

SZÉLERŐMŰLAPÁTOK JEGESEDESE OKOZTA PROBLÉMÁK, A JEGESEDEÉS MODELLEZÉSE

ICING PROBLEMS OF WIND TURBINE BLADES, MODELLING OF ICING

Dr. Bolló Betti*, Tollár Sándor**

ABSTRACT

A significant proportion of the world's wind turbines, more than 30%, are installed in cold climates. Ice accretion on turbine structures can lead to a severe reduction in turbine energy production. The ice accretion increases the structural load and can also cause safety problems due to large ice particles falling off rotating turbine blades. Therefore, the study of wind turbine icing is receiving increasing attention. The modelling of icing and its effects is a complex task. By reviewing the relevant literature, we present the meteorological background and the factors influencing the formation of ice shapes. Simulation and empirical investigation options are described.

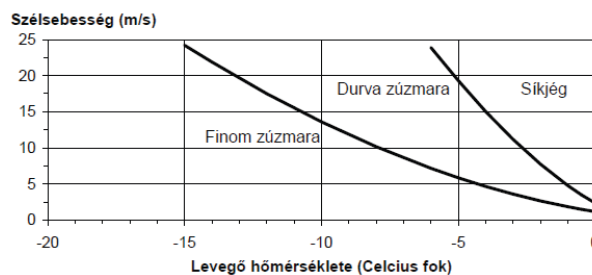
1. BEVEZETÉS

A világon egyre nagyobb számban telepített szél-turbinák jelentős része, több mint 30%-a hideg éghajlaton üzemel [1]. Ezen kívül a mérsékelt égövi szél-turbinák esetében is kialakulhatnak jegesedést okozó időjárási körülmények. A turbinaszervezeteken kialakult jégfelhalmozódás a turbinák energiatermelésében komoly csökkenést eredményezhet [2-5]. A kialakult jég szerkezeti terhelés növekedést jelent és biztonsági problémákat is okozhat a forgó turbinalapátokról leváló nagy méretű jégdarabok lezuhanása miatt [6-8]. Ezért egyre nagyobb figyelmet kap a szél-turbinák jegesedésének vizsgálata. A jegesedés és hatásának modellezése összetett feladat. A vonatkozó irodalom áttekintésével bemutatjuk a jégrétegek kialakulásának meteorológia háttérét és a befolyásoló tényezőket. Ismertetjük a szimulációs és empirikus vizsgálati lehetőségeket.

2. JÉGKÉPZŐDÉS A FELÜLETEKEN

Jég akkor képződik, amikor a túlhűtött vízcseppek vagy köd ráfagy a felületekre. A szél-turbinák jegesedési problémáit légköri jegesedési szituációk közül a felszínközeli jegesedés jelenti. A légköri jegesedést hagyományosan kétféle képződési folyamat alapján osztályozzák: felhőn belüli jegesedés és csapadékból

származó jegesedés. A mi esetünkben a csapadékból származó felszín közeli jegesedést kell figyelembe venni. Felszíni jegesedés alatt értünk minden olyan esetet, amikor a felszín tereptárgyain mikro- vagy makrocseppek által jeges lerakódás képződik. A csapadék lehet zúzmara, köd, ónos eső vagy tapadó hó. A kialakuló jég fajtája függ a szélsébségtől és a környezeti hőmérséklettől is, ez látható a 1. ábrán [9].



1. ábra: A kialakuló jég fajtái [9]

Meteorológiai szempontból három alapvető jégtípust különböztetnek meg, melyek fizikai tulajdonságaikban is különböznek egymástól:

- A finom zúzmara képződmények fehér jégtűk és pikkelyek megjelenését mutatják; törékenyek és könnyen lerázhatók a tárgyokról.

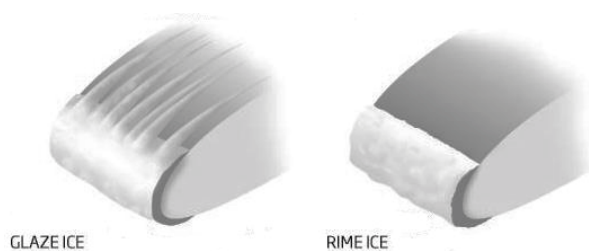
- A durva zúzmara akkor képződik, amikor a ködben lévő vízcseppek a tárgyak külső felületéhez fagnak.

- A síkjég, vagy mázas jég, sima, átlátszó és homogén jégbevonat, amely akkor keletkezik, amikor fagyos eső vagy szitálás esik a felületre.

A zúzmara jeget a nemzetközi szakirodalom *rime ice*-nek nevezi, míg a mázas jeget *glaze ice*-nek. A jégfajták közti különbség látható az 2. ábrán. A földfelszín közelében a mázas jég a fagyos esőcseppek felületre fagyásából alakul ki, míg a zúzmara jégképződést általában a túlhűtött köd okozza. A mázas jégképződés egyik tipikus megjelenési formája látható az ábra bal oldalán, amikor a repülőgép szárny, vagy a szél-turbina lapát belépő éléről a csapadék egy része az áramlás

*egyetemi docens, ** mesteroktató, Miskolci Egyetem, Energetikai és Vegyipari Gépészeti Intézet, Áramlás és Hőtechnikai Gépek Intézeti Tanszék

irányába folyva fagy meg. Az ábra jobb oldalán a zúzmarás jég látható.



2. ábra: jégformák szárnyprofilokon (NewScientist)

3. A SZÉLTURBINA ROTORLAPÁTOK JEGESEDESÉNEK KÖVETKEZMÉNYE

A jég lerakódása a turbinalapátokon jelentős mértékben megváltoztatja annak áramlástani profilját, ezáltal drasztikusan befolyásolja a működés szempontjából kiemelten fontos aerodinamikai jellemzőket. A felhajtóerő csökkenését és az ellenállásnövekedést idéz elő, ami a hideg éghajlati turbinák esetében éves szinten akár 50%-os termelési veszteséget eredményezhet [10]. Ezenkívül az egyenetlenül eloszló jégszerkezet többlet terhelést jelenthet a turbina szerkezetére, illetve élrezgések és kiegyensúlyozatlanság léphet fel, ami lerövidítheti a szélturbinák élettartamát [11, 12]. Egy 2014-ben megjelent átfogó értékelés a jég okozta teljesítménycsökkenésről és szerkezeti degradációról egy szimulált NREL 5 MW-os turbináról készült [13]. A tanulmány akár 35%-os összteljesítményvesztést és a névleges teljesítmény 11 m/s szélességről 19 m/s-ra történő eltolódását mutatta ki, hasonlóan más tanulmányokhoz [2, 14].

4. A TURBINALAPÁTOK JEGESEDESÉNEK SZIMULÁCIÓJA

A jegesedési jelenségek megismerésének és modellezhetőségének fontos szerepe van többek között az egyre elterjedtebb szélenergia villamos energia termelésének veszélyeztetése miatt. A kutatások a XXI. század elején kaptak nagyobb lendületet. A kezdeti kutatások L. Makkonen és E. P. Lozowski nevéhez fűződnek, akik több publikációban is összefoglalták a megelőző évtizedek jegesedésre vonatkozó előrejelzési kísérleteit [15-17]. A pontosabb szimulációs modellek fejlődését szintén L. Makkonen és E. P. Lozowski munkája indította jegesedés folyamatának fizikai részleteit is figyelembe vevő modellek fejlesztésével [9].

4.1. Jegesedés szimulációja a szélturбина lapátokon

A turbinalapátok jegesedésének hatását tapasztalati úton vagy szimuláció segítségével lehet meghatározni. A

lapátgeometria változtatása esetén a különböző jegesedési körülmények sokrétűsége miatt a teljes tapasztalati adatgyűjtés szinte kizárt. A szimulációs vizsgálatok helyességének megállapítása nehéz feladat. Bár a hasonló problémát jelentő repülőgépszárnyak jegesedésvizsgálata jóval korábban kezdődött és jelentős mennyiségű empirikus tapasztalat áll rendelkezésre – a különbségek miatt azok az eredmények nem használhatók fel maradéktalanul a turbinalapátok vizsgálatai során. Ilyen különbség például a jég kialakulásának helye. Míg a turbinalapátokon kialakuló jég a felszín közeli környezetben jön létre, addig a repülőgép szárnyakon megjelenő jég többségében a felhőkben lévő túlhűtött csapadék miatt alakul ki. A lapátprofilok geometriai mérete és alakja sem egyezik meg. A modern szélturбина lapátok profiljai jelentős mértékben aszimmetrikusak, valamint a szárnyprofil körüli áramlási sebesség is jelentősen eltér. Ezen kívül a turbinalapátokra érkező jegesedést okozó csapadék relatív becsapódási szöge a forgó lapátmozgás miatt folyamatosan változik. Mindezen különbségek indokolják a turbinalapátok külön vizsgálatát.

Jelenleg a probléma irodalmának áttekintése alapján elmondhatjuk, hogy a jég okozta hatások vizsgálati túlnyomóan numerikus szimulációkra alapulnak. Azonban a valós méretű és pontos lapátgeometria mellett végzett teljes turbina szimulációk reálisan nem oldhatók meg annak jelentős anyagi és időbeli ráfordítás igénye miatt. A jég miatt érdekessé váló felület közelében lévő tartomány pontos áramlástani megoldása technikailag problémás a nagy méretű, de finom szerkezetű háló generálása és használata miatt. Kezdetben a szárnyprofilok hengermetaszeteinek 2D, vagy kvázi 3D modelljein végeztek numerikus szimuláció segítségével jegesedés vizsgálatokat. A kapott eredmények alapján vizsgálják a szárnyprofilokat jegesedés szempontjából.

A jégakkumuláció kiszámítására leggyakrabban a FENSAP-ICE, a LEWICE, a TURBICE és hasonló jégképződés szimulációra alkalmas programokat alkalmazzák. Ezek használatával állítják elő az adott környezeti beállítások esetén kialakuló jégalakokat [18]. A különböző jegesedési körülmények mellett kialakuló szimulációval előállított jégalakok láthatók NACA profilokon a 3. ábrán.

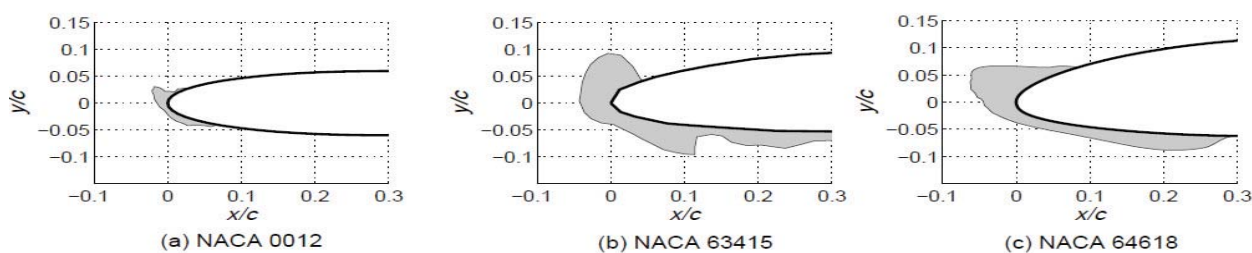
A jegesedés szimulációjában a légköri jegesedési körülmények meghatározása a legfontosabb. Ezek határozzák meg a jég típusát és a jegesedés intenzitását. Három meghatározó környezeti paraméter van:

- a csapadéksepp közepes átmérője (MVD),
- a fajlagos nedvességtartalom (LWC),
- a levegő hőmérséklete.

Amint már említettük a kialakuló jég fajtája függ a szél sebességétől is, így ezt is változó paraméternek kell tekintenünk. További adat a turbinalapát kerületi

sebessége és a jégakkumulációs idő, azaz a jég fejlődésére rendelkezésre álló idő. A lapátprofilok és a

megfúvási szögek ismeretében a jégképződési szimulációk elvégezhetők.



3. ábra: Különböző jégalakok NACA profilok belépő élén – szimuláció [18]

4.2. Az aerodinamikai jellemzők meghatározása szimulációval

A vizsgálat szempontjából fontos áramlástan jellemzőket, a felhajtóerő tényezőt, illetve az ellenállásérő tényezőt a jeges lapátalak meghatározását követően CFD szimulációk segítségével számítják ki. A legnagyobb problémát a jegesedett felület finom hálózása okozza, amely nélkül nem tudjuk pontosan számítani a profil körüli nyomáseloszlást. Erre a problémára különböző megoldások születtek az elmúlt időszakban. Ezen kívül a szimulációban használt turbulencia modell kiválasztása is nehéz, mivel nincs egyértelmű álláspont arra vonatkozóan, hogy melyik modell adja a legjobb eredményt. A különböző hengermetzeteken kapott eredmények a lapátelelem-impulzus (BEM) elmélet alkalmazásával tovább integrálódik a turbinák teljesítményadataiba [2, 14].

Azonban a turbinák jegesedésének erőteljes szimulációs erőfeszítései ellenére még a legkorszerűbb modellezések esetében is jelentős eltérés van a szimulációban használt beállítások és a turbinák terepen történő jegesedéséhez kapcsolódó beállítások között. A jelenlegi szimulációk elsősorban a jég felhalmozódásának és a kapcsolódó aerodinamikai paraméter romlásoknak a 2D-s modellezését használják, elhanyagolva a felhajtóerő és a légellenállás becslésére gyakorolt fontos 3D-s áramlást és turbulens hatást. De még ilyen egyszerűsített modellezés mellett is túl magasak a számítási költségek ahhoz, hogy a turbina jegesedési folyamata során az időben felbontott teljesítményt meg lehessen adni.

5. A SZIMULÁCIÓS EREDMÉNYEK VALIDÁLÁSA

Jelenleg a legtöbb kísérletet a turbinák jegesedési szimulációinak validálására modellméretű turbinákkal végzik laboratóriumban, ellenőrzött jegesedési körülmények között. Ilyen vizsgálatok folytak például az Iowa Állami Egyetem jegesedési kutatólaboratóriumának felhasználásával [19-21]. A kísérletsorozatban 3D

jégakkumulációs profilokat kaptak a lapátrészeken és meghatározták a megfelelő aerodinamikai paramétereket, amelyek beépíthetők a jegesedési körülmények között működő turbinák energiavesztésének becslésére szolgáló BEM-modellekbe [4]. Egy másik vizsgálat során egy 100 W-os modellturbina 7,8 m × 11,6 m-es mesterséges klímakamrába helyezésével [22, 23] szisztematikusan jellemezték a turbina terhelési teljesítményének, rotorfordulatszámának és tengelynyomatékának változását egy 8 perces jegesedési folyamat során. Eredményeik azt mutatták, hogy a terhelési teljesítmény és a rotorfordulatszám 90%-ban csökken az első 4 percben. Azonban mind a turbina, mind a környezeti feltételek ezekben a laboratóriumi tesztekben lényegesen eltérnek a terepen működő turbináktól. Ezért e numerikus és laboratóriumi jegesedési vizsgálatok végső értékelésének biztosítása és a turbinák jegesedésére való gyakorlati alkalmazhatóságuk javítása érdekében kívánatos volna a turbina működésének részletes jellemzése a terepen, reális jegesedési körülmények között.

Sajnos az irodalomban ilyen információ nagyon ritka, elsősorban a szélérőmű-tulajdonosok által nyilvánosan hozzáférhető adatok hiánya miatt. A publikált irodalomban eddig szinte minden terepi mérés a jég által kiváltott teljesítménycsökkenés vizsgálatára irányult a SCADA rendszer adataival.

6. ÖSSZEFOGLALÁS

A szélturbina lapátokon kialakuló jégreteg hatása az energiatermelésre jól dokumentált. A folyamat szimulációjára rendelkezésre állnak megfelelő módszerek, illetve szoftverek. A jegesedett lapátok teljes 3D-s CFD szimulációja azonban a szélturbinák lapátjainak mérete miatt még nem általánosan használt megoldás. Ha különválasztjuk a jegesedés szimulációját és az áramlástan jellemzőket meghatározó CFD szimulációt, akkor látható, hogy a jegesedés modellezése 2D metszeteken nem ad elegendően pontos eredményt. A jégképződés 3D szimulációja azonban jó egyezést mutat a tapasztalati értékekkel. A létrejött felületek további áramlástan vizsgálata az érdekes és nagyon összetett

jégfelületek miatt három dimenzióban költséges és nehezen kivitelezhető, illetve nem elegendően pontos. Ezért az a megoldás tűnik járhatónak, hogy a 3D szimulációval előállított jegesedett felületekről készült 2D metszeteket vetjük alá jobban kezelhető CFD számításoknak. Az eredmények alapján a vizsgált profilokat összehasonlító elemzésnek vethetjük alá a jegesedési körülmények között kialakuló jégalak aerodinamikai tulajdonság módosító hatása szerint.

7. IRODALOM

- [1] Battisti, L., 2015. **Wind Energy in Cold Climates**, Green Energy and Technology, 43-111. DOI: 10.1007/978-3-319-05191-8_2
- [2] Homola, Matthew C., Virk, Muhammad S., Nicklasson, Per J., Sundsbo, Per A., 2012. **Performance losses due to ice accretion for a 5MW wind turbine**. Wind Energy 15, 379–389., DOI: 10.1002/we.
- [3] Lamraoui, F., Fortin, G., Benoit, R., Perron, J., Masson, C., 2014. **Atmospheric icing impact on wind turbine production**. Cold Regions Science and Technology, 100, 36–49. DOI: 10.1016/j.coldregions.2013.12.008.
- [4] Blasco, P., Palacios, J., Schmitz, S., 2017a. **Effect of icing roughness on wind turbine power production**. Wind Energy 20, 601–617. DOI: 10.1002/we.2026.
- [5] Zanon, A., De Gennaro, M., Kühnelt, H., 2018. **Wind energy harnessing of the NREL 5 MW reference wind turbine in icing conditions under different operational strategies**. Renew. Energy 115, 760–772.
- [6] Alsabagh, A.S.Y., Tiu, W., Xu, Y., Virk, M.S., 2013. **A review of the effects of ice accretion on the structural behavior of wind turbines**. Wind Engineering, 37(1), 59–70. DOI: 10.1260/0309-524X.37.1.59.
- [7] Gravesen, H., Sørensen, S.L., Vølund, P., Barker, A., Timco, G., 2005. **Ice loading on Danish wind turbines: part 2. Analyses of dynamic model test results**. Cold Reg. Sci. Technol. 41, 25–47. DOI: 10.1016/j.coldregions.2004.05.009.
- [8] Barker, A., Timco, G., Gravesen, H., Vølund, P., 2005. **Ice loading on Danish wind turbines. Part 1: dynamic model tests**. Cold Reg. Sci. Technol. 41, 1–23., DOI: 10.1016/j.coldregions.2004.05.002.
- [9] K. Tóth, 2007 **Zúzmaraképződés előre jelezhetőségének vizsgálata numerikus modell outputok alapján**. ELTE
- [10] Fakorede, O., Feger, Z., Ibrahim, H., Ilinca, A., Perron, J., Masson, C., 2016. **Ice protection systems for wind turbines in cold climate: characteristics, comparisons and analysis.** Renewable and Sustainable Energy Reviews, 65, 662–675. DOI: 10.1016/j.rser.2016.06.080
- [11] Hu, L., Zhu, X., Hu, C., Chen, J., Du, Z., 2017. **Wind turbines ice distribution and load response under icing conditions**. Renew. Energy 113, 608–619. DOI: 10.1016/j.renene.2017.05.059.
- [12] Shi, W., Tan, X., Gao, Z., Moan, T., 2016. **Numerical study of ice-induced loads and responses of a monopile-type offshore wind turbine in parked and operating conditions**. Cold Regions Science and Technology, 123, 121–139. DOI: 10.1016/j.coldregions.2015.12.007
- [13] Etemaddar, M., Hansen, M.O.L., Moan, T., 2014. **Wind turbine aerodynamic response under atmospheric icing conditions**. Wind Energy, 17(2), 241–265. DOI: 10.1002/we.1573.
- [14] Homola, M.C., Virk, M.S., Nicklasson, P.J., Sundsbø, P.A., 2012a. **Performance losses due to ice accretion for a 5 MW wind turbine**. Wind Energy, 15(3), 379–389. DOI: 10.1002/we.477.
- [15] Lozowski, E P; Makkonen, L 2005.: **Fifty Years of Progress in Modelling the Accumulation of Atmospheric Ice on Power Network Equipment**, The 11. International Workshop on Atmospheric Icing of Structures, 55-62., ISBN 2-9805200-1-2
- [16] Makkonen L., 2000. **Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures**, Phil. Trans. R. Soc. Lond. A 358. 2913-2939, 2000., DOI: 10.1098/rsta.2000.0690
- [17] Makkonen, L., Laakso, T., Marjaniemi, M., Finstad, K.J., 2001. **Modelling and prevention of ice accretion on wind turbines**. Wind Eng. 25, 3–21. DOI: 10.1260/0309524011495791.
- [18] Gantasala, S., Tabatabaei, N., Cervantes, M., Aidanpää, J.O., 2019. **Numerical investigation of the aeroelastic behavior of a wind turbine with iced blades**. Energies, 12(12), 2422. DOI: 10.3390/en12122422.
- [19] Gao, L., Liu, Y., Zhou, W., Hu, H., 2019. **An experimental study on the aerodynamic performance degradation of a wind turbine blade model induced by ice accretion process**. Renewable Energy. DOI: 10.1016/j.renene.2018.10.032.
- [20] Gao, L., Veerakumar, R., Liu, Y., Hu, H., 2019. **Quantification of the 3D shapes of the ice structures accreted on a wind turbine airfoil model**. Journal of Visualization. DOI: 10.1007/s12650-019-00567-4.
- [21] Shu, L., Liang, J., Hu, Q., Jiang, X., Ren, X., Qiu, G., 2017. **Study on small wind turbine icing and its performance**. Cold Regions Science and Technology, 134, 11–19. DOI: 10.1016/j.coldregions.2016.11.004.
- [22] Shu, L., Li, H., Hu, Q., Jiang, X., Qiu, G., McClure, G., Yang, H., 2018. **Study of ice accretion feature and power characteristics of wind turbines at natural icing environment**. Cold Regions Science and Technology, 147, 45–54. DOI: 10.1016/j.coldregions.2018.01.006.