

Tuba Zoltán¹

MEREVSZÁRNYÚ REPÜLŐGÉPEK FELÜLETI JEGESEDÉSÉNEK ALTERNATÍV CSÖKKENTÉSI MÓDSZEREI²

Az időjárással összefüggésbe hozható repülőesemények tekintélyes része a repülőgépek felületi jegesedésének következménye, mely még azon repülőeszközök esetében is komoly veszélyt jelenthet, ahol modern jégtelenítő és a jegesedés kialakulását megakadályozó rendszerek, eljárások állnak rendelkezésre. A legnagyobb problémát azonban az olyan repülőeszközök esetén jelenti, amelyek nem rendelkeznek jégtelenítő berendezéssel. Az ilyen repülőgépek nem repülhetnek jegesítő körülmények között, de a tapasztalat azt mutatja, hogy akaratuk ellenére vagy akár szándékosan, de néha előfordul, hogy ilyen meteorológiai körülmények közé kerülnek. Jelen cikk célja a jegesedés és az elleni védelem rövid, áttekintő bemutatása mellett, hogy megmutassa egy esettanulmányon keresztül, hogy abban az esetben milyen lehetőségek vannak a jegesedés megszüntetésére vagy intenzitásának csökkentésére, ha jégtelenítő berendezés nem vagy csak korlátozottan áll rendelkezésre.

ALTERNATIVE METHODS OF AVOIDING STRUCTURAL ICING IN CASE OF FIXED-WING AIRCRAFTS

A significant part of weather related aviation accidents and incidents happens due to aircraft structural icing. Structural icing can cause serious effects on aircrafts even with up to date anti-icing and ice protection systems and methods. Nevertheless it means the biggest threat for the aircrafts without the mentioned systems. This kind of aircrafts shall not fly under icing conditions, but sometimes – whether wittingly or not intentionally – sometimes it happens. The aim of this paper beside a short introduction of icing and ice protection, to show by a case study that how the ice accretion can be eliminated or icing intensity can be decreased in case of aircrafts without anti-icing equipment.

BEVEZETÉS

Adott meteorológiai körülmények között a repülőgépek felületi jegesedésének lehetősége a repülésben részt vevők számára evidencia. Az ismert és sokat tárgyalt [1][2][3] jelenség során a repülőgépek sárkányszerkezetén, a műszerek külső érzékelőin, hajtóművén jég akkumulálódik, amely megzavarja vagy gátolja a repülés számos folyamatát. Ez kiemelten fontossá teszi a repülésmeteorológia területén a jegesedés pontos előrejelzését. A jégfelület kialakulásának folyamata, azaz a jég akkréciója számos módszerrel, különböző bonyolultságú modellekkel számszerűen is becsülhető. [4] Ezek használatához azonban mindenképpen szükséges a jegesítő meteorológiai környezet változóinak pontos ismerete. Mivel e modellek input paramétereinek megfelelő pontosságú előrejelzése nem egyszerű feladat a vizsgált változók nagy térbeli inhomogenitása miatt, ezért a repülésmeteorológiai előrejelzésekben a jegesedést alapvetően a várható jegesedési intenzitás lehetséges maximális értékével jellemzik [5]. Mindezt gyakran nem

¹ PhD hallgató, NKE, HHK, Katonai Repülő Tanszék, tubazoltan.met@gmail.com

² Lektorálta: Prof. Dr. Óvári Gyula ny. ezredes, egyetemi tanár, Nemzeti Közszolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Tanszék, ovari.gyula@uni-nke.hu

jégakkréciós modellek konkrét kimeneti értékeire, hanem a numerikus előrejelző modellek jegesedést nagyban befolyásoló output értékeinek együttállására alapozzák. A cél ugyanis alapvetően a jegesedési potenciál előrejelzése, ugyanis a jégakkréció konkrét számszerűsítéséhez az egyes repülőgéptípusok profilgeometriai adatai is szükségesek lennének, amelyek nagyban befolyásolják a kialakuló jégréteg kvantitatív és kvalitatív tulajdonságait is.

Ráadásul a keskeny szárnyprofilú, a belépőélnél nagy görbületi sugárral rendelkező (alapvetően kisebb méretű) repülőgépek általában nem rendelkeznek repülés közben a jegesedés elleni megfelelő védelemmel. Az üzemeltetési leírásaik ennek megfelelően tiltják is a jegesítő körülmények közötti repülésüket, azonban ennek – és néha a figyelmeztető meteorológiai előrejelzések, – ellenére előfordul, hogy ilyen körülmények közé kerülnek. Jelen cikk célja annak bemutatása, hogy a környezeti paraméterek tipikus eloszlását figyelembe véve az ilyen helyzetekben milyen lehetőségei vannak a pilótának a jegesedés megszüntetésére vagy kialakulási intenzitásának mérséklésére.

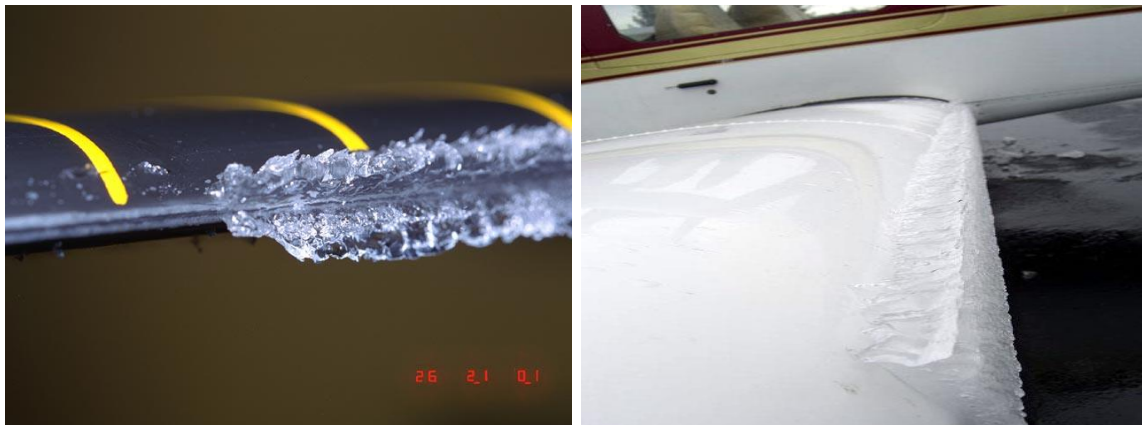
JEGESEDÉS

Ahogy a bevezetésben is említettem, a repülőgépek felületi jegesedését sok tudományos cikk, tankönyv vagy akár repülőgép üzemeltetési leírás is tárgyalta korábban. Emiatt és a cikk deklarált célját figyelembe véve, a teljesség igénye nélkül csak a felületi jegesedés két legfontosabb fajtája kerül bemutatásra jelen keretek között, továbbá a hajtóművek jegesedésének témakörétől is eltekintek.

A repülőgépek felületi jegesedésén azt a jéglerakódást értjük, ami adott meteorológiai és repülési kondíciók mellett a repülőgépek sarkányán keletkezik a túlhűlt vízcseppekkel való ütközés hatására [6]. Az így kialakuló jégréteg számos módon befolyásolja hátrányosan a repülőgép működését. Egyrészt a külső érzékelők és a kommunikációs rendszerek alkatrészeinek jegesedésével hamis adatok vagy adathiány illetve kommunikációs problémák léphetnek fel. Mindez már önmagában a repülőgép irányításának elvesztéséhez vezethet, de gyakrabban a súlyosabb gondot a felületi jegesedés hatására kialakuló aerodinamikai és kormányozhatósági problémák vagy az előbbiekkel való együttes fellépésük okozza. Ennek során erősen korlátozottá válhat vagy akár teljesen meg is szűnhet a kormányfelületek feletti kontroll illetve a fékszárnyak alkalmazhatósága. A kialakuló jégréteg jelentősen módosíthatja a szárnyprofil geometriáját és a repülőgép tömegét és súlyponti helyzetét is, ami összességében általában a felhajtóerő és a kritikus állásszög csökkenéséhez és az ellenállás valamint az átesési sebesség növekedéséhez, illetve a stabilitás, ezáltal a kormányozhatóság változásához (általában jelentős romlásához) vezet. A fent említett hatásokat természetesen jelentősen befolyásolja a jégakkréció intenzitása és a kialakuló jegesedés fajtája is. Az alábbiakban ezek kerülnek részletesebb ismertetésre.

A felületi jegesedés két alapvető fajtája a tiszta – vagy más néven sima – jég (clear ice) és a zúzmarás – vagy más néven durva – jég (rime ice) kialakulása. A tiszta jegesedés során a repülőgép belépőéleivel ütköző túlhűlt vízcseppek elenyésző része fagy meg azonnal, a maradék a légáramlásnak megfelelően hátrafolyik és ott megy végbe a fázisátalakulás a szerkezeti elemeken. Ezt a fajta jegesedést a kialakulási módszere miatt nedves típusú jégakkréciónak is nevezik. A tiszta

jegesedés általában olyan nem túl alacsony hőmérsékleten ($0-(-10^{\circ}\text{C})$) következik be, ahol a fagyáshő még elég a felszín kellő felmelegítéséhez, hogy az azonnali fagyást meggátolja. Ahogyan korábban említettem, ennél a jegesedésnél a jég kialakulása nem túl hirtelen, a fagyás folyamata előtt a felületen túlhűlt vízként egyenletesen elfolyva történik, ezért az akkumulálódó jégbevonat tiszta, átlátszó, viszonylag sima felületet képez, gyakran jellegzetes szarvszerű formát hozva létre. A kialakult szarvak tulajdonságaitól, méretétől függően különböző méretű turbulens áramlási zónák alakulhatnak ki környezetükben. Ez a szárnyfelületek esetében általában a repülőgép aerodinamikai paramétereinek még jelentősebb romlását idézi elő [7].



1. ábra A tiszta jegesedés tipikus megjelenési formái³

A zúzmarás jegesedés esetében a repülőgép belépőéleivel ütköző túlhűlt vízcseppek az érintkezést követően azonnal megfagynak. Ez a fajta jegesedés a tiszta jegesedésnél alacsonyabb hőmérsékleten (jellemzően $(-10)-(-20)^{\circ}\text{C}$ között) következik be, ezért itt nincs ideje a vízcseppeknek hátrafolyni megfagyás előtt, így a belépőélen egy nagyjából egyenletes vastagságú, de durva felületű jéglerakódás alakul ki.



2. ábra A zúzmarás jegesedés tipikus megjelenési formái⁴

³ forrás: http://en.wikipedia.org/wiki/Icing_conditions; <http://www.euroga.org/forums/flying/204-your-worst-icing-incident>

⁴ forrás: http://training.deicinginnovations.com/?page_id=740; <http://www.avweb.com/news/pilotlounge/194321-1.html?redirected=1>

A fentiek miatt ezt a jégképződési formát száraz növekedésű jegesedésnek is nevezik. Az akkumuláció során a gyors fagyás következményeként levegőzárványok alakulnak ki a jégkristályok között, ami miatt a jégréteg átlátszatlan, zúzmaraszerű formát ölt [7].

Természetesen az, hogy a fentiekben vázlatosan bemutatott alapvető fajták közül melyik fog kialakulni, az nem csak a hőmérséklet függvénye illetve a közöttük húzódó határvonal is inkább egy sávként értelmezendő, ahogyan azt a későbbiekben is látni fogjuk. Ez alatt azt kell érteni, hogy a korábban említett hőmérsékleti tartományok csak ökölszabályként alkalmazhatók, a két jegesedés kialakulása közötti elkülönítésre nem alkalmasak egyértelműen. A jelzett határok közelében bármelyik típus kialakulhat, de leggyakrabban ilyen esetekben a két jegesedési fajta keveréke (mixed ice) fordul elő.

JEGESEDÉS ELLENI VÉDELEM

Ahogy az élet számos más területén, itt is érvényes, hogy a legjobb védekezés a megelőzés. A jegesedés kialakulását két alapvető módon gátolhatjuk meg. Egyrészt megakadályozhatjuk, hogy jegesítő körülmények közé kerüljünk. Ebben sokat segíthet a repülés előtti vagy közbeni alapos tájékozódás az aktuális és előrejelzett meteorológiai viszonyokról. Még biztosabb módszer az olyan körülmények (ónos csapadék, téli frontális felhőzet, fejlődésben lévő gomolyfelhő vagy egyáltalán a felhőzet, stb.) direkt elkerülése, akár a repülési terv szignifikáns módosításán vagy törlésén keresztül, amelyek között jegesedésre lehet számítani. Ennek alkalmazása az olyan repülőgépek esetén kiemelten fontos, amelyek nem rendelkeznek repülés közbeni, aktív jégtelenítő berendezéssel. Ezt a repülőgép gyártók az adott típusok esetében minden esetben hangsúlyozzák az üzemeltetési leírásokban, információs kézikönyvekben [8]. Másrészt úgy is megakadályozhatjuk a jég kialakulását, hogy a repülőgép felületét megelőző céllal arra alkalmas anyagokkal (pl. glükol származékok) kezeljük. Ezek alkalmazási koncentrációját általában a környezeti hőmérséklet függvényében állapítják meg [9].

A már kialakult vagy növekedésben lévő felületi jég eltávolítására illetve a további növekedés korlátozására alkalmas módszereket három csoportba sorolhatjuk működési alapelvük szerint [9]:

- mechanikus jégtelenítő eljárások;
- fizikai-kémiai jégtelenítő eljárások;
- termikus jégtelenítő eljárások.

A mechanikus jégtelenítő eljárások a kialakult felületi jegesedést valamilyen mechanikai erőhatás segítségével választják le a sárkányszerkezetről, amely aztán a légáramlás hatására teljesen le is válik. A mechanikai erőhatást leggyakrabban pneumatikus borítás vagy nagyfrekvenciás vibráció segítségével váltják ki. Az utóbbi eljárás napjainkra lényegesen nagyobb teret nyert az előbbivel szemben. Ez egyrészt arra vezethető vissza, hogy a vibrációs módszer lényegesen energiahatékonyabban üzemeltethető, másrészt a pneumatikus eljárás a repülőgép alapvető aerodinamikai tulajdonságait is kedvezőtlenül befolyásolja. Egyébként mindkét módszert a jegesedés kialakulási intenzitásától függően ciklikusan üzemeltetik.

A fizikai-kémiai jégtelenítő eljárások alkalmazása során értelemszerűen valamilyen fizikai vagy kémiai hatás (pl.: az olvadáspont csökkentése) segítségével előzik meg vagy szüntetik meg a jegesedést. Ezek közül a leggyakrabban alkalmazott eljárás a folyadékos jégtelenítés. Ennek során egy külső vagy a repülőgépben elhelyezett tartályból jégtelenítő folyadékot juttatnak a sárkányszerkezet jegesedésnek kitett felületeire. A módszer hátránya, hogy a tartály méretétől és a jegesedés intenzitásától függően csak korlátozott ideig használható. Előnye viszont, hogy a kialakítása viszonylag olcsó és egyszerű valamint szükség esetén késlekedés nélkül alkalmazható. Emiatt a kisebb mérettartományba tartozó repülőgépek esetén gyakran ezt alkalmazzák egyedüli jégtelenítő rendszerként.

A termikus jégtelenítő eljárások lényege, hogy a jég kialakulásához és fennmaradásához szükséges hőmérséklet fölött tartsa a sárkányszerkezet jegesedésnek kitett részeinek felületi hőmérsékletét. Ezt általában valamilyen átviteli közeg segítségével vagy direkt módon elektronikus fűtéssel valósítják meg. Az átviteli közeg legtöbbször a hajtóműből származó forró levegő vagy olaj, amelyet a melegíteni kívánt felületek mentén cirkuláltatnak. A hő átadására használt anyag a felhasználás során fokozatosan lehűl, így ezek a rendszerek nem egyenlően hatásosak a hajtóműhöz közeli és attól távolabb elhelyezkedő felületek esetében. Az elektromos fűtőszálak esetében ez a probléma nem jelentkezik. Azok üzemeltetése azonban energiahatékonyságuk ellenére különösen magas teljesítményt igényelhet, ezért folyamatos működtetésük csak a legszükségesebb felületek mentén (pl.: a belépőél torlópont vonalában) történik, amúgy a jegesedés intenzitásának függvényében ciklikus fűtést biztosítanak [9].

A JÉGAKKRÉCIÓ BECSLÉSE

A későbbiekben bemutatásra kerülő esettanulmány során a hazai szakirodalomban is viszonylag gyakran alkalmazott [10][11][12] és elfogadható közelítéseket használó Lozowski-féle jégakkréciós modellt [4] alkalmaztam, ami a szárnyprofil belépőélét egy nem forgó hengerrel szimulálja és annak felülete és a környezet közötti energiafluxusok vizsgálatán alapul. A fentiek részletesebb ismertetéséért lásd Lozowski cikkét [4] vagy Bottyán és Hadobács munkáját [11]. A jégakkréció becslése során a bemeneti paraméterek közül a jegesedés kialakulása és akkumulációja szempontjából az alábbi változók játszanak központi szerepet:

- a szárnyprofil közelítő henger átmérője;
- a környezeti hőmérséklet;
- a légköri nyomás;
- az áramlási sebesség;
- a folyékony víztartalom;
- és az átlagos cseppméret.

Ezek közül a természetesen a közelítő henger átmérője a vizsgálatok során állandó értéket (0,04709 m) kapott, amely valós méret abban a repülőgép kategóriában, amelyek alapvetően nem rendelkeznek repülés közbeni jégtelenítő berendezéssel. Az időjárási helyzetet figyelembe véve szintén állandónak tekintettem az átlagos cseppméretet és a folyékony víztartalmat. Ez a konstans érték a csepp-

méret esetén $20\text{ }\mu\text{m}$ -t jelent, amely jól reprezentálja egy vastag esőrétegfelhő cseppméret karakteristikáját [13]. A folyékony víztartalom esetében $0,0003\text{ kg/m}^3$ állandó értéket feltételeztem. Feltettem továbbá, hogy ez az érték független a repülési magasságtól, annak ellenére, hogy a folyékony víztartalom vastag frontális rétegfelhőzetben tipikus vertikális profilt mutat, amely általában a felhőtető közelében éri el maximumát. Az egyszerűsítés oka az volt, hogy a felhő nagy részében a folyékony víztartalom vertikális gradiense eléggé kicsi, átlagos értéke független a felhő vastagságától valamint a magasságtól függő eloszlás a valós körülmények között sok lokális maximumot mutat [14]. Azaz a tipikus vertikális profil ellenére az in situ mérések azt mutatták, hogy a tényleges maximális érték akár a felhő alacsonyabb részein is lehet. Ez utóbbi tény Korolev és társai konceptuális modellje szerint a többcellás cirkuláció eredménye, azt hozzátéve, hogy a lokális maximumok az egyedi cellák felső részében helyezkednek el [14]. A fentiek miatt a megadott állandó érték inkább közelít a lokális maximumok értékéhez, mint a felhő teljes vertikális kiterjedését jellemző átlagos értékhez ($0,00014\text{ kg/m}^3$). Ennek oka, az a korábban már említett tény, hogy a jegesedés meteorológiai előrejelzése során a maximális jegesedési potenciál képvisel kiemelt szerepet.

A légköri nyomás változása a környezeti hőmérséklet és az áramlási sebesség megváltozásához képest elhanyagolható hatással bír a jegesedés intenzitására. Mintegy 300 hPa-os nyomásváltozás képes akkora intenzitásváltozást okozni, mint amekkorát kevesebb, mint 10 m/s-os sebességváltozás és kevesebb, mint $1\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékletváltozás generál. Ezért a fentiekben állandónak tekintett bemeneti paraméterek mellett a légköri nyomás értékét is állandónak tekintjük (850 hPa), azaz nem vesszük figyelembe a repülési magasság változásából eredő nyomásváltozás hatását.

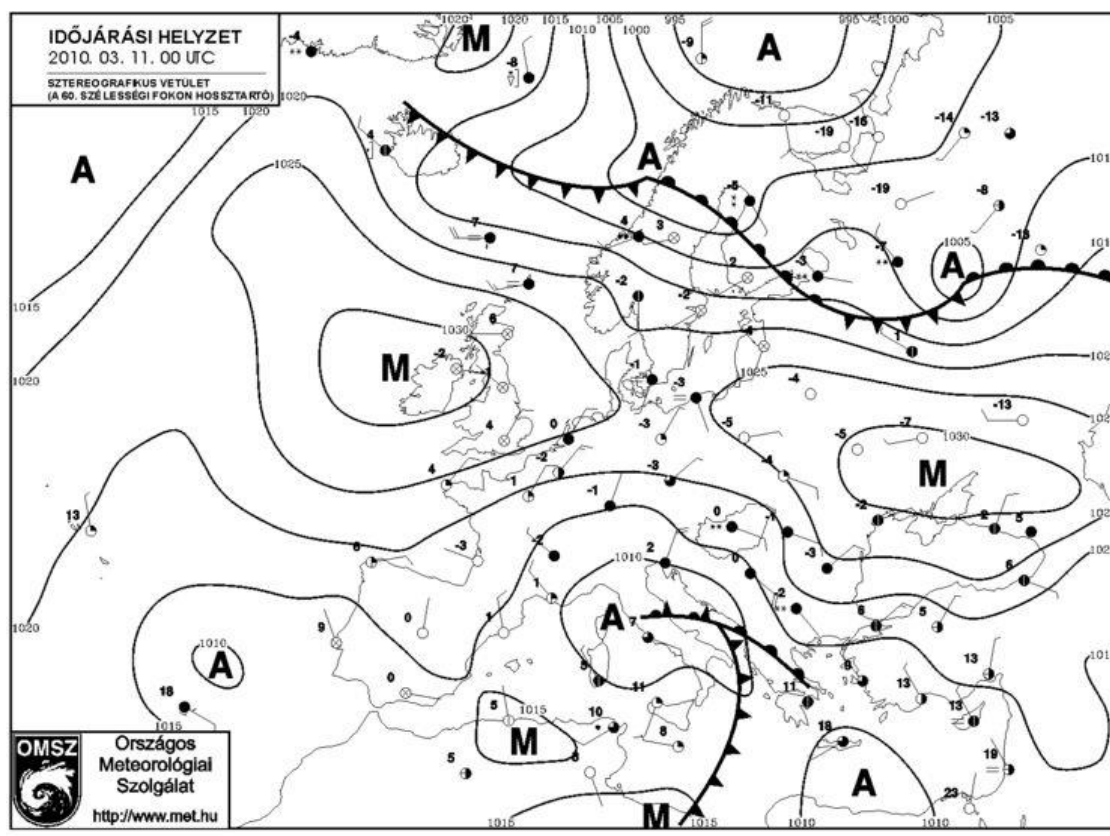
A fenti egyszerűsítéseket követően tulajdonképpen két bemeneti változó marad, a környezeti hőmérséklet és az áramlási sebesség, amelyek jegesedésre gyakorolt hatását az esettanulmány során a kiválasztott meteorológiai szituáció által meghatározott környezeti feltételeket figyelembe véve fogom vizsgálni. A jegesedés jellemzőjeként a jegesedés intenzitásának maximumát és egy adott hosszúságú útvonal során akkumulálódott jégképződés maximális vastagságát számítom ki, mert a jegesedési modell nem alkalmazható hosszabb időszakokra, mivel a jéglerakódás okozta profilgeometriai módosulásokat nem képes kezelni. A számításokat a 30–100 m/s-os sebesség- és $0\text{--}(-20^{\circ}\text{C})$ -os hőmérsékleti tartományokra készítettem el, igazodva a jegesedés környezeti és repülőgép tipikus üzemelési feltételeihez. A későbbiekben bemutatásra kerülő ábrákon azonban csak a fenti tartományok jelen cikk szempontjából releváns részei fognak megjelenni.

ESETTANULMÁNY

A Péczely-féle makroszinoptikus tipizálást tekintve a ciklonok melegfronti részéhez kapcsolódó típusok tekintélyes részt képviselnek az összes jelentett jegesedéssel kapcsolatos eseményből [12]. Ráadásul az ehhez hasonló szinoptikus helyzetekben a jéglerakódás szempontjából kedvező környezeti hőmérsékleti profil esetén a jegesedési réteg általában lényegesen nagyobb vertikális kiterjedésű, mint az anticiklonális, hideg légpárnás szituációkban. Ezért az esettanulmányhoz a fentiek-

ben említetthez hasonló szinoptikus helyzetet választottam ki, amely egy valós, korábban már többször tárgyalt jegesedési eseményt is okozott (pl.: [15]).

A kiválasztott időpont 2010. március 11-e, amikor is a közép-európai térség egy mediterrán ciklon előoldali áramlási mezejében helyezkedett el (3. ábra). A ciklon középpontja a polárfront mentén délnyugat felől észak-, északkeleti irányba haladt így melegfrontja fokozatosan Magyarország fölé helyeződött.

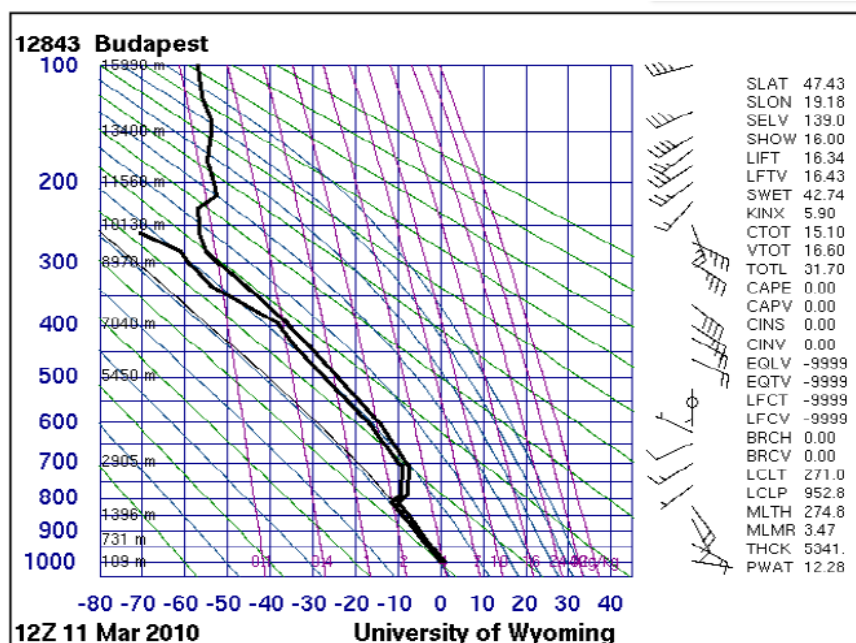


3. ábra: Az Országos Meteorológiai Szolgálat frontanalízise 2010. március 11. 00Z-kor⁵

Az adott nap folyamán ennek köszönhetően szinte országszerte előfordult csapadék, amelynek mennyisége a keleti országrészben jellemzően 5–10 mm között volt. Ez jellemzően hó formájában érte el a felszínt. A vastag felhőzet miatt a hőmérséklet szinte alig változott a nap folyamán és a jellemző napi maximum is csak kevéssel emelkedett 0 °C fölé. A 4. ábrán jól felismerhető a frontfelületre jellemző inverziós, izoterm réteg, amely a kora délutáni órákban még körülbelül 1800 méter magasan helyezkedett el. A jelenlévő inverzió frontális voltát az adott magasságban bekövetkező szignifikáns szélirány változás és a harmatpont depresszió tropopauzáig tartó alacsony értéke is igazolja. Mintegy 5000 méteres magasságig a nedvességi és hőmérsékleti viszonyok ideális környezetet teremtettek a felületi jegesedés kialakulásához. Ennek megfelelően az Országos Meteorológiai Szolgálat egész napra közepes-erős intenzitású jegesedést prognosztizált a különböző

⁵ forrás: www.met.hu

előrejelzési produktumaiban. A fentiek dacára egy Zwickau–Békéscsaba útvonalon repülő kisrepülőgép erősen jegesítő körülmények közé került és egy kitérő repülőtérre (LHBP) hajtott végre kényszerleszállást.



4. ábra A magassági rádiószondázás adatai 2010. március 11. 12Z-kor⁶

A fentiekben bemutatott időjárási szituációhoz igazítottam a jégakkréciót becslő modell bemeneti paramétereit, a korábbiakban meghatározott értékek segítségével. Az alábbiakban a modell eredményeit ismertetem, figyelembe véve a valós időjárási körülményeket a jégakkréció lehetséges csökkentése érdekében.

Ahogy már az előző fejezetben is jeleztem: a modell alkalmazásánál figyelembe vett egyszerűsítések eredményeként, jelen esettanulmány keretében csak a valós repülési sebesség és a környezeti hőmérséklet megváltozása képezte vizsgálat tárgyát. A fentiek függvényében a közelítő henger profiljára adott becslésből a jégréteg maximális növekedési intenzitása került kiemelésre, mint a potenciális maximális jegesedés jellemzője. Ebből az értékből számítottam ki, hogy a modell adta lehetőségeken, azaz viszonylag rövid időn belül, milyen maximális vastagságú jégréteg képződhet 10 km-es repülési útvonalon (5. ábra). Ez utóbbira azért volt szükség, hogy arra is rámutassunk, hogy a sebesség növekedésével nem azonos arányban változik a jegesedést okozó cseppek elfogási hatékonyságának növekedése és az adott távolságon akumulálódó jégréteg vastagsága. A fentiek természetesen befolyásolja a jegesedés növekedésének típusa is, ráadásul mindezek megváltozására a hőmérséklet is hatást gyakorol. Ennek megvilágításához példaként érdemes összehasonlítani az 5. ábra két táblájának értékeit adott hőmérsékleti oszlopok mentén. Egyébként az 5. ábrán és a továbbiak során alkalmazott színek csak a jobb áttekinthetőséget segítik, konkrét jelentéssel

⁶ forrás: <http://weather.uwyo.edu/>

nem bírnak. A táblázatok bal alsó felében található magas értékek a nagy intenzitású szarvyszerű jegesedés miatt jelennek meg, de ezek már a jegesedés kialakulásának fizikai határán helyezkednek el, így fenntartásokkal kezelendők.

	-1°C	-2°C	-3°C	-4°C	-5°C	-6°C	-7°C	-8°C	-9°C	-10°C		-1°C	-2°C	-3°C	-4°C	-5°C	-6°C	-7°C	-8°C	-9°C	-10°C
30 m/s	0,34	0,33	0,31	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	0,27	30 m/s	1,87	1,82	1,70	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51	1,51
32 m/s	0,37	0,36	0,34	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	0,30	32 m/s	1,92	1,87	1,79	1,56	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54	1,54
34 m/s	0,40	0,39	0,37	0,34	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	0,32	34 m/s	1,96	1,90	1,82	1,68	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56	1,56
36 m/s	0,43	0,42	0,40	0,38	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	0,34	36 m/s	1,97	1,92	1,85	1,75	1,58	1,58	1,58	1,58	1,58	1,59
38 m/s	0,46	0,44	0,43	0,41	0,36	0,37	0,37	0,37	0,37	0,37	38 m/s	2,03	1,94	1,88	1,79	1,60	1,60	1,61	1,61	1,61	1,61
40 m/s	0,49	0,48	0,46	0,44	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	0,39	40 m/s	2,06	1,99	1,90	1,82	1,61	1,62	1,63	1,63	1,63	1,63
42 m/s	0,52	0,51	0,49	0,46	0,43	0,41	0,41	0,41	0,41	0,41	42 m/s	2,08	2,03	1,94	1,84	1,69	1,64	1,64	1,64	1,64	1,64
44 m/s	0,56	0,54	0,52	0,51	0,47	0,44	0,44	0,44	0,44	0,44	44 m/s	2,14	2,06	1,98	1,92	1,78	1,66	1,66	1,66	1,66	1,66
46 m/s	0,60	0,57	0,55	0,54	0,51	0,46	0,46	0,46	0,46	0,46	46 m/s	2,18	2,08	2,01	1,94	1,84	1,67	1,67	1,68	1,68	1,68
48 m/s	0,64	0,60	0,59	0,56	0,54	0,49	0,49	0,49	0,49	0,49	48 m/s	2,23	2,09	2,03	1,96	1,87	1,68	1,69	1,69	1,69	1,69
50 m/s	0,70	0,63	0,62	0,59	0,57	0,51	0,51	0,51	0,51	0,51	50 m/s	2,32	2,10	2,05	1,98	1,89	1,69	1,70	1,70	1,70	1,70
52 m/s	0,75	0,67	0,64	0,62	0,60	0,55	0,53	0,54	0,54	0,54	52 m/s	2,40	2,13	2,07	1,99	1,91	1,76	1,71	1,71	1,72	1,72
54 m/s	0,84	0,70	0,67	0,65	0,63	0,60	0,56	0,56	0,56	0,56	54 m/s	2,58	2,17	2,08	2,01	1,94	1,84	1,73	1,73	1,73	1,73
56 m/s	0,91	0,74	0,70	0,69	0,67	0,64	0,58	0,58	0,58	0,58	56 m/s	2,71	2,19	2,08	2,04	2,00	1,91	1,73	1,74	1,74	1,74
58 m/s	1,06	0,77	0,74	0,72	0,70	0,67	0,61	0,61	0,61	0,61	58 m/s	3,04	2,21	2,12	2,06	2,01	1,93	1,74	1,75	1,75	1,75
60 m/s	1,20	0,80	0,77	0,75	0,73	0,70	0,63	0,63	0,63	0,63	60 m/s	3,34	2,21	2,15	2,09	2,03	1,95	1,75	1,76	1,76	1,76
62 m/s	1,36	0,83	0,81	0,78	0,76	0,73	0,68	0,66	0,66	0,66	62 m/s	3,65	2,24	2,17	2,11	2,04	1,96	1,82	1,76	1,76	1,76
64 m/s	1,59	0,88	0,84	0,82	0,79	0,76	0,72	0,68	0,68	0,68	64 m/s	4,13	2,28	2,19	2,12	2,05	1,97	1,89	1,77	1,77	1,77
66 m/s	1,93	0,92	0,87	0,85	0,82	0,80	0,77	0,70	0,70	0,70	66 m/s	4,87	2,31	2,20	2,14	2,06	2,01	1,95	1,78	1,78	1,78
68 m/s	2,56	0,95	0,90	0,88	0,85	0,84	0,80	0,73	0,73	0,73	68 m/s	6,27	2,33	2,21	2,15	2,08	2,05	1,97	1,78	1,79	1,79
70 m/s	2,84	0,99	0,93	0,90	0,88	0,87	0,83	0,76	0,75	0,75	70 m/s	6,77	2,37	2,21	2,15	2,10	2,07	1,98	1,81	1,79	1,79
72 m/s	3,18	1,05	0,96	0,93	0,92	0,90	0,86	0,81	0,78	0,78	72 m/s	7,37	2,43	2,23	2,16	2,12	2,08	2,00	1,87	1,80	1,80
74 m/s	3,86	1,10	1,00	0,97	0,95	0,93	0,89	0,85	0,80	0,80	74 m/s	8,70	2,48	2,26	2,18	2,14	2,09	2,01	1,93	1,80	1,80
76 m/s	4,37	1,14	1,04	1,00	0,98	0,96	0,92	0,91	0,82	0,83	76 m/s	9,59	2,50	2,29	2,20	2,15	2,10	2,02	1,98	1,81	1,81
78 m/s	4,88	1,22	1,08	1,04	1,01	0,98	0,97	0,93	0,85	0,85	78 m/s	10,42	2,60	2,30	2,22	2,17	2,10	2,08	1,99	1,81	1,81
80 m/s	5,52	1,30	1,11	1,07	1,05	1,01	1,00	0,96	0,89	0,87	80 m/s	11,50	2,70	2,31	2,24	2,18	2,11	2,09	2,01	1,85	1,82

5. ábra A maximális jegesedési intenzitás érték (balra, mm/perc) és az ez alapján 10 km-es repülési útvonalra számított maximális jégréteg vastagsága (jobbra, mm) a környezeti hőmérséklet és a repülési sebesség függvényében

A fentieknél lényegesen érdekesebb képet kapunk, ha a 10 km-es repülési útvonalra számított maximális jégréteg vastagság adatokat tekintjük. Az 5. ábrán látható számhalmazok alapján nem feltűnő, hogy sem a sebesség, sem pedig a hőmérséklet függvényében nem egyenletes a változás. Ennek kiemelését hivatott kivitelezni a 6. ábra. Ez azt mutatja meg, hogy egy adott 10 km-es repülési útvonalon a maximális jégréteg vastagsága milyen mértékben csökkenthető a sebesség 10 m/s-os és a hőmérséklet 1 °C-os csökkentésével. A táblázatok első oszlopában és sorában lévő számok már a redukált értékeket tüntetik fel.

	-1°C	-2°C	-3°C	-4°C	-5°C	-6°C	-7°C	-8°C	-9°C	-10°C		-2°C	-3°C	-4°C	-5°C	-6°C	-7°C	-8°C	-9°C	-10°C	-11°C
30 m/s	-9%	-8%	-11%	-17%	-6%	-7%	-7%	-7%	-7%	-7%	30 m/s	-3%	-7%	-11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
32 m/s	-7%	-8%	-8%	-15%	-9%	-6%	-6%	-6%	-6%	-6%	32 m/s	-3%	-4%	-12%	-2%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
34 m/s	-8%	-8%	-8%	-12%	-12%	-6%	-6%	-6%	-6%	-6%	34 m/s	-3%	-4%	-8%	-7%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
36 m/s	-10%	-7%	-8%	-10%	-14%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%	36 m/s	-2%	-4%	-5%	-10%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
38 m/s	-9%	-7%	-8%	-9%	-14%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%	38 m/s	-4%	-3%	-5%	-11%	0%	0%	0%	0%	0%	0%
40 m/s	-11%	-5%	-7%	-8%	-15%	-4%	-5%	-5%	-5%	-5%	40 m/s	-4%	-4%	-4%	-11%	1%	0%	0%	0%	0%	0%
42 m/s	-14%	-5%	-6%	-8%	-12%	-7%	-4%	-4%	-4%	-4%	42 m/s	-3%	-4%	-5%	-8%	-3%	0%	0%	0%	0%	0%
44 m/s	-17%	-5%	-5%	-5%	-8%	-10%	-4%	-4%	-4%	-4%	44 m/s	-4%	-4%	-3%	-7%	-7%	0%	0%	0%	0%	0%
46 m/s	-19%	-5%	-4%	-5%	-8%	-12%	-3%	-4%	-4%	-4%	46 m/s	-5%	-3%	-3%	-5%	-9%	0%	0%	0%	0%	0%
48 m/s	-27%	-5%	-4%	-5%	-7%	-13%	-3%	-3%	-3%	-3%	48 m/s	-6%	-3%	-4%	-5%	-10%	0%	0%	0%	0%	0%
50 m/s	-31%	-5%	-4%	-5%	-7%	-13%	-3%	-3%	-3%	-3%	50 m/s	-10%	-2%	-4%	-4%	-11%	1%	0%	0%	0%	0%
52 m/s	-34%	-5%	-5%	-5%	-6%	-10%	-6%	-3%	-3%	-3%	52 m/s	-11%	-3%	-4%	-4%	-8%	-3%	0%	0%	0%	0%
54 m/s	-38%	-5%	-5%	-5%	-5%	-7%	-9%	-3%	-3%	-3%	54 m/s	-16%	-4%	-3%	-4%	-5%	-6%	0%	0%	0%	0%
56 m/s	-44%	-5%	-5%	-5%	-3%	-5%	-11%	-2%	-2%	-2%	56 m/s	-19%	-5%	-2%	-2%	-4%	-9%	0%	0%	0%	0%
58 m/s	-52%	-5%	-4%	-4%	-3%	-6%	-12%	-2%	-2%	-2%	58 m/s	-27%	-4%	-2%	-3%	-4%	-10%	0%	0%	0%	0%
60 m/s	-51%	-6%	-3%	-3%	-4%	-6%	-12%	-3%	-2%	-2%	60 m/s	-34%	-3%	-3%	-3%	-4%	-10%	0%	0%	0%	0%
62 m/s	-50%	-8%	-3%	-2%	-4%	-5%	-9%	-5%	-2%	-2%	62 m/s	-39%	-3%	-3%	-3%	-4%	-7%	-3%	0%	0%	0%
64 m/s	-52%	-8%	-3%	-2%	-4%	-5%	-6%	-8%	-2%	-2%	64 m/s	-45%	-4%	-3%	-3%	-4%	-4%	-6%	0%	0%	0%
66 m/s	-49%	-7%	-4%	-3%	-4%	-4%	-3%	-10%	-1%	-2%	66 m/s	-53%	-5%	-3%	-4%	-2%	-3%	-9%	0%	0%	0%
68 m/s	-40%	-10%	-4%	-3%	-4%	-2%	-5%	-11%	-1%	-2%	68 m/s	-63%	-5%	-3%	-3%	-1%	-4%	-10%	0%	0%	0%
70 m/s	-41%	-12%	-4%	-4%	-4%	-2%	-5%	-10%	-3%	-1%	70 m/s	-65%	-7%	-3%	-2%	-2%	-4%	-9%	-1%	0%	0%
72 m/s	-36%	-12%	-4%	-4%	-4%	-2%	-5%	-8%	-5%	-1%	72 m/s	-67%	-8%	-3%	-2%	-2%	-4%	-7%	-4%	0%	0%
74 m/s		-16%	-4%	-4%	-2%	-3%	-5%	-5%	-8%	-1%	74 m/s	-72%	-9%	-4%	-2%	-2%	-4%	-4%	-6%	0%	0%
76 m/s		-20%	-5%	-3%	-2%	-3%	-5%	-3%	-10%	-1%	76 m/s	-74%	-9%	-4%	-2%	-3%	-4%	-2%	-9%	0%	0%
78 m/s		-23%	-5%	-2%	-2%	-3%	-2%	-4%	-10%	-1%	78 m/s	-75%	-11%	-4%	-2%	-3%	-1%	-4%	-9%	0%	0%
80 m/s		-27%	-5%	-2%	-2%	-4%	-2%	-5%	-9%	-3%	80 m/s	-77%	-14%	-3%	-3%	-3%	-1%	-4%	-8%	-2%	0%

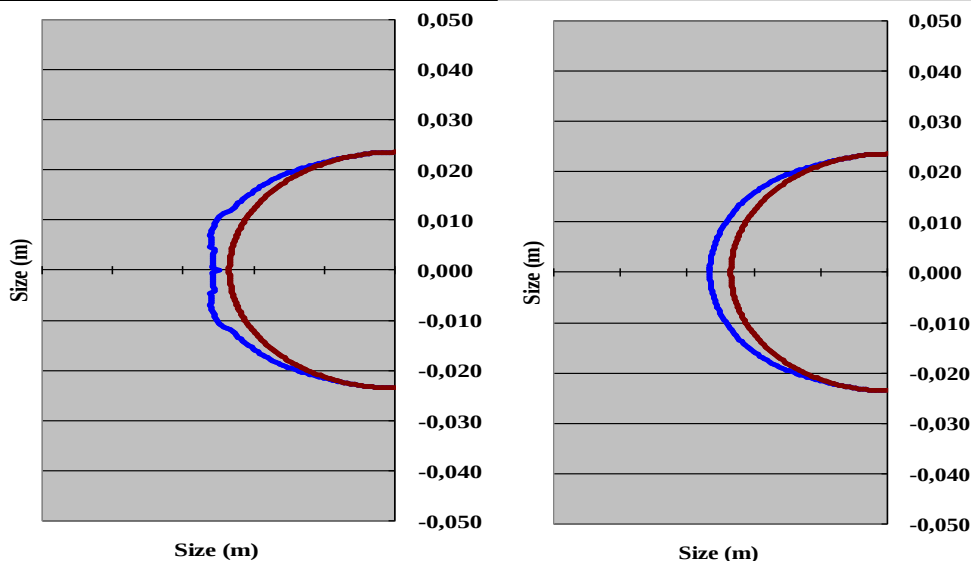
6. ábra A 10 km-es repülési útvonalra számított maximális jégréteg vastagsága ilyen mértékben csökken, ha 10 m/s-mal (balra) illetve 1 °C-kal (jobbra) az adott értékre csökkentjük a sebességet illetve a hőmérsékletet

A 7. ábra a fenti táblázatok eredményeit összegzi. Azaz azt mutatja meg, hogy egy adott 10 km-es repülési útvonalon a maximális jégréteg vastagsága milyen mértékben csökkenthető a sebesség 10 m/s-os és a hőmérséklet 1 °C-os egyidejű csökkentésével. Ezzel az előző táblákhoz hasonlóan kirajzolódik egy a hőmérséklet csökkenésével és a sebesség növekedésével lineárisan megjelenő sáv, amelyben a lokális minimum értékeket találjuk.

	-2°C	-3°C	-4°C	-5°C	-6°C	-7°C	-8°C	-9°C	-10°C	-11°C
30 m/s	-12%	-15%	-21%	-17%	-6%	-7%	-7%	-7%	-7%	-7%
32 m/s	-10%	-12%	-19%	-17%	-9%	-6%	-6%	-6%	-6%	-6%
34 m/s	-11%	-11%	-15%	-19%	-12%	-6%	-6%	-6%	-6%	-6%
36 m/s	-12%	-11%	-13%	-18%	-14%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%
38 m/s	-13%	-10%	-12%	-18%	-14%	-5%	-5%	-5%	-5%	-5%
40 m/s	-14%	-9%	-11%	-18%	-14%	-4%	-4%	-4%	-4%	-4%
42 m/s	-16%	-9%	-11%	-15%	-14%	-7%	-4%	-4%	-4%	-4%
44 m/s	-20%	-9%	-8%	-12%	-14%	-10%	-4%	-4%	-4%	-4%
46 m/s	-23%	-8%	-7%	-10%	-16%	-12%	-3%	-3%	-3%	-3%
48 m/s	-31%	-8%	-7%	-10%	-16%	-13%	-3%	-3%	-3%	-3%
50 m/s	-37%	-7%	-8%	-9%	-17%	-13%	-3%	-3%	-3%	-3%
52 m/s	-42%	-8%	-8%	-9%	-14%	-13%	-6%	-3%	-3%	-3%
54 m/s	-48%	-9%	-8%	-9%	-10%	-13%	-9%	-3%	-3%	-3%
56 m/s	-55%	-10%	-7%	-7%	-7%	-14%	-11%	-2%	-2%	-2%
58 m/s	-65%	-9%	-6%	-6%	-7%	-15%	-11%	-2%	-2%	-2%
60 m/s	-67%	-9%	-5%	-6%	-7%	-15%	-11%	-3%	-2%	-2%
62 m/s	-70%	-11%	-6%	-5%	-7%	-12%	-12%	-5%	-2%	-2%
64 m/s	-74%	-12%	-6%	-6%	-8%	-10%	-12%	-8%	-2%	-2%
66 m/s	-76%	-12%	-7%	-6%	-7%	-7%	-12%	-10%	-1%	-2%
68 m/s	-78%	-15%	-7%	-6%	-5%	-6%	-14%	-10%	-1%	-2%
70 m/s	-79%	-18%	-7%	-6%	-5%	-6%	-14%	-11%	-3%	-1%
72 m/s	-79%	-19%	-7%	-6%	-5%	-6%	-11%	-11%	-5%	-1%
74 m/s		-23%	-8%	-5%	-5%	-6%	-9%	-11%	-8%	-1%
76 m/s		-27%	-8%	-5%	-4%	-7%	-6%	-11%	-10%	-1%
78 m/s		-32%	-8%	-4%	-4%	-5%	-6%	-13%	-10%	-1%
80 m/s		-37%	-8%	-5%	-5%	-5%	-6%	-12%	-10%	-3%

7. ábra A 10 km-es repülési útvonalra számított maximális jégréteg vastagsága ilyen mértékben csökken, ha a sebességet 10 m/s-mal és a hőmérsékletet 1 °C-kal az adott értékekre csökkentjük

Ennek a piros színnel markánsan kiemelt sávnak a megjelenése a nedves és a száraz típusú jégakkréció közötti átmenetre vezethető vissza. A nedves típus esetén ugyanis a túlhevült víz fagyás előtti hátrafolyása miatt megjelenő szarvak dinamikus növekedést okoznak a jegesedés maximális intenzitásában a szárnyprofil mentén. Erre nyújt bizonyítékot a jégréteg kialakult profiljait bemutató 8. ábra is, amelyen a sáv egyik és másik oldaláról származó bemeneti adatok alapján számított jégakkréció látható. A bal oldali ábra a fentiekben jelzett sáv bal oldaláról, a nedves típusú növekedést reprezentálja, míg a jobb oldali ábra hasonló elvek alapján a száraz növekedésről nyújt példát.



8. ábra Példák a nedves és száraz növekedésű jegesedés profiljára 60 m/s-os sebesség mellett, a bal oldalon $-4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os, a jobb oldalon pedig $-10\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os környezeti hőmérséklet mellett

A repülőgép sebességét átlagosan 56 m/s-nak feltételezve, ami a korábban említett repülőesemény során is jellemző volt, a környezeti hőmérséklet megváltozása a $(-1)-(-2)\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os és a $(-6)-(-7)\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékleti tartományokban van a legnagyobb hatással a jegesedés intenzitásának változására. A frontális inverzió alatt, a hőmérséklet a magassággal csökken, ami a -7°C -os izoterma átlépésével a maximális jegesedési intenzitás növekedéséhez vezet. Azaz a repülőgép e szint alá való süllyedését az adott sebesség mellett célszerű késleltetni, amíg ez lehetséges. Az esettanulmány környezeti paramétereire mellett ez a szint körülbelül 1300 m magasan helyezkedett el. Nyilvánvalóan ez fordított irányban is működik, azaz $-7\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nál melegebb jegesítő környezetben repülve célszerű a repülési magasság emelésével csökkenteni a környezeti hőmérsékletet, így csökkentve a jegesedés intenzitását és az aerodinamikailag kedvezőtlen szarvak kialakulásának lehetőségét. Természetesen erre csak abban az esetben van mód, ha a frontális inverzió vagy izotermia e fölött helyezkedik el, hiszen azokban a magasság emelkedésével nem csökken a hőmérséklet, ezért a kívánt hatás sem érhető el.

A frontális inverzió/izotermia tartományában a környezeti hőmérséklet jellemzően a $(-7)-(-8)^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékleti tartományban mozgott, csak az inverzó közvetlen környezetében csökkent -8°C alá (4. ábra). Ahogyan a 6. ábra bal oldali táblázatában is látható, ez a feltételezett 56 m/s-os sebesség mellett a jegesedés intenzitáscsökkenésének lokális maximumára esik. Egy kb. 1500 m-es magasságú, DK-i irányultságú repülés esetén, az adott magasság szélviszonyai miatt a szárnyprofil körüli áramlási sebesség kb. 66 m/s a szembeszél miatt. Ahogyan a frontfelületek mentén általában történik esetünkben is jelentős irányváltozás tapasztalható az inverzió környékén. Az izoterm rétegben a környezeti hőmérséklet közel azonos szinten tartva a repülőgép sebességének csökkentésével vagy a szélirány magassággal való változását kihasználva a repülési szint alkalmas megváltoztatásával, jelentősen csökkenthető a maximális jegesedés intenzitása. A 90° -kal módosult szélirány eléréséhez és ezzel a 10 m/s-os szembeszél eliminálásához mintegy 500–700 m-rel kell a repülési magasságot emelni.

Alacsony sebességek mellett azonban a jegesedő repülőgép sebességének további csökkentése fokozott elővigyázatosságot igényel, nehogy a jegesedés miatt megemelkedett átesési sebességet elérjék.

ÖSSZEFOGLALÁS

Cikkemben röviden, áttekintő jelleggel bemutatam a merevszárnyú repülőgépek felületi jegesedésének elméleti alapjait és a jegesedés elleni védelem lehetőségeit. Hangsúlyozva, hogy a modern jég-telenítő rendszerekkel nem rendelkező repülőgépek jegesítő körülmények közé kerülése jelentheti a legsúlyosabb problémát. Annak hiányában ugyanis rendkívül beszűkül a pilóták eszközszerkezere a jégakkréció mérséklésében. A jég akkumulációját becselő modell eredményeire alapozva pedig rámutattam egy esettanulmányon keresztül, hogy a meteorológiai körülmények ismeretében milyen alternatív lehetőségek állnak rendelkezésre a fenti probléma kezelésében. Mind a valós repülési sebesség, mind pedig a környezeti hőmérséklet megfelelő megváltoztatása a repülési irány, sebesség vagy magasság módosításával alkalmas a jégakkréció intenzitásának mérséklésére. Ugyanakkor ez a módosítás nem egyenlő hatással bír a teljes hőmérsékleti és sebességi spektrumban. Ráadásul ezen lépések alkalmazása feltételezi a meteorológia előrejelzéseken keresztül a környezeti paraméterek kellő ismeretét, ami újra rámutat a repülésmeteorológia alkalmazásának fontosságára.

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] BOTTYÁN, Z.: A szárnyprofil-geometria és az ütközési hatékonyság kapcsolata a repülőgépek felületi jegesedésének folyamata során. Repüléstudományi Közlemények, Vol. 24., No. 1., 43-50.
- [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] ICAO, 2007: Meteorological Service for International Air Navigation, Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation
- [6] SÁNDOR Valéria - WANTUCH Ferenc: Repülésmeteorológia, Folium Nyomda, 2005. ISBN 963 7702 91 1
- [7] POLITOVICH, M.K.: Aircraft icing, in Encyclopedia of Atmospheric Sciences, pp. 68-75., Elsevier Science Ltd, 2002. ISBN: 978-0-12-227090-1
- [8] Cessna Model 152 Information Manual, Cessna Aircraft Company, 1980., <http://pilotaakademia.hu/wp-content/uploads/2014/01/C152-%C3%9Czemeltet%C3%A9si-K%C3%A9zik%C3%B6nyv.pdf>
- [9] ÓVÁRI, G.: Biztonságtechnika a repülésben, a repülőeszközök jégtelenítő rendszerei, Repüléstudományi Közlemények, Vol. 20., No. 2., 2008., http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2008_cikkek/Ovari_Gyula_poszter.pdf
- [10] 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.
- [11] BOTTYÁN, Z., HADOBÁCS, K.: A repülőgépek felületi jegesedésének termodinamikai folyamatairól: a repülési sebesség hatása, Repüléstudományi Közlemények, Vol. 23., No. 2., 2011., http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2011_cikkek/Bottyan_Zsolt_Hadobacs_Katalin.pdf
- [12] BOTTYÁN, Z., TUBA Z.: Felületi jegesedést okozó időjárási helyzetek statisztikai vizsgálata és a jégakkrécio becslése pilóta nélküli repülőeszközök (UAV-k) esetében, Repüléstudományi Közlemények, Vol. 24., No. 2., 642-653., 2012., http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2012_cikkek/53_Bottyan_Zsolt-Tuba_Zoltan.pdf
- [13] GERESDI, I.: Felhőfizika. Dialóg Campus Kiadó. Budapest-Pécs. 2004.
- [14] KOROLEV, A. V., ISAAC, G. A., STRAPP, J. W., COBER, S. G., BARKER H. W.: In situ measurements of liquid water content profiles in midlatitude stratiform clouds, Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 133 (628) 1693–1699, 2007.
- [15] WANTUCH, F., SIMON, S., KOCZOR E.: Légijármű jegesedése egy esettanulmány kapcsán, Repüléstudományi Közlemények, Vol. 23., No. 2., 2011., http://www.szrfk.hu/rtk/kulonszamok/2011_cikkek/Koczor_E_Simon-S_Wantuch-F.pdf