

**Dr. Bottyán Zsolt – Hadobács Katalin**

## **A REPÜLŐGÉPEK FELÜLETI JEGESEDÉSÉNEK TERMODINAMIKAI FOLYAMATAIRÓL – A REPÜLÉSI SEBESSÉG HATÁSA**

### **BEVEZETÉS**

A repülőgépek felületén megjelenő jégbevonat (structural icing) számos veszélyt rejt repülés közben, amennyiben nem gátolják meg annak kialakulását (de-icing) vagy nem távolítják el azt a repülőgép felületéről (anti-icing). A jégakkréció okozta problémák közül ki kell emelnünk az aerodinamikai valamint a repülőgép felületén elhelyezkedő szenzorokra gyakorolt hatásokat. [1]

A repülésmeteorológia egyik kiemelt feladata, hogy a repülőgép személyzetét időben tájékoztassa – többek között – a potenciális jegesedési veszélyről. A modern, korrekt jegesedési prognózisoknak a következő feltételeknek kell megfelelniük:

- Minél pontosabban meg kell jelölniük a várható felületi jegesedés helyét a légkörben, figyelembe véve a légköri állapotokat (felhőzet típusa, nedvességi karakterisztikák, hőmérséklet stb.)
- Meg kell adniuk a jegesedés intenzitását, lehetőleg az ICAO ajánlásaiban szereplő osztályozás figyelembe vételével
- Prognosztizálniuk kell a jégbevonat várható alaki tulajdonságait, különös tekintettel a legveszélyesebb, szarv alakú (horn-shaped ice) jégbevonat kialakulására
- Mindezeket, adott repülőgép típusokra vagy repülőgép osztályokra vonatkozó geometriai és aerodinamikai kezdeti feltételekkel kell megadnia

Természetesen lehetőség van további prognosztikai outputok készítésére is (határértékekre vonatkozó előrejelzések, repülési időtartam becslések készítése adott jegesedési szituációra vonatkozóan stb.).

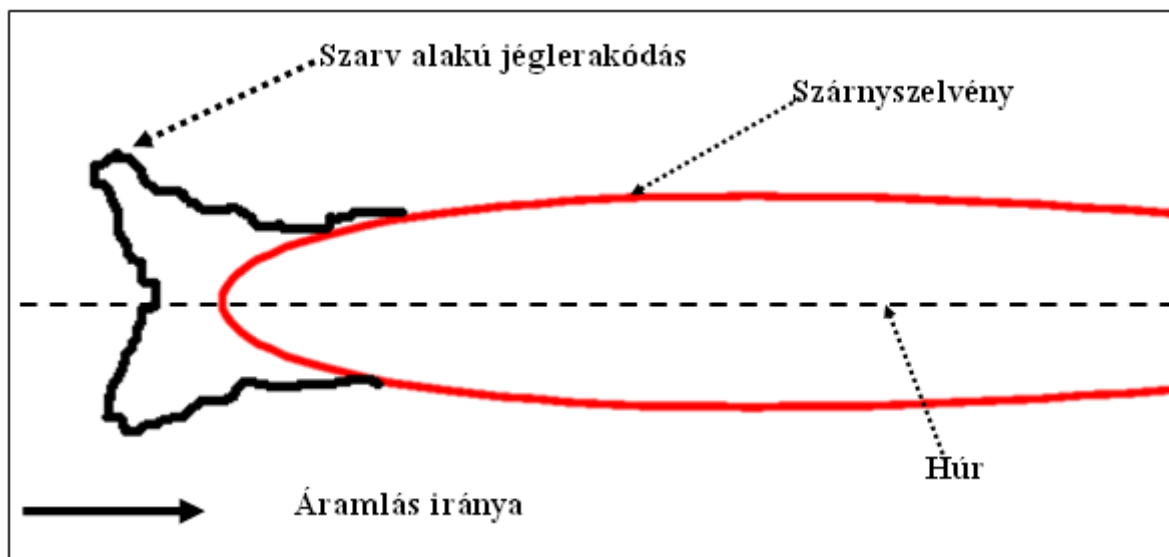
A jegesedési prognózisokkal szemben megfogalmazott elvárások megkövetelik, hogy az előrejelzési folyamatba - a meteorológiai állapotjelzők korrekt predikcióján túl – a repülőgép felületén várható jégakkumuláció becslését is be kell illeszteni (ice accretion model). Tekintve, hogy a jégbevonat kialakulásában számos fizikai, elsősorban termodinamikai folyamat vesz részt, munkánkban ezeket fogjuk áttekinteni, elemezni.

### **A FELÜLETI JEGESEDÉS GENETIKÁJÁNAK RÖVID ÁTTEKINTÉSE**

Légkörünk egyik legfontosabb összetevője, a mindhárom halmazállapotban előforduló víz. Légnemű formában gyakorlatilag a teljes troposzférában előfordul, ugyanakkor a koncentrációja tág határok

között változik (0-4 tf%). Folyékony és jég formában alapvetően a felhőképződéshez kötődik, egyrészt felhőcseppeket valamint a felhőzetből hulló csapadékot képezve. A repülésre veszélyes jégbevonat kialakításáért – a folyadékokra különböző mértékben jellemző speciális halmazállapotban – az ún. túlhűlt fázisban levő vízcseppek a felelősek. A túlhűlt fázis azt jelenti, hogy a nagy tisztaságú, kis átmérővel rendelkező vízcseppek jóval a 0°C hőmérséklet alá (akár -30°C) is képesek hűlni anélkül, hogy a fagyás bekövetkezne. Ugyanakkor ez az instabil fázis rendkívül gyorsan képes átalakulni – egy a vízre jellemző kristályszerkezet kialakításának során – fagyott halmazállapotba az adott fagypont alatti hőmérsékleten, ha valamilyen külső perturbáció éri (pl. ütközés).

Amikor a repülőgép olyan felhőzetben repül, amelyben az adott szinten a környezeti hőmérséklet fagypont alatti, számos túlhűlt felhőcseppel ütközik, melynek során a becsapódó cseppek a felületre kifagynak. Ennek a folyamatnak az eredménye a különböző alakú, színű, sűrűségű és szilárdságú, gyakran érdes felületű jégbevonat, amely az áramlásnak kitett felületeken halmozódik fel leginkább. Nyilvánvaló, hogy az időegység alatt a repülőgép felületén képződött jégbevonat vastagsága (így tömege is) függ az ütközésben részt vett cseppek fluxusától, ami pedig arányos a túlhűlt folyékony víztartalommal (Liquid Water Content, LWC) és a repülés sebességével (True Airspeed, TAS). Másfelől, nem minden túlhűlt vízcsepp ütközik a felülettel, így az említett fluxust még az ún. ütközési hatékonyság (collision efficiency) is jelentősen befolyásolja.



1. ábra. Szarv alakú jégakkrécio a szárny belépő élének környezetében

A felhőcseppek kifagyása ugyanakkor halmazállapot-változással járó folyamat, melynek során jelentős mennyiségű hó is felszabadul, különös tekintettel a víz magas fagyáshőjére. Amíg ennek a hőmennyiségnek a döntő része eltávozik a felszín közeléből, a beérkező cseppek mindegyike megfagy és a belépő él mentén mérhető a maximális jégvastagság. Mindaddig, amíg ez a helyzet fennáll a jégréteg növekedése száraz jellegű (dry-growth icing). Ha azonban ennek a hőnek a jelentős része nem tud eltávozni a környezetbe, akkor ez az energia a jégfelszín hőmérsékletének emelésére fordítódik, aminek

következtében a felszín hőmérséklete elérheti a 0°C-ot, fagypont alatti környezeti hőmérséklet mellett is. Ennek eredménye, hogy – amennyiben nagy a beeső tühült vízfluxus – a belépő él környezetében nem fagy meg a beérkezett víz, hanem folyékony marad és az áramlás irányába tovább folyik, a felszín feletti vízfilm formájában (runback water). A belépő éltől távolodva, a görbületi viszonyok miatti vízfluxus-csökkenés azt eredményezi, hogy csökken a fagyáshő és így elkezd megfagyni a víz egy része. Ahogy távolodunk a stagnációs vonaltól (belépő éltől) a jégvastagság növekszik és kialakul a legveszélyesebb jégbevonat az ún. szarv alakú jégformáció. Amikor megjelenik a vízfilm réteg, akkor már nedves jégakkrecióról beszélünk (wet-growth icing) (1. ábra). [1]

## A JÉGBEVONAT KIALAKÍTÁSÁBAN SZEREPET JÁTSZÓ FIZIKAI FOLYAMATOK

Ahhoz, hogy a jégbevonat kialakulásának, annak fejlődésének fizikáját megértsük, számba kell vennünk azokat a hatásokat, melyek kormányozzák ezt a folyamatot. A kialakuló jégfelszínre vonatkozóan felírhatjuk az ún. energia-egyensúlyi egyenletet, mely a különböző termodinamikai folyamatokra vonatkoztatott egyenlet. [2], [3], [4], [5]

$$Q_c + Q_e + Q_v + Q_k + Q_f + Q_w + Q_i + Q_r + Q_w^* + Q_f^* = 0 \quad (1)$$

ahol:

- $Q_c$  az akkréciós felszín és a légáramlás közötti szenzibilis hőfluxus;
- $Q_e$  a párolgásból származó latens hőfluxus;
- $Q_v$  a belső súrlódásból (viszkozitás) és adiabatikus összenyomódásból származó hőfluxus;
- $Q_k$  a becsapódó vízcseppek kinetikus energiájából származó hőfluxus;
- $Q_f$  a becsapódó vízcseppek fagyásából származó latens hőfluxus;
- $Q_w$  a megfagyó vízcseppek melegítésére szolgáló szenzibilis hőfluxus;
- $Q_i$  a megfagyó jég és az alatta lévő felszín közötti hőfluxus (hővezetés);
- $Q_r$  hosszú hullámú sugárzási hőfluxus;
- $Q_w^*$  a felszíni vízfilm melegítésére szolgáló szenzibilis hőfluxus (hasonlóan, mint  $Q_w$  esetében);
- $Q_f^*$  ugyanaz, mint  $Q_f$  csak a felszíni vízfilmre vonatkozóan.

Az (1) egyenletben első helyen szereplő tag becslésére az alábbi összefüggést adhatjuk meg:

$$Q_c = h(T_a - T_s) \quad (2)$$

ahol,  $T_a$  és  $T_s$  az áramlás környezeti (totális) valamint az akkréciós felszín hőmérséklete és  $h$  a konvektív hőátviteli együttható. A hőátviteli együttható számításához felhasználhatunk többféle közelítést (pl. hengerfelület). Célszerű érdességgel rendelkező felszínre kidolgozott számítást használni a pontosabb becslés érdekében. [6]

A párolgáshő fluxusára vonatkozó tagot a következőképpen írhatjuk le:

$$Q_e = h \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{0.63} \frac{\varepsilon l_v}{p c_p} (e_a - e_s) \quad (3)$$

ahol,  $Pr$  és  $Sc$  a Prandtl- és a Schmidt-számot,  $\varepsilon$  a vízgőz és a száraz levegő molekulaszúlyának arányát,  $l_v$  a vízre vonatkoztatott párolgáshőt, a  $p$  a statikus légnyomást,  $c_p$  a levegő állandó nyomáson értendő fajhőjét,  $e_a$  és  $e_s$  pedig a  $T_a$  illetve  $T_s$  hőmérsékletekhez tartozó telítettségi gőznyomást jelenti. Amennyiben a jégakkumuláció száraz jellegű, úgy  $l_v$  helyett az  $l_s$  a jégre vonatkozó szublimációs hőt kell alkalmazni.

A következő hatást az áramló levegő adiabatikus összenyomódásából valamint a határretegben megjelenő belső sűrűdésből (viszkózitás) származó hőfluxus jelenti:

$$Q_v = \frac{h r_c U^2}{2 c_p} \quad (4)$$

ahol,  $U$  az áramlás sebessége,  $r_c$  pedig egy módosító tényező (adott felületre specifikus). Ez a fizikai tényező különös szerepet kap abban az esetben, ha az áramláshoz tartozó Mach-szám eléri vagy meghaladja a 0,3 értéket (ebben az esetben az adiabatikus összenyomódása a levegőnek meghaladja az 5%-ot). [7]

Az áramlás során becsapódó vízcseppecskék kinetikus energiáját az alábbi összefüggéssel tudjuk figyelembe venni:

$$Q_k = \frac{1}{2} R_w U^2 \quad (5)$$

ahol,  $R_w$  a becsapódó cseppek tömegáramát jelenti és  $R_w = \beta W U$  alakban írható. Itt  $\beta$  az ún. ütközési hatékonyságot reprezentálja, aminek számítását pl. henger esetében több szerző is pontosította. [4], [8], [9]

A beeső vízmennyiség megfagyásakor képződő latens hőmennyiség becslésére a következő összefüggést alkalmazhatjuk:

$$Q_f = n R_w l_{fs} \quad (6)$$

ahol,  $l_{fs}$  a fagyáshő  $T_s$  hőmérsékleten és  $n$  a beérkező és a megfagyott vízmennyiség arányát jelző szám. Nyilvánvaló, hogy amennyiben  $T_s < 273,15K$  akkor  $n=1$  (a teljes vízmennyiség

megfagy, azaz száraz jellegű a jegesedés), ha pedig  $T_s = 273,15K$ , akkor pedig  $n < 1$  (a beeső víznek csak egy része fagy meg, vagyis nedves jellegű a folyamat).

A beérkező vízmennyiség melegítésére szolgáló szenzibilis hőmennyiséget, ami arra szolgál, hogy a vízcseppeket a  $T_s$  egyensúlyi hőmérsékletre melegítse, az alábbi formulával adhatjuk meg:

$$Q_w = R_w \bar{c}_w (T_a - T_s) \quad (7)$$

ahol,  $c_w$  a víz átlagos fajhője a  $T_a$  és  $T_s$  hőmérsékleti tartományban. A közelítéseknél gyakran konstansnak veszik.

A hosszúhullámú sugárzási fluxus a beeső vízcseppek és a  $T_s$  egyensúlyi hőmérséklettel rendelkező akkréciós felszín között, a következőképpen írható fel linearizált alakban:

$$Q_r = \sigma(\epsilon_a T_a^4 - \epsilon_s T_s^4) = a(T_a - T_s) \quad (8)$$

ahol,  $\epsilon_a$  és  $\epsilon_s$  az ún. emisszivitása a levegőre és az akkréciós felszínre vonatkoztatva,  $\sigma$  a Stefan-Boltzmann állandó és  $a$  egy konstans érték.

A nedves jellegű jegesedés esetén kialakuló vízfilm mennyiségéből és annak áramlásából származó hőmennyiség értékét a következő formulával becsülhetjük meg:

$$Q_w^* = R_w^* \bar{c}_w (T_s^* - T_s) \quad (9)$$

ahol,  $R_w^*$  az adott felületre beérkező folyadékvíz tömegárama,  $T_s^*$  pedig a vízfilm hőmérséklete. Természetesen amennyiben van valamennyi víz az akkréciós felszínen, úgy a  $T_s^*$  hőmérséklet egyenlő  $273,15K$ -nel.

Végül számolnunk kell a vízfilm egy részének fagyásával is, így ennek a latens hőnek a figyelembe vételét az alábbi összefüggéssel adhatjuk meg:

$$Q_f^* = nR_w^* l_{fs} \quad (10)$$

## A FIZIKAI FOLYAMATOK NAGYSÁGRENDJEINEK ALAKULÁSA JEGESEDÉS KÖZBEN A REPÜLÉSI SEBESSÉG FÜGGVÉNYÉBEN

Természetesen az említett hatások eltérő mértékben szólnak bele a jegesedési folyamatba, hiszen nagyságrendjük jelentősen függ az adott meteorológiai, aerodinamikai és geometriai feltételektől. A (3) egyenlet elemzéséből világosan látszik, hogy a jegesedés intenzitása, geometriája az alábbi fizikai és geometriai jellemzőktől függ:

- a statikus környezeti hőmérséklettől,
- a statikus légnyomástól,
- a légkör folyékony víztartalmától,
- a felhőzet cseppméret-eloszlásától,

- az áramlás sebességétől és
- a repülőgép fizikai méretétől valamint alakjától, különös tekintettel a szárnyakra.

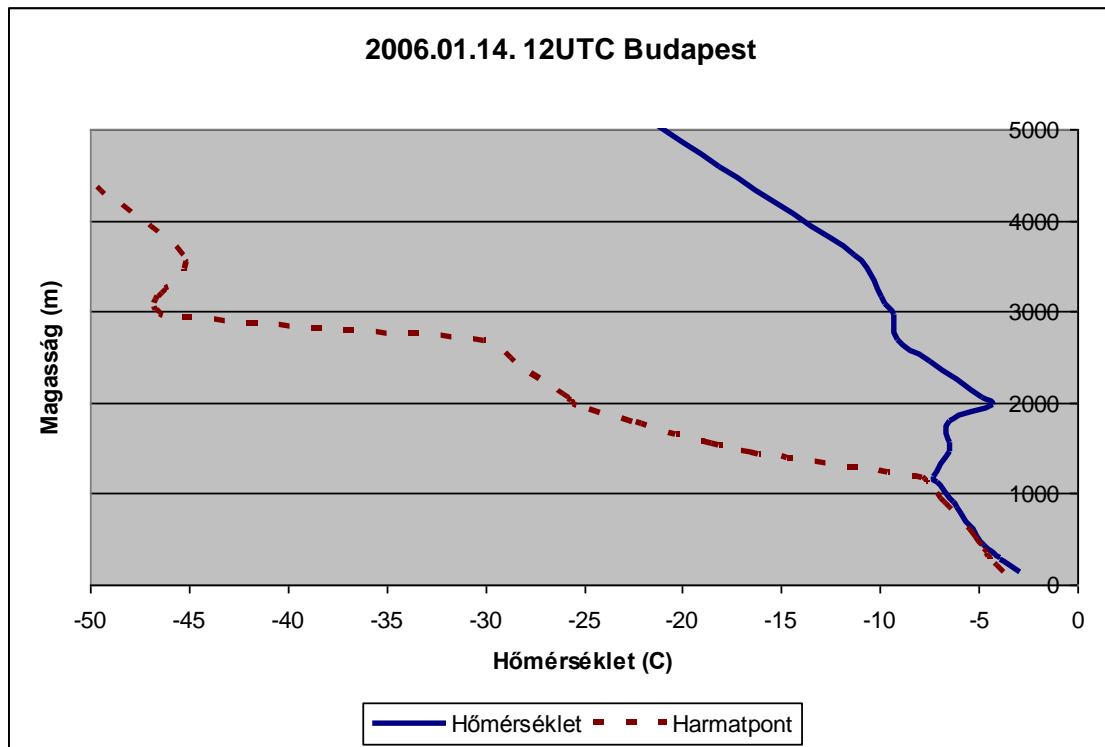
A repülési sebesség (áramlási sebesség) hatásának vizsgálatához rögzítsünk le egy jellegzetes  $\Gamma$ -eloszlású cseppméret-eloszlást a felhőben, 20 $\mu$ m-es átlagos cseppátmérővel. [6] Ez az alkalmazott cseppméret-eloszlás alapvetően a réteges (sztratiform) jellegű felhőzetre igaz. Továbbá tegyük fel, hogy a repülőgép szárnyprofilját a NACA012-es kódú szelvény közelíti (számos kisrepülőgép pl. Cessna típusok is ezzel a profillal rendelkeznek). A görbületi sugarat állítsuk a Cessna-182 repülőgép adataiból számolt  $D_c = 0.04709$  m-es értékre. Ezek után már csak a  $T_a$ ,  $p$ , LWC és az  $U$  (TAS) maradnak a (3) egyenletben, mint független változók. A meteorológiai és aerodinamikai körülményeket egy konkrét szituációból származtatjuk a konzisztencia miatt.

A környezeti körülményeket egy alacsony stratus által okozott jegesedési helyzetben történt mérésből határozzuk meg. 2006. január 14-én több repülőgép is jegesedést jelentett leszállás közben a Ferihegyi Nemzetközi Repülőtéren (LHBP). Ahogy az 1. táblázatból látszik 12.57 UTC és 18.56 UTC között három alkalommal jelentettek erős jegesedést a felszín és 5000 láb magasság között.

<b>Time (UTC)</b>	<b>AIREP text</b>
2006-01-14 12:57:26	<b><u>SEV ICING</u></b> BTN GRD AND 2000FT ON 31R FINAL BY B737
2006-01-14 15:28:58	<b><u>SEV ICING</u></b> BTN GRD AND 5000FT ON 13R FINAL BY B737
2006-01-14 18:56:52	<b><u>SEV ICING</u></b> BTN 5000FT AND GROUND ON FINAL 13R

1. táblázat. Erős jegesedést jelentő AIREP produktumok Budapest Ferihegy (LHBP) körzetében 2006. január 14-én.

Az adott időponthoz és helyhez legközelebbi Budapest-Lőrincen működő meteorológiai állomás által 12 UTC-kor mért vertikális hőmérsékleti és nedvességi profilból egyértelműen látszik az alsó 1200m vastag réteg telítettsége (hosszvetőlegesen eddig a magasságig volt észlelhető a stratus) (2. ábra). Ugyanakkor az is észre vehető, hogy a hőmérséklet az adott légrétegben -3 °C és -7 °C között volt. Feltesszük, hogy a felhőben a folyékony víztartalom 0,5 g/kg értékű volt, ami megfelel egy nedves stratus felhőzetben előforduló értéknek.



2. ábra. A hőmérséklet és a harmatpont vertikális eloszlása Budapest-Lőrinc állomáson, 2006. január 14-én

A bemutatott meteorológiai helyzetből adódó hőmérsékletet  $-5^{\circ}\text{C}$ -nak, az ehhez tartozó magasságból származó légnyomást 970 hPa-nak, a folyékony víztartalmat 0,5 g/kg-nak véve és a repülőgép sebességét (áramlási sebességet) 30, 40, 60 és 80 m/s-nak véve, kiszámítottuk a különböző termodinamikai folyamatok fluxusait a belépő élre vonatkozóan (2. táblázat).

Termodinamikai folyamat jele	Áramlási sebesség (m/s)			
	30	40	60	80
$Q_c$	-969,5	-1119,5	-1371,1	-1583,2
$Q_e$	-654,8	-756,1	-926,0	-1069,3
$Q_v$	86,9	178,4	491,6	1009,2
$Q_k$	3,1	7,9	29,5	74,3
$Q_f$	2200,2	3189,8	5298,1	7500,4
$Q_w$	-145,4	-210,8	-350,0	-495,4
$Q_r$	-22,0	-22,0	-22,0	-22,0
$Q_w^*$	0,0	0,0	0,0	0,0
$Q_f^*$	-498,5	-1267,8	-3150,1	-5413,8

2. táblázat. A különböző jegesedésben fellépő termodinamikai folyamatok fluxusai ( $\text{W/m}^2$ ) a belépő élre vonatkozóan, különböző áramlási sebesség esetén és adott meteorológiai feltételek mellett

$$(T_a = -5^{\circ}\text{C}; p = 970 \text{ hPa}; \text{LWC} = 0,5 \text{ g/kg})$$

Világosan látszik, hogy minden sebességtartományban a  $Q_f$  folyamat rendelkezik a legmagasabb fluxussal, de nagyon jelentős tételt képvisel a  $Q_c$ ,  $Q_e$ , és a  $Q_f^*$  hatás is. Az áramlási sebesség növekedésével a következők állapíthatóak meg (kvalitatív megközelítés):

- a  $Q_f$  faktor konstans, hiszen az akkréciós felszín és a környezet közötti hőmérséklet különbség állandó (mert már 30 m/s-nál is nedves jellegű a jegesedés, tehát a  $T_s=273.15K$ ).
- a  $Q_w^*$  -gal jelzett folyamat definíciójából következik, hogy nedves jegesedés esetén a hozzá tartozó fluxus zéró.
- A  $Q_f^*$  fluxus jelentős emelkedése a sebességgel azt jelzi, hogy az energetikai viszonyok megváltozása miatt, a beeső vízmennyiség egyre nagyobb része képtelen lesz megfagyni a belépő élnél és el fog folyni a szárny felületén az áramlás irányával megegyezően (runback water). A  $Q_f^*$  -gal jelzett folyamat erősödése tehát a jégbevonat geometriai átalakulásának indikátora, amely a korábbi maximális jégakkréció helyének (belépő él) eltolódását jelzi mindkét irányban. Ez pedig a korábban már említett szarv-szerű jégfelhalmozódáshoz vezet (1. ábra).
- A  $Q_w$  fluxus növekedése jelen esetben kizárólag a beeső vízmennyiség sebességváltozás miatt bekövetkező növekedéséből fakad, hiszen a hőmérsékletek ( $T_a$  és  $T_s$ ) nem változtak.

Ha megvizsgáljuk a 30 és a 80 m/s sebességnél számított fluxusokat (képezve ezek arányát) a következőket mondhatjuk (kvantitatív megközelítés):

- Minden olyan folyamat, amely nem zéró fluxussal rendelkezett az alacsonyabb (30 m/s) áramlási sebességnél, annak a fluxusa jelentősen nőtt a magasabb sebességtartományban (80 m/s), kivéve - a már említett okok miatt - a  $Q_f$  esetében, ahol konstans érték jelenik meg. Ez a növekedés az 1,6-szoros értéktől a 24-szeresig terjed.
- A közvetlen áramlási sebességtől függő  $Q_v$  és  $Q_k$  fluxusok rohamosan nőnek a sebesség növekedésével! A  $Q_k$  értéke közel 25-szörösre, a  $Q_v$  pedig mintegy 12-szeresre változott a vizsgált sebességtartományban. Ezzel együtt, a  $Q_k$  hatás még így is elhanyagolható, a többihez képest (további sebességnövekedésénél ez már nem feltétlen igaz)! A  $Q_v$  faktor értéke 60 m/s sebesség felett mindenképp jelentős szerepet játszik a jégbevonat kialakításában.
- A sebesség növekedése a  $Q_f^*$  fluxust is nagymértékben befolyásolja (több, mint 10 szeresére nőtt az értéke) ami arra enged következtetni, hogy a sebesség növekedése egyértelműen az akkréciós felszínen megjelenő vízfilm mennyiségének rohamos növekedését vonja maga után, ami a veszélyes szarv-alakú jégbevonat képződésének kedvez.

A vizsgált repülési sebességi tartomány az említett Cessna-185 repülőgép minimális és maximális repülési sebességének határértékeiből adódott. [10] A sebesség megváltozása az egyéb környezeti feltételek állandósága mellett azt eredményezi, hogy a repülőgép belépő élein jelentősen elérő vastagságú és geometriájú jégbevonat képződik az alacsonyabb és a magasabb repülési sebesség esetén! Egy jól ismert jégakkumulációs modellt alkalmazva, becslést is adhatunk a jegesedés intenzitására a belépő élre vonatkozóan. [4] Számításaink eredményeit a 2. táblázatban foglaltuk össze.



Repülési sebesség (m/s)	Kifagyási arány (%)	Akkumulációs ráta (mm/perc)	Jegesedési intenzitás
22	100,0	0,29	Gyenge
30	77,3	0,34	Gyenge
40	60,3	0,39	Gyenge
<b><u>60</u></b>	<b><u>40,5</u></b>	<b><u>0,43</u></b>	<b><u>Közepes</u></b>
80	27,8	0,42	Gyenge
100	17,6	0,34	Gyenge
140	0,0	0,00	Nincs

3. táblázat. A jégakkréció intenzitásának változása és a beeső víz kifagyási aránya a belépő élre vonatkoztatva a repülési (áramlási) sebesség függvényében, adott állandó környezeti paraméterek mellett ( $T_a = -5^\circ\text{C}$ ;  $T_s = 273,15\text{K}$ ;  $p = 970\text{ hPa}$ ;  $MVD = 20\mu\text{m}$ ). A vastag keret a Cessna-185 repülési sebességtartományát jelöli.

A fenti táblázatban megadott repülési sebességek az adott Cessna-185 repülőgép repülési sebességtartományán kívüli értékeket is tartalmaznak (félkövér tartományon kívüli cellák). Ezeket a termodinamika folyamatok hatásainak pontosabb megvilágítása céljából alkalmaztuk és tudnunk kell, hogy ezekkel a sebességekkel az adott típus nem repülhet! A közölt eredményekből az alábbi megállapításokat tehetjük:

- A vizsgált repülési sebességek közül a belépő él jegesedésének maximális intenzitását 60 m/s-nél tapasztalhatjuk. A sebesség csökkenése és növekedése is a jégfelhalmozódás mértékének csökkenését vonja maga után!
- Az adott környezeti feltételek mellett száraz jegesedés csak 22 m/s sebességig fordulhat elő, ennél gyorsabb áramlás mellett már nedves jellegű a jegesedés.
- A beeső vízcseppekből 140 m/s-nál nagyobb sebesség mellett, nem lesz jégfelhalmozódás a belépő élen annak ellenére, hogy a beeső túlhűlt vízfluxus rendkívül nagy. Ennek oka, hogy nagymértékben megnő az aerodinamikai és viszkózus fűtés és a nagy mennyiségű beeső víz fagyásából származó latens hő elvezetése nem lehetséges az egymást követő vízcseppek ütközése közötti nagyon rövid idő alatt (akkumulálódik a hő).

Meg kell azonban jegyeznünk, hogy ezek az adatok a belépő élre vonatkoznak 0 fok állásszög esetére, ami nem zárja ki, hogy a szárnyfelület belépő éltől távolabbi felületén ne lehetne nagyobb intenzitású a jégfelhalmozódás! Sőt, ellenkezőleg, pl. 60 m/s repülési sebesség esetén, a szárny egyes pontjain, a belépő élnél mért jéglerakódási intenzitás 3-szorosa adódik, 1,15 mm/perc értékkel! Ez erős szarv-szerű jegesedés kialakulását jelenti! Valójában a Cessna-185 teljes repülési tartományában nedves jellegű a jegesedés, tehát adva van a feltétel a szarv-szerű jéglerakódás kialakulásához, amely aerodinamikai szempontból a legveszélyesebb jegesedés fajta. [1], [11]

A vizsgálatainkból egyértelműen kiderül, hogy a jegesedési folyamatot jelentősen befolyásolja a repülőgép sebessége (áramlási sebesség) aminek ismerete nélkül a jegesedés intenzitásának becslése nem lehetséges megfelelő pontossággal. Ezért törekedni kell arra, hogy a jégakkumuláció becslésekor vegyük figyelembe a repülőeszközök repülési sebességtartományait, vagyis alkalmazzunk olyan jégakkreciót számító modellt, ami többek között ezt a paramétert is figyelembe veszi.

## ÖSSZEFOGLALÁS

A repülőgépek felületi jegesedését összetett, termodinamikai folyamatok kormányozzák. Ezek természetesen eltérő nagyságrendekkel vesznek részt a jégbevonat kialakításában. Vizsgálataink azt mutatják, hogy a repülési sebesség (áramlási sebesség) változásával jelentősen módosul a felületi jégakkumuláció intenzitása és alaki tulajdonsága egyaránt. Az is világossá vált, hogy a repülési sebességtartományban kialakulhat maximális jegesedési intenzitás, állandó környezeti és geometriai feltételek mellett.

## KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

A szerzők köszönetüket fejezik ki Kardos Péternek (HungaroControl) az AIRMET adatokhoz történő hozzáférésben nyújtott segítségéért.

### 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] MESSINGER , B. L.: Equilibrium temperature of an unheated icing surface as a function of airspeed. Journal of the Aeronautical Sciences, Vol. 20., No. 1, 1953, 29-41.
- [3] LIST, R.: Ice accretions of structures. Journal of Glaciology, Vol. 19. , No. 81, 1977, 451-465.
- [4] 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.
- [5] MAZIN I. P., KOROLEV, A. V., HEYMSFIELD, A., ISAAC, G. A., COBER, S. G.: Thermodynamics of Icing Cylinder for Measurements of Liquid Water Content in Supercooled Clouds. American Meteorological Society, Vol. 18., 2001, 543-558
- [6] GERESDI ISTVÁN: Felhőfizika. Dialóg Campus Kiadó, Budapest-Pécs, 2004.
- [7] ANDERSON, J. D.: Fundamentals of Aerodynamics. McGraw-Hill, New York, 2001.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] LAMBERT, M. ed.: Jane's All theWorld's Aircrafts. Jane's Publishing Co., London, United Kingdom. 1994.
- [11] BRAGG, M. B., BROEREN, A. P., BLUMENTHAL, L. A.: Iced-airfoili aerodynamics. Progress in Aerospace Sciences, Vol. 41., 2005, 323-362.