, továbbá kisebb sugáron a kerületi sebesség is kisebb, ami lehetővé teszi, hogy nagyobb húr hosszát és ezzel együtt vastagabb profilt alkalmazzunk. A lapátvég felé az áramlási jellemzők már kedvezőbbek, így ott kisebb húr hosszokkal és lapátvastagsággal is biztosítható a szükséges felhajtóerő. A konvencionális profilok közül igen elterjedt a NACA44XX és NACA63XXX sorozat alkalmazása, mert ezek a profilsaládok magas siklószám (C_l/C_d) értékkel rendelkeznek [3]. Az adott ellenállás erő esetén, a felhajtóerő értéke ekkor, fajlagosan nagyobb. A cikk ezért a NACA44 sorozat néhány tagját vizsgálja vastagság szerint, eltérő beállítási szög mellett.

1.1. Jegesedés folyamata

A jegesedést a szélturbina lapátokon a különböző típusú légtömegekben a túlhűtött vízcseppek okozzák melyeknek $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti a hőmérsékletük, viszont még nem kristályosodtak ki. Ezek a túlhűtött vízcseppek nekiütköznek a lapátoknak és azonnal megfagynak. Azonban nem minden egyes vízcsepp fog nekiütközni a lapátnak, hanem csak azok, amik elég nagyok ahhoz, hogy a tehetetlenségüknél fogva ne legyenek képesek követni az áramvonalakat. Azok, amelyek ütköznek, az ütközés pillanatában megfagynak, vagy elpattannak, vagy ütközés után szétfolynak, ezáltal különböző problémákat okozva. Megkülönböztethetünk jég típusokat: jégmáz (glaze), zúzmarás jég (rime), és ezeknek a keverékét (mixed) [4, 5].

A zúzmarás jég általában a lapát belépőélénél vastag, átlátszatlan és kevésbe veszélyes, mert „áramvonalasabb formája” van és kisebb sűrűsége. Ez annak a következménye, hogy az alacsony hőmérséklet vagy az alacsony folyékony víztartalom miatt abban a pillanatban, amikor a vízcsepp ütközik a felülettel, azonnal ráfagy, mielőtt újabb vízcsepp ütközne a felületnek. A zúzmarás jeget a száraz növekedés (dry growth) alakítja ki, amikor nincs folyékony víz a jégben, ezért kisebb a sűrűsége. Ez a jégtípus nagyon alacsony hőmérsékleteken lesz jelen (általában $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatt) és alacsonyabb víztartalomnál.

A másik jégtípus a jégmáz, ami a zúzmarás jégnél jóval bonyolultabb és modellezni is nehezebb. A jégmáz valamivel magasabb (fagyponthoz közeli) hőmérsékleten fog létrejönni, illetve magasabb folyékony víztartalomnál. A jégmáz a nedves növekedés jellemzi (wet growth), ekkor van folyékony víz a jégben. Ez a jégtípus szinte átlátszó, nagy sűrűségű és mindenféle alakzatot felépíthet a lapáton, szarvak jöhetnek létre és ezáltal ez jóval nagyobb mértékben rontja az aerodinamikai tulajdonságokat, illetve itt előfordulhat az is, hogy a lapátokról leesnek jégdarabok, mivel a nagyobb sűrűség nagyobb tömeggel fog járni [6]. Jiménez mind a három jégtípust vizsgálta [4]. Jelen kutatásban a jégmáz okozó ónos szitálás hatása lett vizsgálva különböző szárnyprofilvastagságok, és állásszögek mellett.

2. Szárnyprofil jegesedésének modellezése

Nagyon sok vizsgálat, cikk született már a jeges szélturbina lapátok következményeiről, magáról a jegesedés folyamatáról, modellezéséről. A modellezésnek, vizsgálatoknak több módját alkalmazzák. Ilyen a numerikus modellek alkotása, laboratóriumi kísérleti modellek fejlesztése, valamint kísérleti megfigyelések szélturbinákon. A következőkben néhány fontosabb, a jelen tanulmányhoz kapcsolódó vizsgálat összefoglalása olvasható.

Bose [7] 1990 telén egy 1,05 méter átmérőjű vízszintes tengelyű két lapátos akkumulátor töltésére szolgáló szélturbina jegesedést vizsgált. Jegesedést okozó ónos eső és ónos szitálás okozta jégmáz kialakulását tanulmányozta. A jég alakját úgy jegyezte le, hogy a kialakult jeges lapátra egy rámerőleges, középen lyukas táblát erősített majd arra egy papírt és körberajzolta a különböző alakokat eltérő lapátmetszeteken.

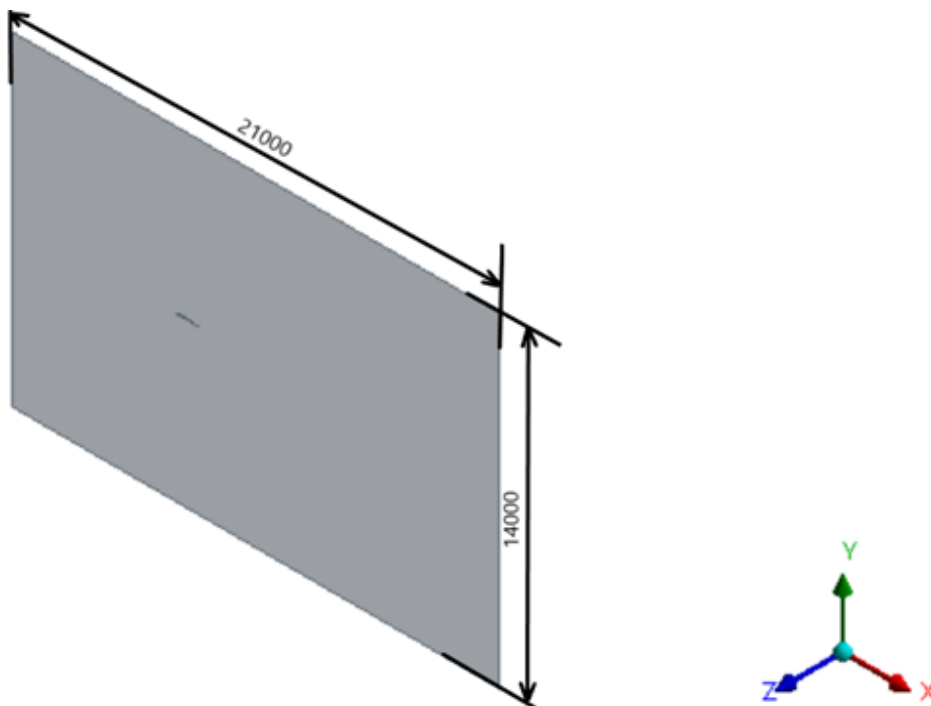
Több napon keresztül tartó, változó környezeti körülmények között végzett vizsgálatok során arra az eredményre jutott, hogy a lapátok belépő élénél alakult ki több jég, illetve a nyomott oldalon jött létre nagyobb tömegű jég, míg a szívó oldalon a lapát szinte jégmentes volt. A két lapáton felhalmozódó jég tömege körülbelül másfélszeresére növelte a rotor tömegét és a lapátok teljes térfogatát is növelte 80%-kal, ami lényegesen megváltoztatta a lapát aerodinamikai jellemzőit. Turkia et al. [8] a finn éghajlatra jellemző meteorológiai viszonyokat választva, módszert dolgoztak ki a jegesedés okozta szélturbina veszteségek becslésére, szintén numerikus módszerek segítségével. Shu et al. [9] vízszintes tengelyű szélturbina modell jegesedési jellemzőit és teljesítményét vizsgálták szélcsatornában, itt a jegesedést is mesterségesen biztosította a vizsgálatához. Az eredményük referenciát nyújtott a jégtelenítés tervezéséhez.

Kollér és Mishra [10] egy inverz lapáttervezési módszert használtak adott sebességeloszlás eléréséhez. A jegesedést is szimulálták, és figyelembe vették annak hatását a sebességeloszlásra. A jeges lapát körül kialakult áramlási viszonyokra is különböző numerikus szimulációkat használtak változó peremfeltételek mellett. Vizsgálták a jegesedés hatását az aerodinamikai együtthatókra, és azt találták, hogy a vázvonala nagyobb görbülete esetén kialakult jég kisebb mértékben csökkenti a felhajtóerőt és ellenálláserőt tényezőik hányadosát.

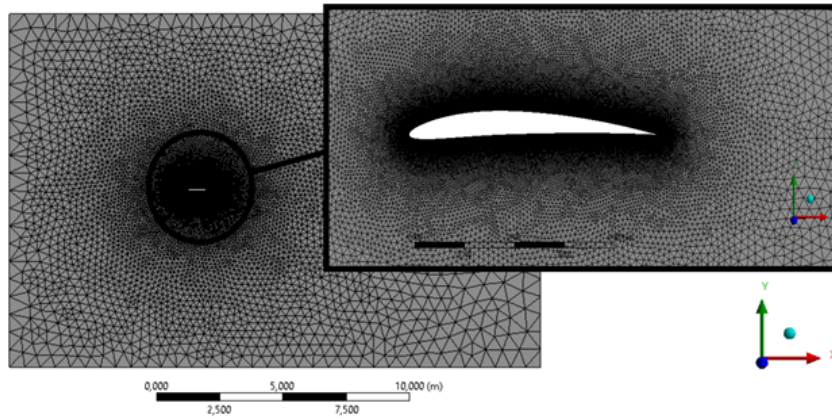
A jelenlegi munka fő feladata volt annak vizsgálata, hogy a szárny vastagságának és állásszögének növelése milyen hatással van az aerodinamikai együtthatókra, illetve a létrejött jég alakjára.

3. Áramlási tér modellje jeges és jégmentes esetben

A jeges és jégmentes lapát körül kialakuló áramlási teret az Ansys CFX szoftver [11] segítségével határoztuk meg. Az általunk vizsgált profilk a NACA 4 jegyű profilsalád néhány tagja volt. A 4 jegyű sorozat első két számjegye a vázvonala íveltségének maximumára és annak helyére utal a húr hossz mentén, míg a harmadik és negyedik számjegy a profilvastagságot adja meg a profil húr hosszának százalékában. A profilk aerodinamikájának és jegesedésének tanulmányozása a geometria és állásszög változtatásával történt. A geometria módosítása a szárnyprofilok vastagságának növelése volt a NACA 4404-től egészen a NACA 4430-ig. Az állásszög módosítása a NACA 4412-es profil esetében történt 0° és 15° között. A kutatás kétdimenziós síkáramlást feltételezett. Ennek megfelelően az áramlási tér egy téglalap alakú geometria közepén a szárnyprofilal. A tartomány méretei nagyon fontosak egy áramlástan szimuláció esetében, különösen a szárnyprofil utáni méret. A túl kicsi tartomány ugyanis hatással lehet a szárnyfelület körül kialakuló áramlásra, ezáltal torzítva a kapott végeredményeket (peremfeltétel érzékenység). Azonban a tartomány mértéktelen növelése csak a számítási igényt növelné. Az optimális tartomány méretet a különböző tartomány méretek esetén kapott számítási eredmények (max., min. nyomásérték, felhajtóerő, ellenálláserő) összehasonlításával határoztuk meg. Ahol már nem volt változás az értékekben, vagy csak elhanyagolhatóan kicsi (0,1%), ott megfelelőnek bizonyult a tartomány. Az ez alapján kapott tartomány méretei az 1. ábrán láthatóak.

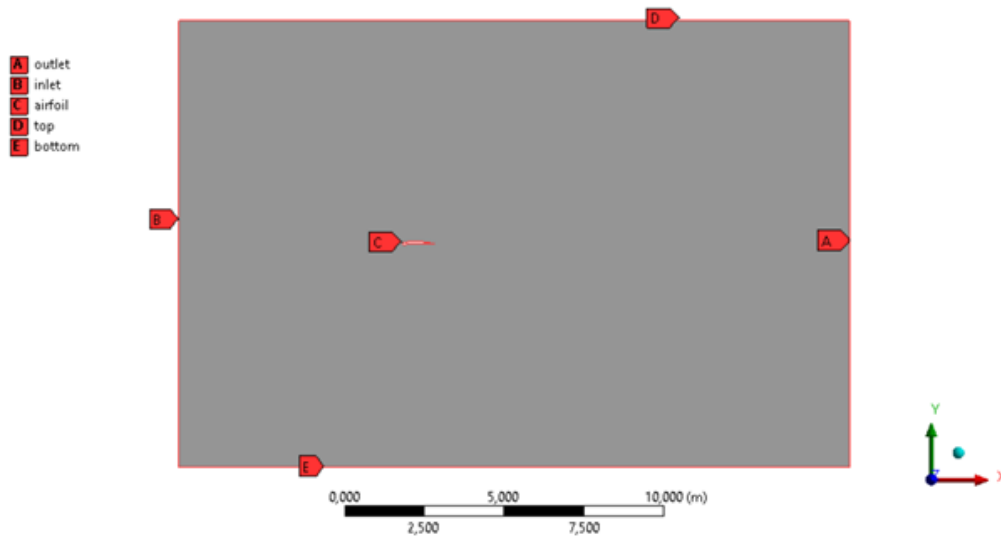


1. ábra: Az áramlási tér méretei mm-ben



2. ábra: Hálózott NACA 4408-as profil

A következő lépés az áramlási tér diszkretizálása, azaz a háló csomópontok létrehozása. A szoftver ugyanis a közelítő algebrai egyenleteket, a hálózott geometria csomópontjaiban oldja meg. A hálózási cella alakjának egy 2 dimenziós háromszög alakú hálót készítettünk, ami a szárnyprofil körvonala körül sűrűbb a pontos megoldás érdekében. A szárnykeresztmetszet körül egy határréteg hálót is létre hoztunk, ami egészen a lamináris alaprétegig fel lett bontva és 27 cella vastagon tart, 20%-os cellaméret növekedéssel. Erre azért volt szükség, mert a megoldáshoz egy alacsony Reynolds-számú turbulencia modellt használtunk fel, ami megköveteli a finom határréteg hálót (SST- Shear Stress Transport) [11]. Az áramlási tér meghatározásához használt hálózott geometria minta, a 2. ábrán látható [12]. A peremfeltételek definiálása miatt szükség volt a tartomány határainak felbontására és elnevezésére (Ansysban Named Selection), ez a 3. ábrán látható. A preprocesszorban kell definiálni a peremfeltételeket a különböző tartomány részekre. A belépő keresztmetszetre (3. ábrán inlet) egy a felületre merőleges 10 m/s-os megfűvási sebességet definiáltunk. A kilépés (3. ábrán outlet) egy "pressure outlet" típusú peremfeltétellel, 0 Pa-os relatív nyomással lett modellezve. A tartomány felső, alsó, illetve két oldalsó felülete (3. ábrán top és bottom) translációs szimmetriaként lett definiálva, azaz síkra merőlegesen a profil végtelen hosszú (síkáramlásból következik), ehhez a felső és alsó felületek translációs szimmetriával kapcsolódnak, így elkerülve a CFX „opening” peremfeltétel használatát. A szárny (3. ábrán airfoil) falként definiálva.



3. ábra: Számítási tartomány részei

1. táblázat: Ónos szitálást jellemző paraméterek

	Szélesség [m/s]	Hőmérséklet [°C]	Cseppfolyós víz-tartalom [g/m ³]	Közepes vízcsepp átmérő [μm]
Ónos szitálás	10	-5	1,5	62

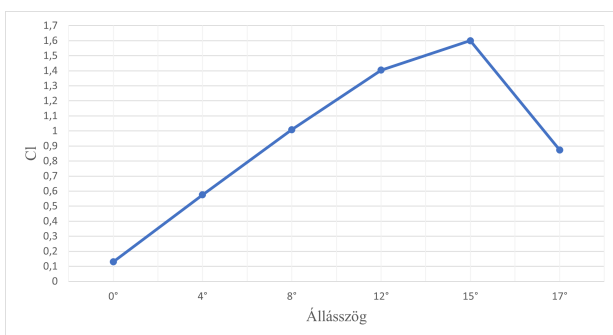
4. Jegesedés modellezése

A jegesedés folyamatát és annak következtében kialakuló jeges lapátalakot az Ansys Fensap-Ice szoftver [13] alkalmazásával modelleztük. A hálózott geometria ugyanúgy elengedhetetlen a jegesedést szimuláló szoftver használatához, aminek a jellemzői megegyeznek az előző fejezetben leírtakkal. A szoftverbe a szükséges környezeti és modell beállításokat követően egy Multi-Shot szimulációt futtatunk le, amivel egy folyamatos egymásra épülő jégtömeget lehet létrehozni. Az ónos szitálást előidéző környezeti paraméterek az 1. táblázatban láthatók. A megadott közepes átmérővel definiáltunk egy úgynevezett Langmuir-D vízcsepp eloszlást, ami hét különböző vízcsepp átmérőt feltételez [13].

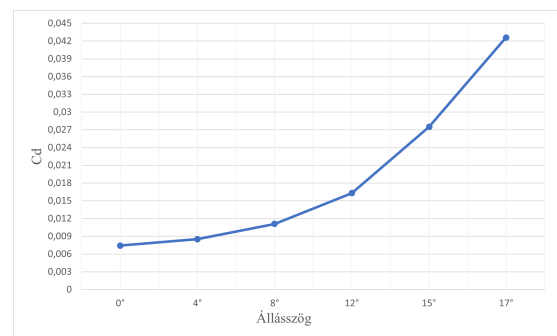
A Multi-Shot szimuláció áll egy áramlási megoldóból, ami meghatározza az áramlást a szárnyprofil körül. Ezután az áramlási mezőből a szoftver (Fensap-Ice) kiszámolja az ütközési hányadot, azaz, hogy mennyi és mekkora vízcseppek fognak nekiütközni a szárnynak. Következő lépésben a szoftver az előző folyamatoknál kapott eredményekből meghatározza a kialakult jeges alakot, a beállított, egy iterációs lépés jegesedési idejének megfelelően. Ezután következik a Multi-Shot szimuláció utolsó lépése, ami miatt folyamatos jégképződés jön létre. A szoftver a jeges alaknak megfelelően eltolja a kialakított hálót, majd a ciklus kezdődik előlről. Ez a folyamat addig tart, amíg az összes beállított iterációs lépés lefut. A jegesedési idő zérus állásszög esetében 60 min, nem zérus állásszög esetében 180 min volt.

5. A szimulációk hitelesítése

Mielőtt az eredményeket közölnénk, elvégeztünk egy validációs vizsgálatot, egy NASA által szélcsatornában kimért jégmentes profil segítségével [14]. A geometrián kívül minden beállítás megegyezik az általunk használt és 3. fejezetben már ismertett adatokkal. Ez által lehet következtetni az általunk használt modell megfelelőségére, és az eredmények pontosságára.

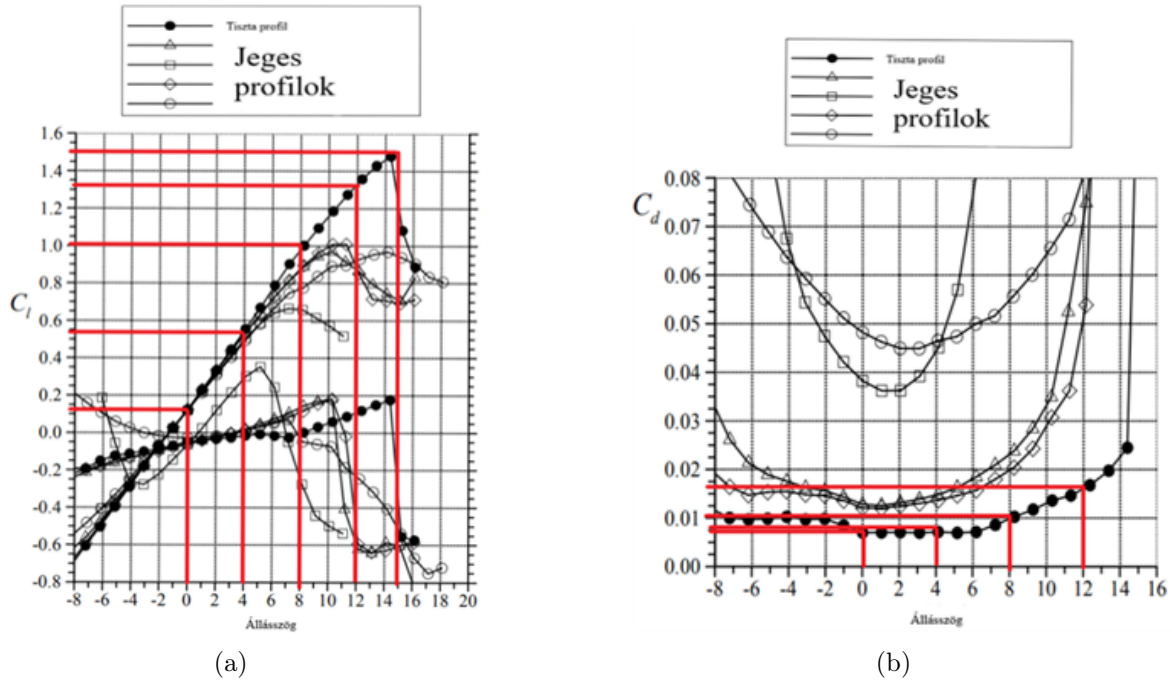


(a)



(b)

4. ábra: a) Felhajtóerő tényező változása NACA23012 profilon (CFD szimuláció),
b) Ellenállás-erő tényező változása NACA23012 profilon (CFD szimuláció)



5. ábra: a) Felhajtóerő tényező változása NACA23012 profilon (NASA) [14],
b) Ellenálláserő tényező változása NACA23012 profilon (NASA) [14]

5.1. Jégmentes szárnyalak áramlástanai szimulációjának hitelesítése

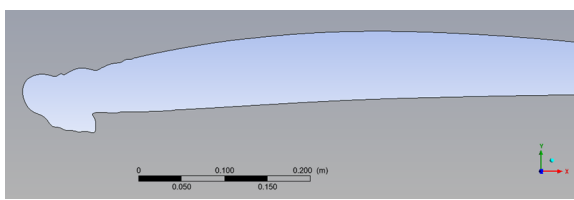
A CFD modell validációja a NASA által, szélcsatornában kimért NACA23012 jégmentes szárnyprofil felhajtóerő tényező [14], és ellenálláserő tényezőinek összehasonlítása alapján történt különböző állásszögek és $Re = 1,8 \cdot 10^6$ mellett.

A vizsgálatban az áramlás kétdimenziós. A jégmentes esetben a CFD szimuláció és a NASA által kapott diagramok a 4. és 5. ábrán láthatóak. A felhajtó- és ellenálláserő tényezők számításánál, az erő komponenseket osztással dimenziótlanjuk, így a nevezőben, a megfújási sebességből számolt dinamikus nyomást szoroztuk a húrhosszal, egységnyi profil kiterjedést feltételezve az áramlás síkjára merőlegesen.

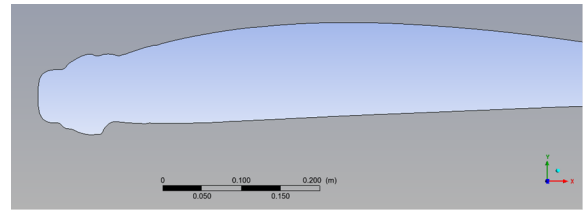
A diagramokon látható, hogy 17° -os állásszögig vannak kiszámítva az értékek a jobb szemléltetés érdekében, ami már a NASA által kapott eredményeken nincs feltüntetve azonban a tendencia követhető. Az eredményeken látható, hogy a CFD szimuláció által kapott értékek, és a NASA által kapott mérési eredmények (pirossal jelölve) közel 96%-os egyezést mutatnak [14]. Az általunk vizsgált modellek háló és peremfeltétel típus beállításai megegyeznek a validálás során használt modell beállításokkal. A háló beállítást, a vizsgálatunknál alkalmazott $Re = 7,75 \cdot 10^5$ mellett végeztük, ahol a lamináris alapréteg is felbontásra került. Mivel $Re_{krit} = 1,5 \cdot 10^5 \ll Re$ és a sebesség $\ll Ma = 0,3$, így a [14] hasonlóan, a modelleknél a szívott oldali depresszió csúcs után a turbulens határréteg felépül [15] és ezért a siklószám az Re -től függetlenedik [16]. Tehát a validált eredményekből és a szándékolt $y+$ megfeleléségből következik, hogy az általunk használt CFD modell beállítások megfelelőek.

6. Eredmények

A szárnyprofil áramvonalas test, azaz az ellenállását főleg a súrlódási erő (nyírófeszültség a felület mentén vagy határréteg áramlás) és kismértékben az alakellenállásból származó erő (nyomáskülönbség a test előtt és után) determinálja. A felhajtó erő a turbina kerék hajtásához szükséges nyomattékkal arányos. A lapátra ható eredő erőt a CFX felületi nyomásból számolja, vetületei a felhajtó és ellenálláserő páros (y és x irány). „Egy szárnyprofil feladatának annál jobban megfelel, minél kisebb

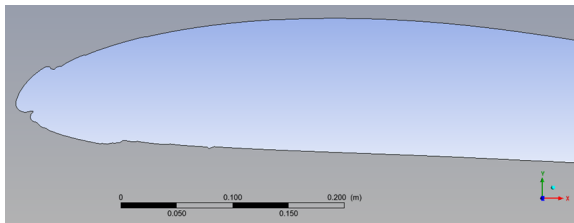


(a)

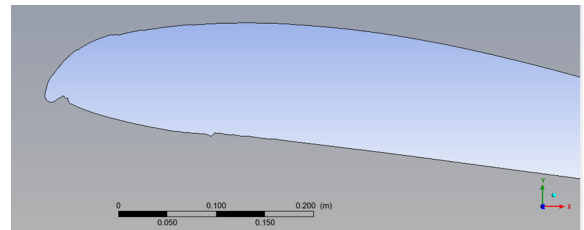


(b)

6. ábra: a) NACA 4408-as jeges profil (zérus állásszög), b) NACA 4412-es jeges profil (zérus állásszög)



(a)



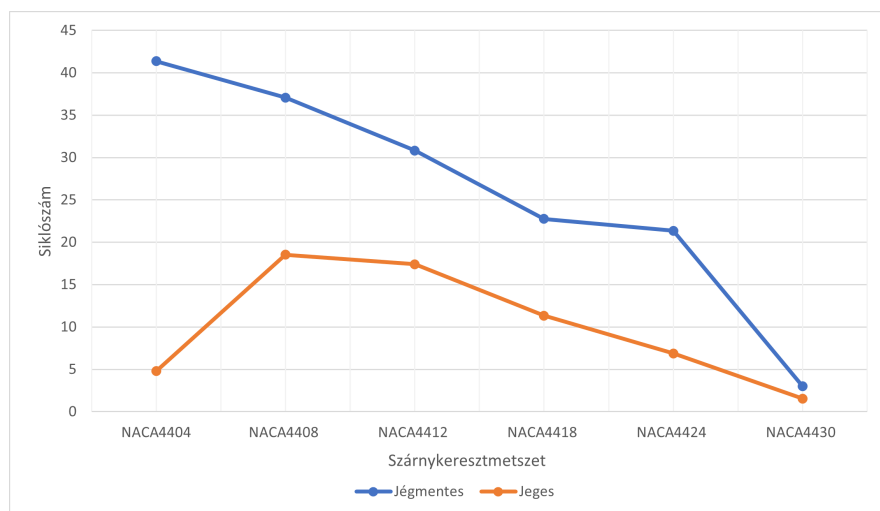
(b)

7. ábra: a) NACA 4412 jeges profil (5° állásszög esetén), b) NACA 4412 jeges profil (10° állásszög esetén)

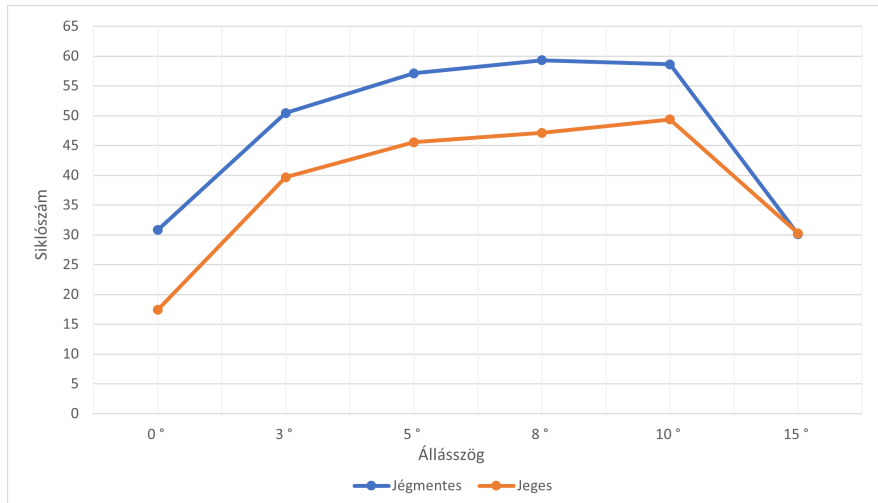
az ellenállása a felhajtóerőhöz képest.” [17] Ez a tulajdonság a siklószámmal fejezhető ki. A szimulációk eredményeként kapott néhány jeges profil látható a 6. és 7. ábrán. A 6. ábrán különböző profilokon kialakuló jégalakok hasonlíthatók össze, míg a 7. ábrán különböző állásszögek esetében kapott jeges profilok láthatók.

A számszerű eredményeket két diagram mutatja be. A 8. ábrán zérus állásszög mellett látható a geometria változtatás hatása a siklószámra (vagyis a felhajtóerő tényező és az ellenálláserő tényező hányadosára) mind jeges mind jégmentes esetben. Jégmentes esetben, a siklószám csökkenő tendenciát mutat a lapát vastagságával. A várakozásnak megfelelően a siklószám, a jeges profilok esetén kisebb, mint jégmentes esetben, de a jég a csökkenő tendenciát is befolyásolja. Vékony profilok esetén a siklószám kezdetben növekszik, majd vastagabb profilok esetén csökken.

A 9. ábrán a NACA 4412-es profil jeges és jégmentes profil állásszög változtatásának hatása látható a siklószámra. A jég az állásszög függvényében a siklószámra kapott tendenciát csak kis mértékben befolyásolja, de az értékét jelentősen csökkenti a jégmentes esethez képest.



8. ábra: Szárnykeresztmetszet vastagság növelésének hatása jégmentes és jeges lapátprofilok esetén (zérus állásszög mellett)



9. ábra: Állásszög növelésének hatása jeges és jégmentes esetben (NACA4412)

7. Következtetések

A diagramokból levonható további tudományos következtetések az alábbi pontokba foglaltuk össze:

1. A vizsgált legvastagabb NACA 4430 profil esetén, a jég jelenléte, csak jelentéktelen változást okozott a siklószámon, zérus állásszög mellett (8. ábra). Ennek oka, hogy a vastagabb profil tompább test (áramlás irányára merőlegesen a kiterjedése nagyobb), mint pl. a szintén vizsgált vékonyabb (áramvonalasabb) NACA 4404 profil. Ezért a NACA 4430 profilnál a jég felhalmozódás aerodinamikai degradáló hatása mérsékeltebb.
2. Zérus állásszög mellett, a jégmentes NACA4418 profil közel azonos siklószámot produkál, mint a vastagabb NACA 4424 profil (8. ábra). Jéglerakódás esetén ugyanakkor, a NACA4424 siklószám csökkenése már nagyobb szemben a NACA 4418-cal. Így, ha a szilárdsági szempontok nem indokolják a NACA 4424 profil alkalmazása jegesedésre hajlamos helyen nem célszerű, a vizsgált állásszög tartomány közelében.
3. A jeges környezetben és zérus állásszögnél a vastagabb (tompább) NACA4408 nagyobb siklószámot produkál, mint a vékonyabb NACA 4404 profil (8. ábra). Ez a tulajdonság ellentétes a jégmentes siklószámok alakulásával. Továbbá a jeges konfigurációnál a NACA 4412 siklószáma alig romlik a NACA 4408 siklószámához képest, míg a jégmentes profil esetén az eltérés jelentősebb. Ezeknek az az oka, hogy a vastagabb profil felületén kialakult jégalak itt „áramvonalasabbá” teszi a profilt úgy, hogy a jeges felület barázdáit kisméretű leválások töltik ki. Az így keletkezett pangó tartományok fölött folyékony nyíróréteg alakul ki, ami, mint határoló felület viselkedik, e fölött a főáramlás már folyamatos.
4. A jeges NACA4412 profil esetén még a 10° beállítási szögig siklószám növekedés figyelhető meg a jégmentes profillal szemben, ahol a maximum 8° körül van (9. ábra).

A kutatásban az elért eredmények alapján következtetéseket lehet levonni, hogy különböző lapátgeometriák esetében mekkora jégtömeg fog kialakulni ónos szitálásra jellemző körülmények között, illetve, hogy az állásszögnek mekkora a hatása a kialakult jég alakjára és tömegére. Megállapítható továbbá, hogy a vastagabb profilokra kapott siklószámok jégmentes esetben kisebbek, mint a vékonyabb profilokra kapott értékek, ugyanakkor értékének csökkenése jég hatására már kisebb mértékű.

8. Köszönetnyilvánítás

A TKP2021-NVA-29 számú projekt az Innovációs és Technológiai Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a TKP2021-NVA pályázati program finanszírozásában valósult meg.

9. Irodalomjegyzék

- [1] O. Parent, A. Ilnica, *Anti-icing and de-icing techniques for wind turbines: Critical review*, Cold Regions Science and Technology 65, 2011, pp. 88-96, [CrossRef](#)
- [2] W. Bohl, W. Elmendorf, *Strömungsmaschinen 1*, Vogel, 2013, pp. 235, Bild 10.19
- [3] R. Gasch, J. Twele, *Wind Power Plants*, Springer, 2012. [CrossRef](#)
- [4] T. Reid, G. Baruzzi, I. Ozcer, D. Switchenko, W. G. Habashi, *FENSAP-ICE Simulation of Icing on Wind Turbine Blades, Part 1: Performance Degradation*, 51st AIAA Aerospace Sciences Meeting including the New Horizons Forum and Aerospace Exposition, Grapevine, 2013, TX, AIAA 2013-0750, [CrossRef](#)
- [5] I.B. Jiménez, *Detection and removal of wind turbine ice*, MSc Thesis, University of Gavle, 2018.
- [6] S. Barber, Y. Wang, S. Jafari, N. Chokani, R.S. Abhari, *The Impact of Ice Formation on Wind Turbine Performance and Aerodynamics*, Journal of Solar Energy Engineering 133(1):011007, 2011. [CrossRef](#)
- [7] N. Bose, *Icing on a small horizontal-axis wind turbine, Part 1: Glaze ice profiles*, Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics 45, 1992, pp. 75-85, [CrossRef](#)
- [8] V. Turkia, S. Huttunen, T. Wallenius, *Method for estimating wind turbine production losses due to icing*, VTT Technology 114, Finland, 2013, [url](#)
- [9] L. Shu, J. Liang, Q. Hu, X. Jiang, X. Ren, G. Qiu, *Study on small wind turbine icing and its performance*, Cold Regions Science and Technology 134, 2017. pp.11-19, [CrossRef](#)
- [10] L.E. Kollar, R. Mishra, *Inverse design of wind turbine blade section for operation under icing conditions*, Energy Conversion and Management 180, 2019, pp. 844-858, [CrossRef](#)
- [11] ANSYS Inc., *ANSYS CFX Reference Guide*, Canonsburg, 2020.
- [12] Lajos T., *Az áramlástan alapjai*, Budapesti Műszaki Egyetem Áramlástan Tanszék, Budapest, 1992.
- [13] ANSYS Inc., *ANSYS FENSAP-ICE User Manual*, 2020.
- [14] B. Michael, A. Broeren, H. Addy, M. Potapczuk, D. Guffond, E. Montreuil, *Airfoil Ice-Accretion Aerodynamics Simulation*, 45th AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, Nevada, 2007, [CrossRef](#)
- [15] B. Eckert, E. Schnell, *Axial- und Radialkompressoren*, Springer, 1981.
- [16] F.A. Morrison, *An Introduction to Fluid Mechanics*, Cambridge, 2013.
- [17] Czibere T., *Áramlástan*, NTK, 2007.