

Dr. Bottyán Zsolt<sup>1</sup>

## A SZÁRNYPROFIL-GEOMETRIA ÉS AZ ÜTKÖZÉSI HATÉKONYSÁG KAPCSOLATA A REPÜLŐGÉPEK FELÜLETI JEGESEDESÉNEK FOLYAMATA SORÁN<sup>2</sup>

*A repülőeszközök felületi jegesedése adott meteorológiai feltételek között a repülésre veszélyes folyamat. A felhőkben lebegő túlhűlt vízcseppek ütközése az adott repülőeszköz felületével számos meteorológiai, aerodinamikai és geometriai tulajdonságtól függ. Munkánkban egy széles körben alkalmazott szárnyprofil (NACA0012) különböző húrhossz melletti ütközési hatékonyságát vizsgáljuk a réteges felhőzetre jellemző, felhőzet cseppméret-eloszlás és különböző repülési sebesség mellett. Eredményeink alapján rámutatunk arra, hogy a felhőcseppek ütközési hatékonysága jelentősen nő a húr csökkenésével, ami a karcsú szárnyak magasabb jegesedési potenciálját jelenti, ugyanazon környezeti feltételek mellett.*

### **THE RELATIONSHIP BETWEEN THE AIRFOIL GEOMETRY AND COLLISION EFFICIENCY DURING AIRCRAFT STRUCTURAL ICING**

*The aircraft structural icing is a dangerous phenomena during given meteorological conditions. The collision of supercooled droplets with aircraft surfaces depends on some meteorological, aerodynamical and geometrical attributes. In our work we examine the collision efficiency of a frequently used airfoil (NACA0012) with different chord lines applying several airspeed and the typical cloud droplet size distribution represented by stratiform clouds over Carpatian Basin. Based on our results we explain the relationship between the collision efficiency and the applied length of airfoil chord lines. The mentioned relationship quantitatively shows the higher icing potential of the slimmer airfoil geometry during the same environmental conditions.*

## BEVEZETÉS

A felületi jegesedés kialakulása a repülőeszközök felületén - az esetek döntő többségében - a levegőben túlhűlt állapotban lebegő felhő- és/vagy hulló esőcseppekkel történő ütközésre vezethető vissza. Tekintve, hogy leggyakrabban vegyes halmazállapotú felhőben repülve történik az adott típusú jegesedés, munkánkban csak a felhőelemekkel történő ütközés során kialakuló jegesedést vizsgáljuk. [1]

A repülőeszközök felületére kirakódó jég mennyiségének, geometriájának és minőségének előrejelzésére számos 2D és 3D modellt alkottak.[2][3][4] Mindegyikre igaz azonban, hogy fontos meteorológiai és aerodinamikai állapotjelzők szükségesek a jégakkréció pontos modellezéséhez. Ezek ismeretében, a jégakkumuláció becsléséhez először a felhőben található, lebegő vízcseppek cseppméret-eloszlásának ismeretében, az ún. ütközési hatékonyságot kell meghatároznunk. Ennél a pontnál kerülünk szembe a repülőeszköz geometriai tulajdonságával, amely jelentős mértékben meghatározza az említett paraméter értékét. Leginkább a gör-

<sup>1</sup> Nemzeti Közszolgálati Egyetem, Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, bottyan.zsolt@uni-nke.hu.

<sup>2</sup> Lektorálta: Dr. Wantuch Ferenc, repülésmeteorológia szakértő, Nemzeti Közlekedési Hatóság, wantuch.f@gmail.com

bületi viszonyok azok, amelyek befolyásolják a felhőcseppek mozgását a szárnyak előtt, de természetesen a 3D kiterjedés önmagában is fontos tényező.[5]

Jelen tanulmányban egy igen gyakran alkalmazott szárny-szelvény-geometria (NACA0012), különböző görbületi viszonyok mellett történő viselkedését vizsgáljuk adott meteorológiai és aerodinamikai körülmények között, az ütközési hatékonyság szempontjából.

## ELMÉLETI HÁTTÉR

A jégakkréciós modellek esetében – mielőtt megoldanánk a fizikai környezetet leíró differenciálegyenlet-rendszert – meg kell határozni a repülőeszköz felületére (szárnyak belépő élére) beérkező túlhűlt folyékony vízfluxust. Ehhez dolgozatunkban, egy egyszerűsítést alkalmazunk, melynek keretében, az adott geometriájú szárny-szelvényt 2D-ban, egy megfelelő átmérőjű nem forgó hengerrel közelítjük, ahogy azt számos esetben tették korábbi szerzők.[6] A henger áramlásnak kitett felületét, 1°-os középponti szöggel rendelkező szegmensekre osztottuk ( $\theta_i = i$ , ahol  $i = 0, 1, 2, \dots, 90$ ). Ezután minden szegmensre és felhőcsepp-kategóriára ( $D_j = 5j \mu\text{m}$ , ahol  $j = 1, 2, \dots, 9$ ) külön számítottuk az ütközési hatékonyságot  $\beta_{ij}$  (szimmetria miatt elég a henger negyedét vizsgálni).

A számítás első lépéseként minden cseppméret-kategóriára ( $j$ ) meg kell határozni a Reynolds-számot ( $Re_j$ ) és az ún. Langmuir-féle inercia paramétert ( $K_j$ ), az alábbi összefüggések alapján: [3][7]

$$Re_j = \frac{D_j U \rho_a}{\mu_a} \quad (1)$$

$$K_j = \frac{\rho_w U D_j^2}{9 \mu_a D_c} \quad (2)$$

ahol,  $\rho_a$  és  $\rho_w$  a levegő és a víz sűrűsége,  $U$  az áramlás sebessége,  $D_c$  a henger átmérője és  $\mu_a$  pedig a levegő dinamikus viszkozitása. Ezután kerülhet sor a módosított inercia paraméter ( $K_{0j}$ ) kiszámítására:

$$K_{0j} = 0,125 + \frac{K_j - 0,125}{1 + 0,0967 Re_j^{0,6367}} \quad (3)$$

Felhasználva  $K_{0j}$  értékét, meghatároztuk a belépő élre vonatkozó ütközési hatékonyságot ( $\beta_{0j}$ ), a totális ütközési hatékonyságot ( $E_j$ ) és a határszöveget vagy maximális ütközési szöveget ( $\theta_{mj}$ ):

$$\beta_{0j} = E_j = \Theta_{mj} \quad (4)$$

ha  $K_{0j} < 0,125$ ;

$$\beta_{0j} = \frac{1,4(K_{0j} - 0,125)^{0,84}}{1 + 1,4(K_{0j} - 0,125)^{0,84}} \quad (5)$$

ha  $0,125 \leq K_{0j} \leq 7,5$ ;

$$\beta_{0j} = \frac{K_{0j}}{1 + K_{0j}} \quad (6)$$

ha  $K_{0j} > 7,5$ ;

$$E_j = 0,489(\log_{10} 8K_{0j})^{1,978} \quad (7)$$

ha  $0,125 \leq K_{0j} < 0,9$ ;

$$E_j = \frac{K_{0j}}{\pi/2 + K_{0j}} \quad (8)$$

ha  $K_{0j} \geq 0,9$ ;

$$\Theta_{mj} = \tan^{-1} \left[ 1,7(K_{0j} - 0,125)^{0,76} \right] \quad (9)$$

ha  $0,125 \leq K_{0j} \leq 10$ ;

$$\Theta_{mj} = \tan^{-1}(K_{0j}) \quad (10)$$

ha  $10 \leq K_{0j}$ ;

Ezek után lehetőség nyílik a henger felülete mentén történő ún. helyi ütközési hatékonyság számítására a következő formula alapján:

$$\beta_j(\Theta_i) = \beta_{0j} \cos\left(\frac{\pi\Theta_i}{2\Theta_{mj}}\right) + \frac{\pi^3}{\Theta_{mj}^3(\pi^2 - 4)} \times \left(E_j - \frac{2\Theta_{mj}\beta_{0j}}{\pi}\right) \times \Theta_i^2 \sin\left(\pi \frac{\Theta_i}{\Theta_{mj}}\right) \quad (11)$$

ha  $\Theta_i < \Theta_{mj}$ , illetve

$$\beta_j(\Theta_i) = \beta_{ij} = 0 \quad (12)$$

ha  $\Theta_i \geq \Theta_{mj}$ .

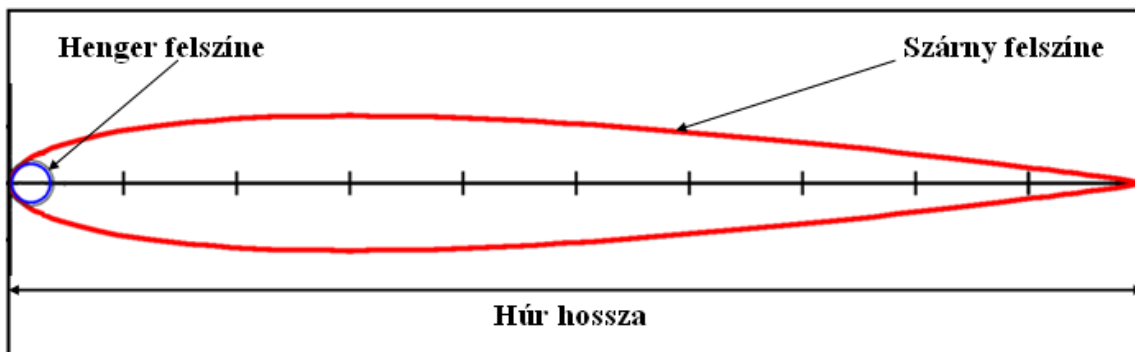
## A VIZSGÁLT SZÁRNYPROFIL

Munkánkban az ütközési hatékonyság szerepének vizsgálatához egy igen széles körben használt szárnyprofil, a NACA0012-est választottuk, mert mind merev- (pl. számos Cessna típuson), mind pedig forgószárnyas (pl. MD-500E) légi járműveken előfordul, különböző húrhosszal installálva (1. ábra).

Első lépésben meg kellett határozni az adott húrhossz melletti görbületi sugarat, ami az adott modellben szereplő henger átmérője lesz, ( $D_c$ ). Ehhez egy egyszerű összefüggést alkalmazhatunk: [8]

$$D_c = 2kc \quad (13)$$

ahol,  $D_c$  a modellben szereplő henger átmérője,  $k$  a szárnyszelvény belépő élének sugara,  $c$  pedig húrjának hossza. A vizsgált szárnygeometria az említett repülő eszközökön, jó közelítéssel a 0,2 – 1,5 m-es húr hossz-tartományban fordul elő, így munkánkban erre az intervallumra koncentráltunk. Ennek megfelelően az I. táblázatban szereplő húr hosszakra végeztük el a számításokat.



1. ábra. A NACA0012 szárnyszelvény és az illeszkedő henger geometriai viszonyai

Húrhossz (m)	Alkalmazott henger görbületi sugara NACA0012 szárnyprofil esetén (m)
0,2	0,0063
0,5	0,0158
1,0	0,0316
1,5	0,0474

I. táblázat. A vizsgált NACA0012 húr hosszak és a hozzájuk illeszkedő henger görbületi sugarai

## A METEOROLÓGIAI HELYZET ADAPTÁCIÓJA

Ahogy korábban említettük, a repülő eszközök felületén képződő jégbevonat kialakulásához túlhűlt halmazállapotú felhőcseppek jelenléte szükséges a légkörben. A különböző felhőkben lebegő túlhűlt cseppek méret-eloszlásának tulajdonságai a felhőcseppeknek a szárnyfelülettel történő ütközése szempontjából alapvető fontossággal bírnak. Az említett méret szerinti felhőcsepp-eloszlást réteges szerkezetű felhőzetben jól közelíthetjük a  $\Gamma$ -eloszlással: [9]

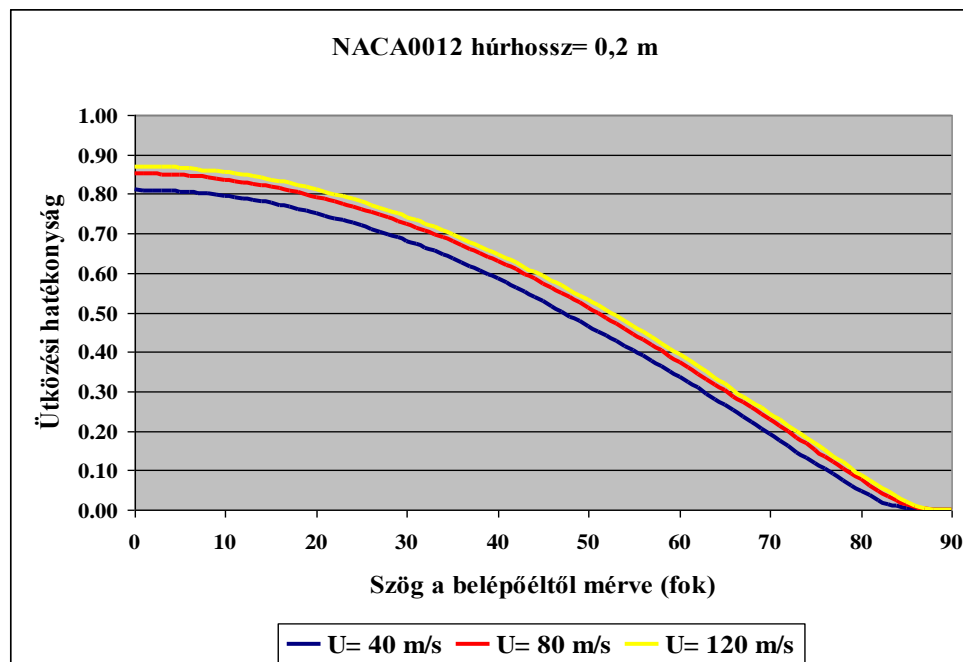
Vizsgálatunkban 20  $\mu\text{m}$  értékű közepes felhőcsepp-méret eloszlást alkalmaztunk, tekintve, hogy ez jól leírja a Kárpát-medence felett előforduló réteges felhőzetben előforduló tényleges csepp-méret-eloszlást. Igaz ugyan, hogy az intenzív konvekció eredményeképpen kialakuló felhőzetben (TCu, Cb) nagyobbak a felhőelemek átmérői, de ezeket a felhőket repülésbiztonsági szempontból általában elkerüli a személyzet, míg a réteges felhőzetben gyakran át kell repülniük.

Az ütközési hatékonyság számításánál három áramlási sebességet ( $U_1=40$  m/s,  $U_2=80$  m/s és  $U_3=120$  m/s) vettünk figyelembe, mely értékek merev- és forgószárnyas repülés esetén is gyakran előfordulnak.

## EREDMÉNYEK

Először a vizsgálatba bevont szárnyprofil esetében – a meghatározott módon számított görbületi átmérőt alkalmazva – kiszámítottuk az adott felhőcsepp méret-eloszláshoz tartozó ütközé-

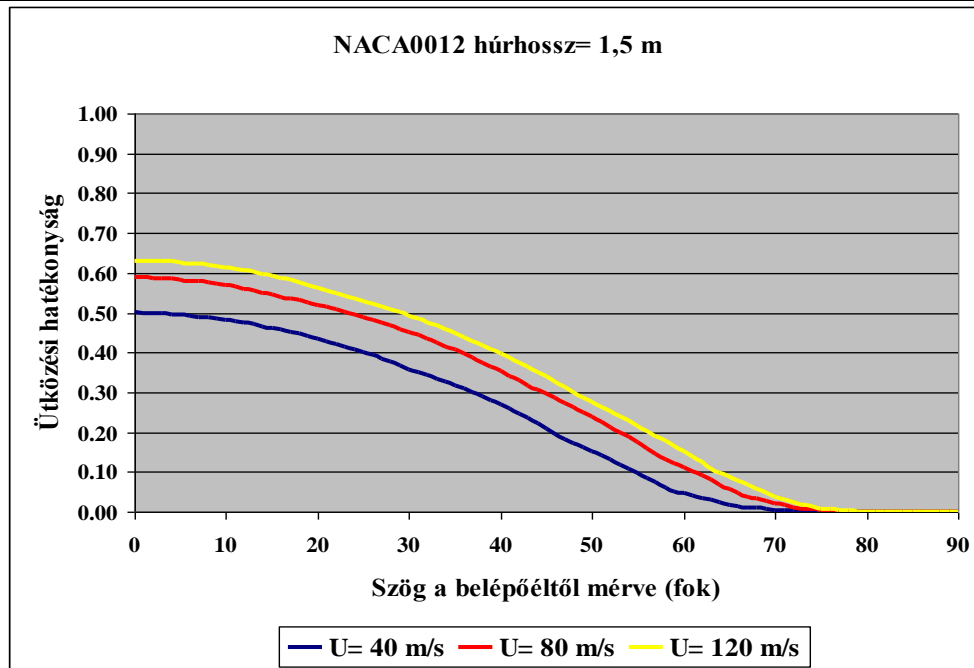
si hatékonyság értékeket a belépő éltől 1 fokos szögfelbontással a felületre vonatkozóan, mind a három áramlási sebesség esetén. A 0,2 m-es húr hossz esetén meghatározott ütközési hatékonyság értékek a belépő éltől számított szögtávolság és az áramlási sebesség függvényében a 2. ábrán láthatóak.



2. ábra Az ütközési hatékonyság a belépő éltől számított szögtávolság és az áramlási sebesség függvényében, a vizsgált NACA0012 szárnyprofil esetében, 0,2 m-es húr hossz esetén

Jól észrevehető, hogy a 0.2 m-es húrral rendelkező szárnyprofil (karcsú szárny) esetén már 40 m/s áramlási sebesség mellett is 0,8 feletti a maximális ütközési hatékonyság értéke (a belépő élnél, 0 fok), ami a sebesség növekedésével csak kismértékben nő. A belépő éltől távolodva mindhárom sebesség-tartományban egy fokozatos csökkenést láthatunk az ütközési hatékonyság értékeiben, amíg el nem érjük az ún. határszöveget (ahol 0 az ütközési hatékonyság értéke, tehát a beérkező vízcseppek egyáltalán nem ütköznek a felülettel), ami a három sebesség esetén ( $U_1=40$  m/s,  $U_2=80$  m/s és  $U_3=120$  m/s) rendre, 88, 89, 89 fok. Ez azt jelzi, hogy karcsú NACA0012 profil esetén a szárny szinte teljes áramlásnak kitett felülete gyűjti a felhőcseppeket, jóllehet nem egyenlő hatékonysággal. A maximális értéket mutató belépő éltől mintegy 55-60 fok szögtávolságra esik felére az ütközési hatékonyság értéke, majd onnan tovább távolodva gyorsabban csökken 0-ra.

Ugyanakkor, ha a húr mérete 1,5 m-re nő, a fentebb vázolt kép jelentősen megváltozik szinte minden tekintetben. Jelentősen csökken a belépő élnél mérhető maximális ütközési hatékonyság értéke, hiszen pl. 40 m/s áramlási sebességnél 0,2 m-es húr esetén 0,8098 volt a maximális érték, míg 1,5 m-es húrnál ez mindössze 0,5001! A másik két sebesség-tartományban is jelentős a maximális ütközési hatékonyság csökkenése (3. ábra). A maximális ütközési hatékonyság ebben az esetben 42-47 fokos szögtávolságban csökken a felére, míg a határszögekre rendre 78, 81 és 82 fok adódott. Tehát vastagabb szárny esetén az áramlásnak kitett felületnek jóval kisebb része gyűjti a felhőcseppeket és az ütközési hatékonyság minden ponton kisebb értékű, mint a karcsúbb szárny esetében.

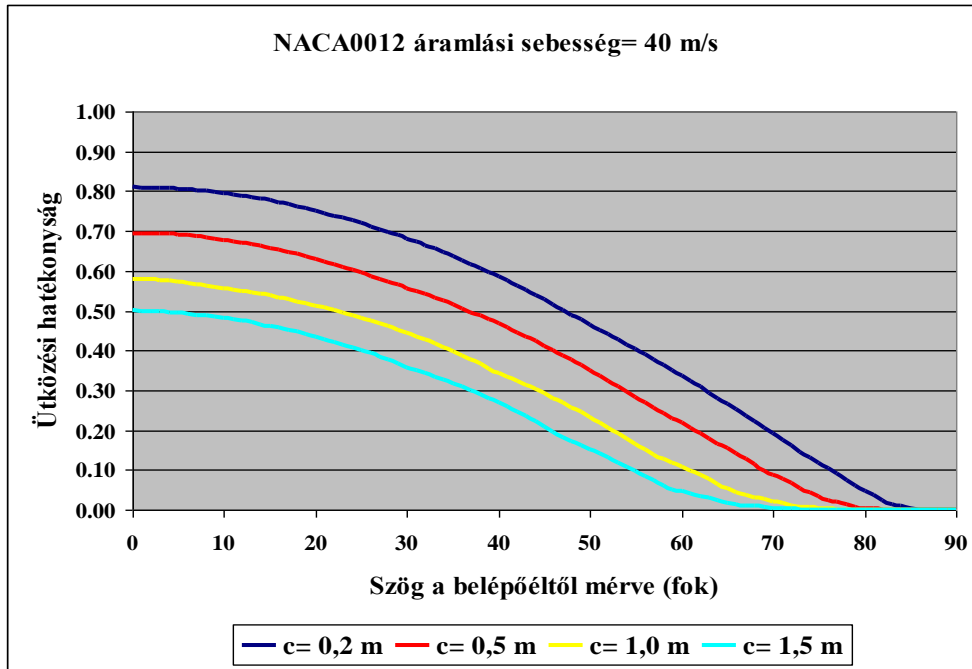


3. ábra Az ütközési hatékonyság a belépő éltől számított szögtávolság és az áramlási sebesség függvényében, a vizsgált NACA0012 szárnyprofil esetében, 1,5 m-es húr hossz esetén

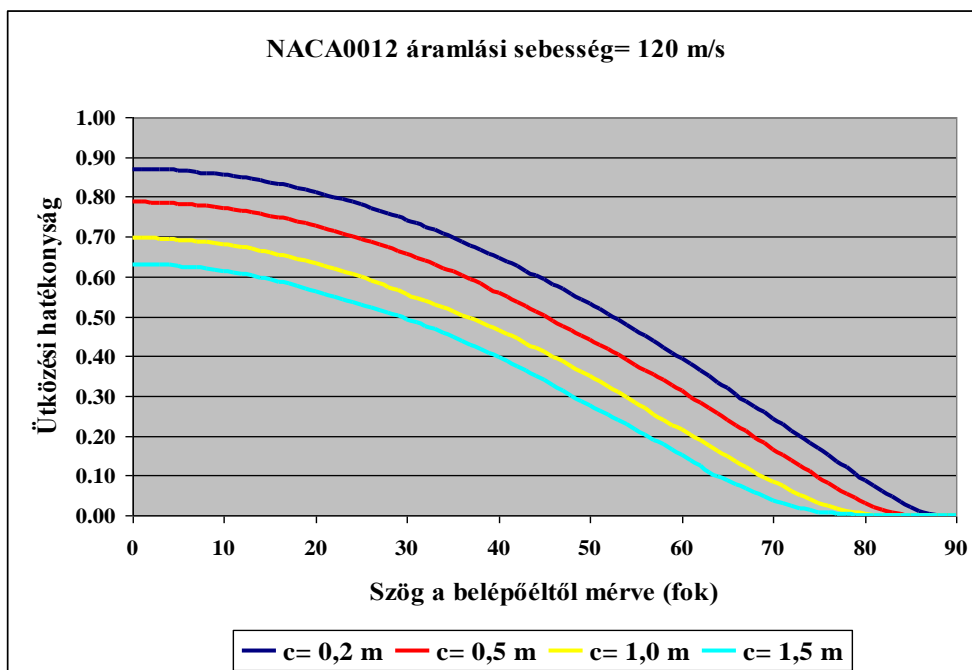
Másfelől, mindkét fentebb tárgyalt esetben az áramlási sebesség hatása az ütközési hatékonyság értékeire nem tűnik fundamentálisnak, hiszen ugyanazon szárny-geometria mellett a sebesség háromszorozódása pl. a maximális ütközési hatékonyság esetén 0,2 m-es húrnál mintegy 10%-os, 1,5 m-es húrnál pedig kb. 25%-os növekedést generált mindössze.

Ahhoz, hogy a szárny-geometria hatását megvizsgálhassuk az ütközési hatékonyság szempontjából, kiszámítottuk és ábrázoltuk ezt a paramétert – adott áramlási sebességek mellett – a NACA0012 profil eltérő húr hosszaira vonatkozóan. Ahogy a 4. ábrán látható, 40 m/s áramlási sebesség mellett bemutatjuk az ütközési hatékonyság alakulását a 0,2 m-től 1,5 m-ig terjedő húr hossz-tartományban, míg ugyanez 120 m/s sebességnél az 5. ábrán elemezhető.

A teljes áramlási sebesség-tartományon igaz, hogy a karcsúbb szárny hatékonyabban fogja fel a felhőkben lebegő cseppeket az adott méret-eloszlás mellett. 40 m/s sebességnél a vastagabb szárny (1,5 m-es húr) maximális ütközési hatékonysága 0,5001-ről nő 0,8098-ra (0,2 m-es húr). Még drasztikusabb a különbség a belépő éltől távolabb, hiszen pl. 40 fokos szögtávolságban kétszeres, 55 foknál négyszeres, 60 foknál pedig már hétszeres ütközési hatékonyságot kapunk az említett két szárnygeometria esetén a karcsúbb (0,2 m-es húr) javára (4. ábra)!



4. ábra Az ütközési hatékonyság a belépő éltől számított szögtávolság és az áramlási sebesség függvényében, a vizsgált NACA0012 szárnyprofil esetében, 1,5 m-es húr hossz esetén



5. ábra Az ütközési hatékonyság a belépő éltől számított szögtávolság és az áramlási sebesség függvényében, a vizsgált NACA0012 szárnyprofil esetében, 1,5 m-es húr hossz esetén

Hasonló némileg a helyzet a 120 m/s-os áramlási sebesség-tartományban is, azzal a különbséggel, hogy a szárny-geometriából adódó eltérések az ütközési hatékonyságra vonatkozóan kisebbek (5. ábra). A sebesség növekedésével nyilvánvalóan egyre több felhőcsepp ütközik a szárnyhoz, de a karcsúbb szárny ekkor is nagyobb hatékonysággal gyűjti a cseppeket.

A repülőeszközök felületi jegesedésének csak egyik – bár igen fontos – momentuma az ütközési hatékonyság. A munkánkban bemutatott számítások a szárny felületére beérkező túlhűlt



vízfluxus értékének meghatározását teszik lehetővé, de a jégbevonat kialakulásának és geometriájának további feltételei is vannak, melyek tárgyalása jelen tanulmánynak nem képezik tárgyát. Mindazonáltal, vizsgálataink eredménye alapján elmondhatjuk, hogy ugyanolyan – a jegesedés kialakulását lehetővé tevő – feltételrendszer esetén a karcsúbb szárnyak jegesedési potenciálja lényegesen nagyobb, mint a vastagabb szárnyaké. Ennek oka pedig a geometriából fakadó eltérő mértékű ütközési hatékonyság, melynek pontos számítása elengedhetetlen bármely jégakkréciós modell esetén.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A munkánkban leírtak alapján elmondhatjuk, hogy a jégakkréciós modellekben számított ütközési hatékonyság értéke függ az áramlási sebességtől és még inkább, a szárny geometria alakjától. Tanulmányunkban a széles körben alkalmazott NACA0012 szárnyprofil vizsgáltuk különböző húr hossz és áramlási sebesség esetén az ütközési hatékonyság szempontjából. A vizsgálatok eredményeképpen a következőkben foglalhatjuk össze az eredményeinket:

- az ütközési hatékonyság eloszlása a szárny mentén alapvetően a szárny karcsúságától (geometriájától, jelen esetben az adott NACA0012 szabványnál, a húrtól) függ, az áramlási sebesség hatása lényegesen kisebb;
- adott áramlási sebesség mellett, a karcsú (0,2 m-es húr) szárny a vizsgált 1,5 m-es húrral rendelkező szárnyhoz képest, mintegy 1,5-7-szeres ütközési hatékonysággal rendelkezik a belépő éltől számított szögtávolság függvényében;
- a karcsú szárnyak (0,2 m-es húr) esetén a szárnyfelület szinte teljes egészében ütközik a felhőcseppekkel (határszög 88, 89, 89 fok), míg a vastagabb szárny esetén ugyanez az érték rendre csak 78, 81, 82 fok a vizsgált sebességtartományok esetén ( $U_1=40$  m/s,  $U_2=80$  m/s és  $U_3=120$  m/s).

A publikáció a TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 „Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások”, pályázat keretében készült. A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg.

### FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] GENT, R. W., DART, N. P., CANSDALE, J. T.: Aircraft Icing. Philosophical Transactions of The Royal Society. Lond. A., 358, 2000. 2873-2911.
- [2] LIST, R.: Ice accretions of structures. Journal of Glaciology, Vol. 19. , No. 81, 1977, 451-465.
- [3] LOZOWSKI, E. P., STALLABRASS, J. R., HEARTY, P. F.: The Icing of an Unheated, Nonrotating Cylinder. Part I: A Simulation Model, Journal of Climate and Applied Meteorology, Vol. 22., 1983, 2053-2062.
- [4] SAEED, F.: State-of-the-art aircraft icing and anti-icing simulation. ARA Journal, Vol. 2000-2002, No. 25-27, 2000, 106-113.
- [5] MAKKONEN, L. and STALLABRASS, J. R.: Experiments on the Cloud Droplet Collision Efficiency of Cylinders. Journal of Climate and Applied Meteorology, Vol. 26., 1987, 1406-1411.
- [6] BOTTYÁN, Z.: Estimation of structural icing intensity and geometry of aircrafts during different conditions - a fixed-wing approach. Időjárás, Vol. 115., No. 4., 2011., 275-288.
- [7] FINSTAD, K. J., LOZOWSKI, E. P., MAKKONEN, L.: On the median volume diameter approximation for droplet collision efficiency. Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 45., 1988, 4008-4012.
- [8] ABBOTT, I. A., von DOENHOFF, A., E.: Theory of wing sections. Dover, New York, 1959.
- [9] GERESDI, I.: Felhőfizika. Dialóg Campus Kiadó. Budapest-Pécs. 2004.