

LAPÁTPROFIL REZGÉSEINEK VIZSGÁLATA MÉRÉSSSEL ÉS VÉGESELEM SZIMULÁCIÓVAL

Horváth Tamás^a, Borbély Tibor^b, Lajber Kristóf^c, Kollár László^{d*}

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

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

^c ELTE Informatikai, Kar, Savaria Műszaki Intézet, PhD hallgató

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

ABSZTRAKT

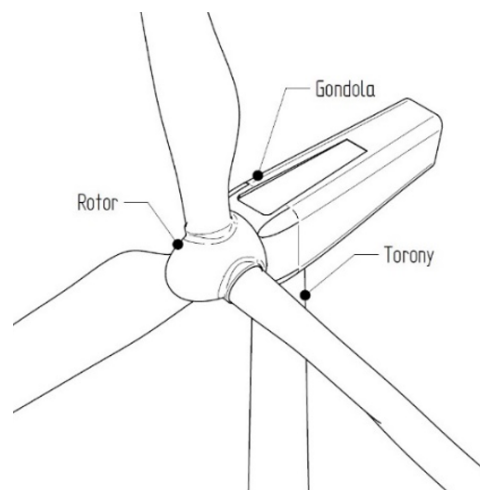
A munka célja egy egyszerűsített lapátmodell sajátfrekvenciáinak meghatározása méréssel és végelem szimulációval, egy valós méretű szélérőműlapát sajátfrekvenciáinak meghatározása továbbá szélérőműlapátról lehulló jég által okozott lengések szimulációja. A feladat kidolgozásához az Ansys szoftver modális és tranziens jelenségek vizsgálatára alkalmas moduljai lettek használva. A modellkísérlet a modális végelem szimuláció hitelességét igazolja, az egyszerűsített lapátmodell sajátfrekvenciájának meghatározása során a kísérleti és szimulációs eredmények közötti differencia 1% alatti.

Kulcsszavak: lapátprofil, rezgések, sajátfrekvencia, jegesedés, szélérőmű

1. Bevezetés

A szélenergia a természeti erőforrásoknak egy kifogyhatatlanul megújuló típusa. A szakirodalmak szerint a szélenergiát hasznosító szélérőműveknek már a tervezési szakaszban alapos elemzésen kell átesniük [1]. A szélérőműveket alapvetően 3 fő részre oszthatjuk (1. ábra).

A szélérőműlapátok és repülőgépszárnyak aerodinamikai tervezési szempontjain túl a rezgések és rezgésekre való hajlam is fontos tervezési szempont lehet. A szerkezetek működése közben, ha a gerjesztési frekvencia a gépelemek sajátfrekvenciájával egybeesik, az a szerkezetek tönkremeneteléhez vezethet, ezért szükséges ismerni a testek sajátfrekvenciáit.



1. ábra: Szélérőmű felépítése

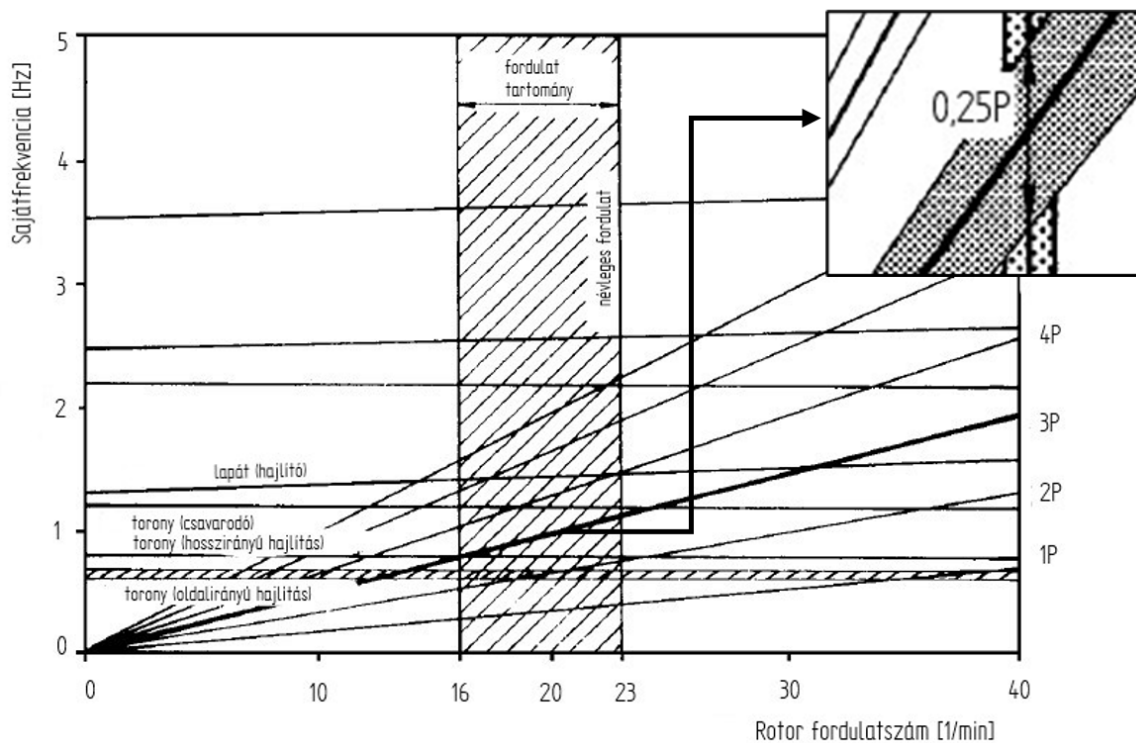


2. ábra: Lapát belső kialakításának vázlata

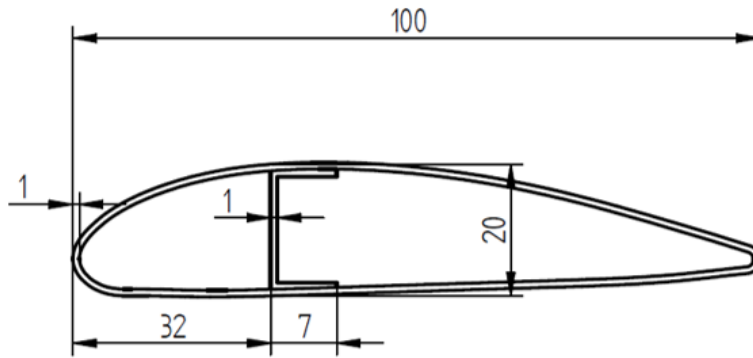
A sajátfrekvenciát alapvetően befolyásolja az anyagminőség és a geometria. A modern szélerőműlapátok jellemzően kompozit anyagokból készülnek. Ezeket osztályozhatjuk szálerősítés és mátrixanyag szempontjából. Szálerősítő anyag lehet üveg, karbon vagy aramid. Mátrixanyag szempontjából főként az epoxi gyanta a mérvadó [1]. A szélerőműlapátoknak héjszerkezete van, és merevítéssel vannak ellátva gyártótól függően (2. ábra).

A lapátok karcsú, rugalmas elemek, emiatt könnyen lengésbe jöhetnek. A rotor és a torony együttese folyamatosan ki van téve gerjesztésnek. A rotorra ható, periodikusan változó erők leginkább a torony hajlítólengését gerjesztik, ezért fontos, hogy ezeknek a gerjesztő erőknek a frekvenciája ne legyen közel a torony sajátfrekvenciáihoz. A gerjesztési frekvenciák a rotor forgásának frekvenciájával és annak egész számú többszöröseivel egyenlők. A domináns frekvencia pedig az, amikor ez a többszörös a lapátok száma, vagyis a gyakran használatos 3 lapát esetén $3 \cdot P$, ahol P a rotor frekvenciája. A szélerőmű szerkezeti elemeinek a sajátfrekvenciáit rezonanciadiagramokon, angolszász szakirodalmak szerint úgynevezett Campbell-diagramokon ábrázolják a rotorfordulatszám függvényében (3. ábra). Az [1] szakirodalmi forrás szerint a rezonancia elkerülése érdekében úgynevezett biztonsági távolságot kell tartani a gerjesztési vonaltól, a domináns frekvencia esetén $0,25 \cdot P$, a többi gerjesztési frekvencia esetén pedig $0,15 \cdot P - 0,2 \cdot P$ távolságra.

A szélerőművek extrém időjárási körülmények közötti üzemelését már a tervezés során célszerű figyelembe venni. A szélerőművek hajlamosak a jegesedésre. A lapáton lerakódott jég megváltoztatja a lapát alakját és felületi érdességét is, ami aerodinamikai problémákhoz vezet. Egyes források szerint



3. ábra: Rezonanciadiagram [1]



4. ábra: Lapátprofil főbb méretei

a teljesítményvesztés ilyen esetben akár 20-30% is lehet [2]. Jegesedés szempontjából beszélhetünk zúzmarás jég és jégmáz kialakulásáról [3, 4]. Jégmáz a csapadék hideg felületre történő ráfagyásával alakul ki 0 °C körüli hőmérsékleten. Zúzmarás jég jóval 0 °C alatt, a levegőben található túlhűtött vízcseppek hideg felülettel történő érintkezése során alakulhat ki [5, 6].

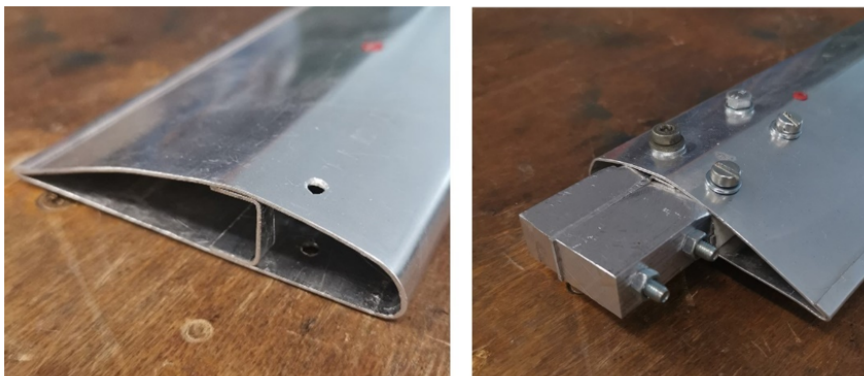
A jég lehullása a lapátot lengésbe is hozhatja, ami további károsodást okozhat a lapátban. A fenti szempontokat figyelembe véve célszerű már a jegesedés kialakulását elkerülni fűtőrendszerrel és speciális bevonatokkal. A további fejezetekben egy laborban végzett kísérlet, illetve az ez alapján felépített numerikus modell részletes bemutatása olvasható, valamint egy valós méretű szélerőműlapátról lehulló jég szimulációjának egy közelítése.

2. Kísérleti és numerikus modellek

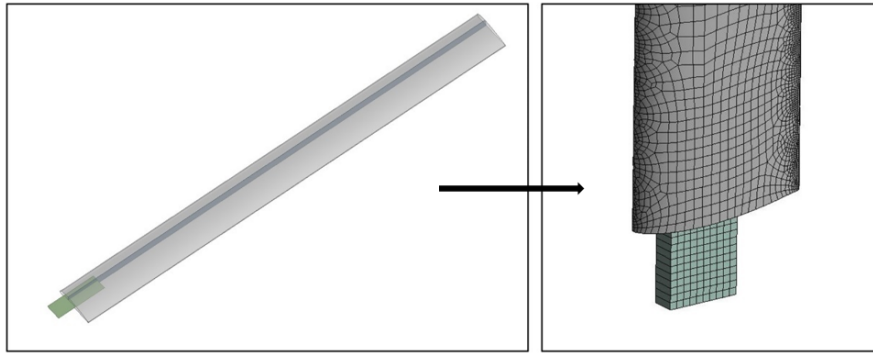
2.1. Kisminta rezgéseinek mérése és szimulációja

Szélerőműlapát rezgéseinek mérése laboratóriumi körülmények között egy egyszerűsített lapátmodellel történt. Ennek elkészítése során alapvető cél volt egy valódi méretű szélerőműlapát arányainak megtartása, így a modell hossza 1 m, húrmérete 100 mm lett (4. ábra).

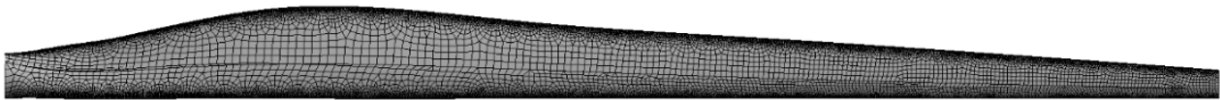
A lapát alumíniumból készült. A lapátprofilban található merevítés szegecsekkel, a lapáttő pedig csavarokkal lett rögzítve. Az elkészült lapátmodell az 5. ábrán látható. A rezgések mérése gyorsulásérzékelő segítségével történt. A felhasznált érzékelő a Brüel & Kjær dán vállalat 4535-B típusú, általános felhasználási célú, háromtengelyes gyorsulásérzékelője. A kísérlet során a lapát függőleges helyzetben, satuban lett rögzítve, az érzékelő pedig a lapát szabad végére lett helyezve. A lapát pillanatnyi kitérítése után a lapát szabadrezgésbe kezdett. A gyorsulás időbeli változása alapján meghatározható a sajátfrekvencia, aminek tárgyalása a 3. fejezetben olvasható.



5. ábra: Elkészült lapátmodell



6. ábra: Geometriai modell és háló



7. ábra: Valós lapát hálózása

A numerikus modell az Ansys szoftver Modal moduljával készült. A végeselemes modell elkészítésekor alapvető cél volt a kisminta egyszerűsítése a számítási idő csökkentése érdekében, emiatt a csavar- és szegecskötések modellezése elmaradt, a geometria héjmodellként készült. A szimuláció 8 mm-es globális elemmérettel, lineáris elemekkel készült a görbületnél és a lapáttónél finomabb beállítással, az így kapott elemszám 23931 lett (6. ábra).

A szimuláció során a lapáttónél fix rögzítést alkalmaztam a satuban történő megfogást közelítve. A vizsgálat során felhasznált anyagmodell az Ansys szoftver könyvtárában található alumínium anyag volt. A mérési és szimulációs eredmények összehasonlítása a 3. fejezetben található.

2.2. Valós méretű szélerőmű lapát modális analízise és a jéglehullás utáni lengések közelítése

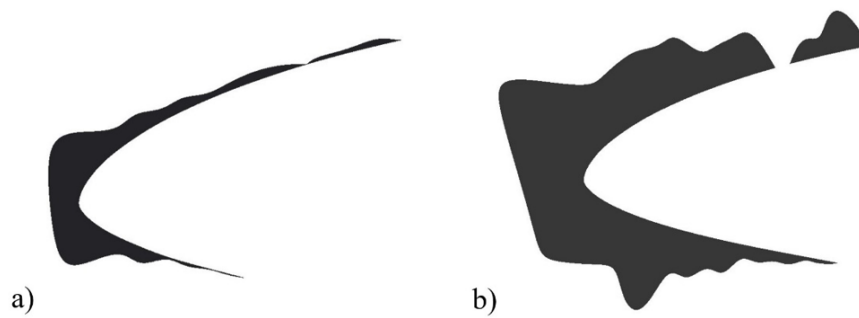
A szélerőműlapátokról kevés pontos információ áll rendelkezésre. Gyártótól függően számos méretben és profillal készülhetnek. A munkámhoz Phelps és Singleton (2011) tanulmányában található General Electric 1,5 MW-os szélerőmű lapátja volt a kiindulási alap [7, 8]. Ezek alapján a lapát hossza 41,25 m, a lapátban található egy merevítés, ami végigfut a lapát teljes hosszán. A szimuláció során 50, 100 és 150 mm-es merevítésvastagságok voltak vizsgálva. A külső héj vastagsága 20 mm. A hálózott geometria a 7. ábrán látható.

A hálózás során 300 mm-es globális elemméret lett beállítva az elemszám így 35 574. A részfeladat első célja a lapát modális analízise volt, ami szintén az Ansys szoftver Modal moduljával készült. A [7] forrás alapján a lapát két anyagból áll, a külső héj üvegszál, a merevítés pedig karbon erősítésű kompozit. Az anyagtulajdonságok az 1. táblázatban láthatóak.

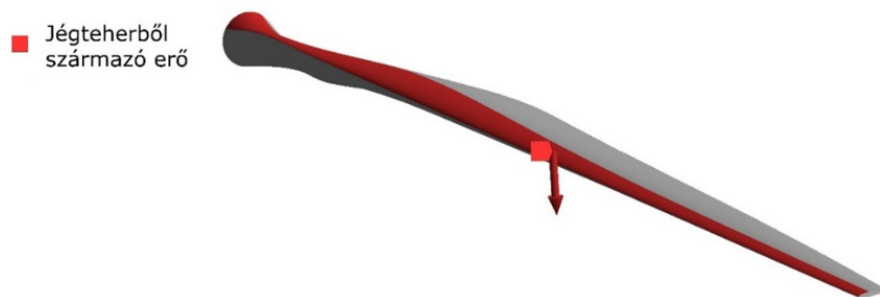
A következő részfeladat a jéglehullás utáni lengések szimulációja volt, amihez az Ansys szoftver tranziens modulját használtam. A vizsgálat során a lapáton lerakódott jég egy egyenes S825-ös profilon kialakult jégmennyiséggel lett közelítve, ami a valós lapát legnagyobb húrméretéhez tartozó profil [10, 11]. A jéglerakódás a 8. ábrán látható.

1. táblázat: A QQ1- üvegszál és P2B- karbon erősítésű kompozit anyagtulajdonságai [9]

Anyag	Sűrűség [kg/m ³]	Rugalmassági modulus [GPa]	Poisson tényező [-]
QQ1	1 919	33	0,26
P2B	1 570	101	0,2



8. ábra: Zúzmarás jég (a) és jégmáz (b) S825 profilon

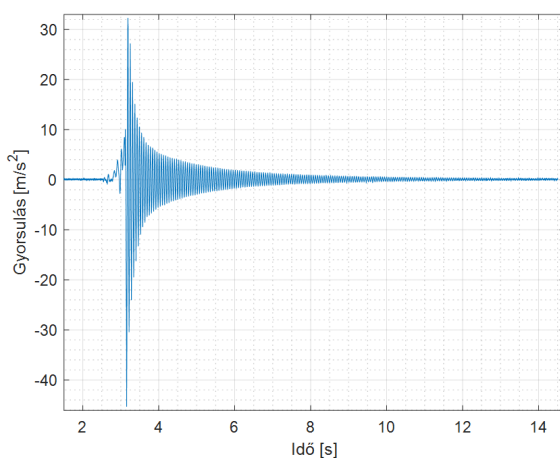


9. ábra: Jégteherből származó erő

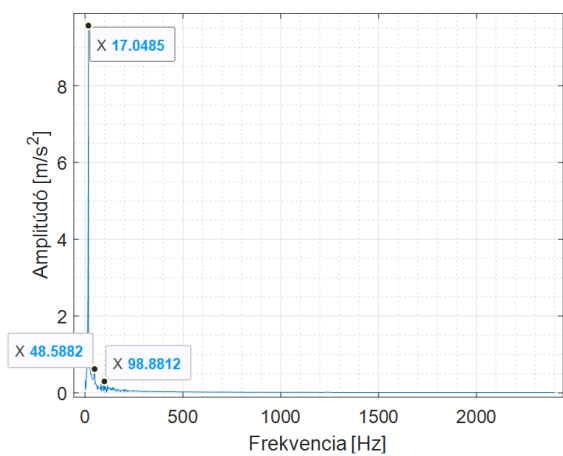
A szimuláció során a jégterhet erőként vettem figyelembe a lapáton, ami a jégtípusok sűrűségükből és a CAD szoftverből lekérdezett térfogatokból számolható. A lapátot terhelő erő zúzmarás jég esetén 6 425,55 N, míg jégmáz esetén 57 417,93 N.

A szimuláció során a lapát vízszintes helyzetben áll, ekkor ébred a legnagyobb nyomaték a lapát tövében. Az erő a szimuláció során a lapát egy részfelületére lett helyezve, ami a jegesedési tapasztalatok alapján a húrméret körülbelül egyharmad részéig ér (9. ábra).

A lapát tövébenél fix befogást alkalmaztam, továbbá a gravitációs gyorsulás is figyelembe lett véve. A szimuláció során két lépés lett beállítva: az első lépés során az erő fokozatosan ráadódik a lapátra, ezt követően a második lépésben a jégteherből származó erő megszűnik, mintha a jég lehullana a lapátról, és kialakul a lengőmozgás. A részletes szimulációs eredmények 3. fejezetben találhatóak.



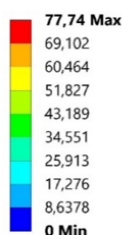
(a)



(b)

10. ábra: a) Minta elmozdítás utáni szabadrezgése, b) Sajátfrekvencia meghatározása a számított spektrumból

A: Modal
Teljes deformáció
Frekvencia: 17,216 Hz
Mértékegység: mm



11. ábra: Kisminta első lengésképe

3. Eredmények

3.1. Mérési és szimuláció eredmények összehasonlítása

A laborban végzett kísérlet során az érzékelővel meghatározott gyorsulás időbeli változása a 10(a) ábrán látható. Az idősor és mintavételi frekvencia ismeretében (4 800 Hz) Fourier transzformáció segítségével meghatározható volt a spektrum, abból pedig a domináns frekvenciák (10(b). ábra). A kísérlet alapján készült modális szimulációval meghatározhatóak voltak a minta lengésképei. Az első lengésképe a 11. ábrán látható.

A mérési és szimulációs eredmények a 2. táblázatban láthatóak. A kísérlet szempontjából domináns lengésképe esetén a differencia 1% alatti, ami az alkalmazott egyszerűsítések mellett jó eredménynek tekinthető.

2. táblázat: Kisminta mérési és szimulációs eredmények

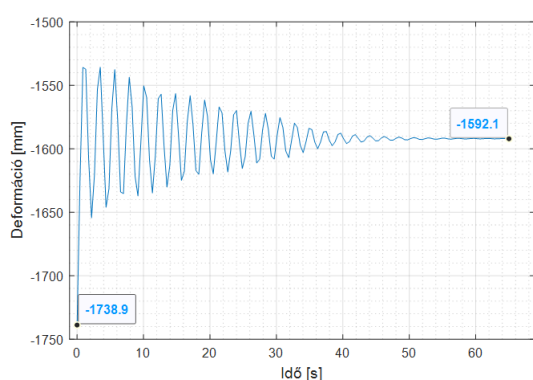
	Mért sajátfrekvencia [Hz]	Számított sajátfrekvencia [Hz]	Hiba [%]
1. sajátfrekvencia	17,049	17,216	-0,97
2. sajátfrekvencia	48,588	42,578	12,37
3. sajátfrekvencia	98,881	106,66	-7,87

3. táblázat: Valós lapát sajátfrekvenciái

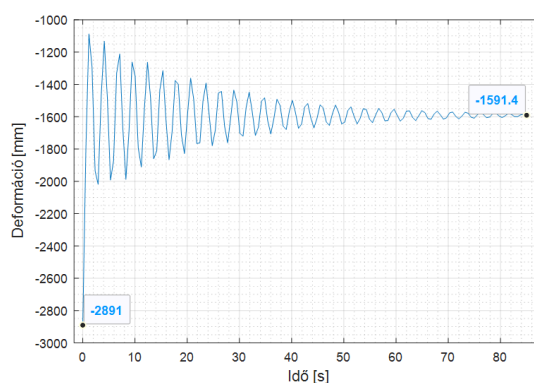
	Sajátfrekvencia 50 mm-es merevítővastagság esetén [Hz]	Sajátfrekvencia 100 mm-es merevítővastagság esetén [Hz]	Sajátfrekvencia 150 mm-es merevítővastagság esetén [Hz]
1. módus	0,49	0,54	0,57
2. módus	0,94	0,95	0,95
3. módus	1,82	1,85	1,87
4. módus	4,32	4,55	4,72
5. módus	5,67	5,53	5,35
6. módus	7,27	7,56	7,92

3.2. Valós lapát sajátfrekvenciái és jéglehullás utáni lengései

A valós, 41,25 m hosszú szélérőműlapát sajátfrekvenciái 3 eltérő merevítővastagság mellett a 3. táblázatban láthatók. A szimuláció a lapát tényleges, 100 mm-es merevítővastagságával készült. A jéglehullást követő lengések a 12. ábrán, a folyamat numerikus modelljével az első lépés végén számított deformációk (amikor maximális a jégteher és az önsúly miatti alakváltozás) pedig a 13. ábrán láthatók.



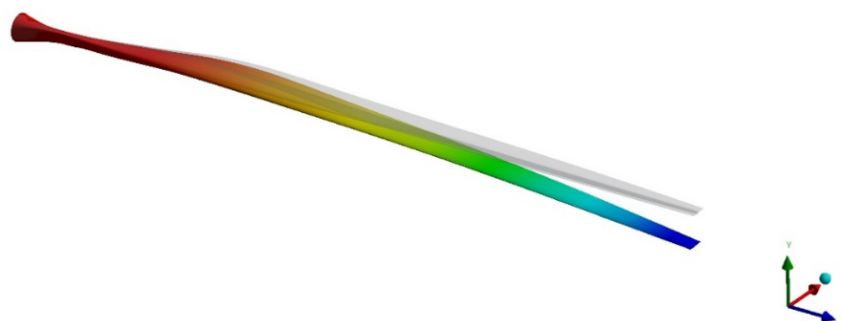
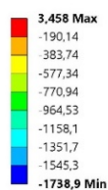
(a)



(b)

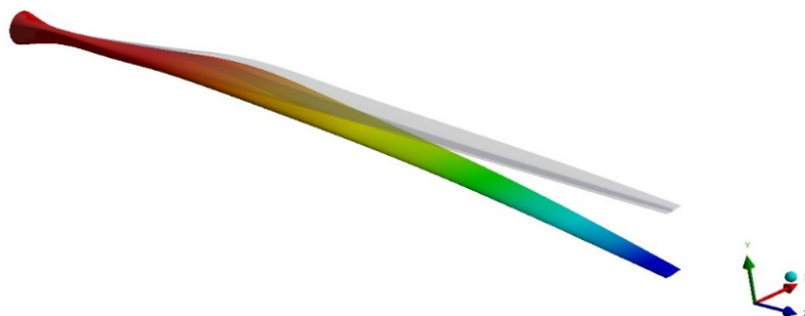
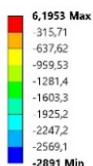
12. ábra: a) Zúzmarás jég lehullását követő lengés, b) Jégmáz lehullását követő lengés

A: Tranziens modul
 Irány menti deformáció (Y)
 Mértékegység: mm



(a)

B: Tranziens modul
 Irány menti deformáció (Y)
 Mértékegység: mm



(b)

13. ábra: a) Deformáció zúzmarás jég esetén, b) Deformáció jégmáz esetén

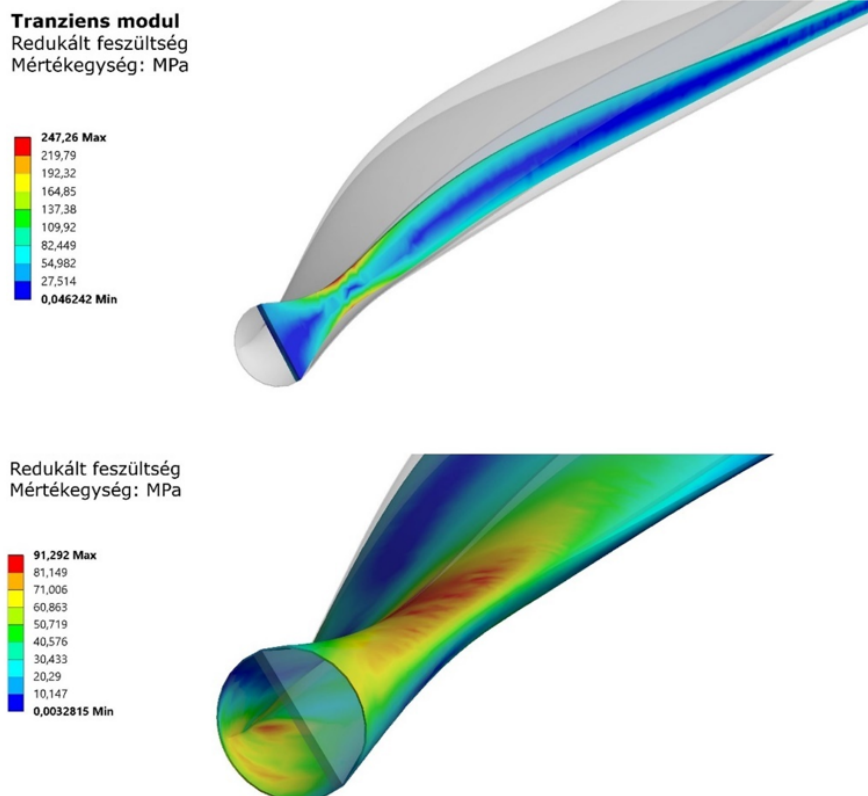
A görbék ismeretében meghatározható a jéglehullás utáni lengések frekvenciája, ami zúzmarás jég esetén 0,46 Hz, jégmáz esetén pedig 0,34 Hz. A lapát 100 mm-es merevítése mellett a sajátfrekvencia 0,54 Hz, amitől a zúzmarás jég lehullása utáni lengés sajátfrekvenciája 15%-kal tér el. A deformációk és rezgések mellett meghatározható volt a lapátban ébredő redukált feszültség is, ami a 14. ábrán látható (fent a merevítésben lent a héjszerkezetben ébredő redukált feszültségek).

A lapátmerevítésben ébredő redukált feszültség 247 MPa, a héjszerkezetben pedig 91 MPa volt, az önsúly és jégteher együttes hatására. A [7] szakirodalmi forrás alapján a merevítésben a redukált feszültség megengedhető értéke nem lehet nagyobb, mint 1200 MPa, a héjszerkezetben pedig nem lehet nagyobb, mint 120 MPa, a végeselemes számítással kapott érték a merevítésben 4,86-szor, a héj esetében 1,32-ször kisebb a megengedhetőnél, így szilárdsági szempontból ez elfogadható.

4. Következtetések

A szélerőműlapátnak a kismintás kísérleti és numerikus modelljén végzett rezgések vizsgálatából az alábbi következtetések vonhatók le. A laboratóriumi kísérlet alapján készült numerikus modell esetében a csavar- és szegecskötések modellezésének elhagyása a szimuláció számítási idejét lényegesen lecsökkentette, ami így néhány másodperc volt. A lapát legkisebb sajátfrekvenciájára a méréssel kapott eredmény 17,04 Hz, a végeselemes szimulációs eredmény pedig 17,22 Hz, ami igazolja, hogy megfelelő egyszerűsítések és peremfeltételek mellett a modális végeselem szimuláció hiteles eredményt ad.

A jéglehullás szimulálásánál hibaként merülhet fel, hogy a jég a szimuláció 0 időpillanatában válik le a lapátról, ami a valóságban valószínűleg fokozatosan történik a lapát és jég közötti súrlódás következtében. A jéglehullást követő lengés frekvenciája a vizsgált esetekben nem esik 15%-nál közelebb a sajátfrekvenciához. További kérdés lehet, hogy a súrlódás figyelembevétele milyen módon alakítja a frekvenciaértékeket. A terhelés hatására a lapátban ébredő feszültségek szilárdsági szempontból elfogadhatók, így nem áll fenn a károsodás veszélye.



14. ábra: Lapátban ébredő redukált feszültség

Kijelenthető, hogy a modern szenzortechnika és ipar 4.0 lehetőségekkel a szélerőművek monitorozása hozzájárul a gyors beavatkozáshoz és karbantartáshoz meghibásodás esetén, ami különösen előnyös lehet, például tengerre telepített szélfarmok esetén.

5. 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.

6. Irodalomjegyzék

- [1] E. Hau, H. Renouard, *Wind Turbines – Fundamentals, Technologies, Application, Economics*, 2nd edition, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, 2006, [CrossRef](#)
- [2] 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](#)
- [3] L. Makkonen, T. Laakso, M. Marjaniemi, K.J. Finstad, *Modelling and prevention of ice accretion on wind turbines*, Wind Engineering 25(1), 2001, pp. 3-21, [CrossRef](#)
- [4] L. Makkonen, *Models for the Growth of Rime, Glaze, Icicles and Wet Snow on Structures*, Ice and Snow Accretion on Structures 358(1776), 2000, pp. 2913-2939, [CrossRef](#)
- [5] S. Moghtadernejad, *Dynamics of Droplet Shedding and Coalescence under the Effect of Shear Flow*, MSc Thesis, Concordia University, Montreal, Quebec, Canada, ID: 978915, 2014.
- [6] P. Thorsson, *Modelling of Atmospheric icing: An introduction essay*, Uppsala University, Disciplinary Domain of Science and Technology, Earth Sciences, Department of Earth Sciences, ID: 1038705, 2010.
- [7] C. Phelps, J. Singleton, *Wind Turbine Blade Design*, Cornell University, Sibley School of Engineering, 2011.
- [8] The Wind Power, letöltés dátuma: 2022. 04. 10, [url](#)
- [9] P.A. Kulkarni, A.S. Dhoble, P.M. Padole, *Deep neural network-based wind speed forecasting and fatigue analysis of a large composite wind turbine blade*, Journal of Mechanical Engineering Science 233(8), 2018, pp. 2794-2812, [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] Rozs R., *Szélerőmű lapátok rezgéseinek szimulációja többtest-dinamikai módszerrel jégterhelés lehullását követően*, Szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, 2020.