

## **LÉGI JÁRMŰ JEGESEDÉSE EGY ESETTANULMÁNY KAPCSÁN**

### **1. BEVEZETÉS**

A repülést veszélyeztető meteorológiai eseményekhez, elemekhez soroljuk az alacsony felhőalapon és a rossz látási viszonyok mellett a nagyobb kockázati tényezőt jelentő turbulencia, zivatar, szélnyírás és jegesedés jelenségkörét. A felsorolt veszélyfaktorok mindegyike befolyásolja a polgári és katonai repülést. Vizsgálatom tárgya, a jegesedés rizikója legnagyobb mértékben a kisgépeket, a vitorlázó repülőket és az egymotoros gépeket érinti. Nagyobb repülőgépeknél jegesedés-gátló rendszerek üzemelnek repülés közben, amelyek segítségével ma már ez a kockázati tényező kiiktatható, illetve a nagyteljesítményű hajtóművek szolgáltatnak elég tolóerő-tartalékot, hogy a súlynagyobbodást elbírják. A kisebb gépek ilyen berendezések nélkül szállnak fel, és a lerakódó jég jelentősen felhalmozódó súlytöbbletet eredményez.

Egy majdnem katasztrófához vezető kisgépes repülés esetén keresztül mutatom be a (kizárólag) meteorológiai jegesedés folyamatát, körülményeit, a kialakulásának kockázatát, hatását és létrejöttének veszélyességét, előre jelezhetőségét. A karburátor illetve hajtóművek lefagyása, melyet az üzemanyag párolgása, a sűrítés, adiabatikus tágulás okoz akár nyári napon történő repüléskor, felhőzet jelenléte nélkül, meteorológiailag nem vizsgálendő.

### **2. A JEGESEDÉS FOLYAMATA ÁLTALÁNOSAN**

A fizikai folyamatok bemutatásának háttérét döntően Wantuch Ferenc és Sándor Valéria Repülésmeteorológia című tankönyve nyújtja.

#### **2.1. A légköri túlhűlt víz veszélye a repülésre**

Mivel a víz az egyetlen légköri alkotórész, amely egyszerre van jelen folyékony, szilárd és gázhalmazállapotban, ezért fontos figyelembe venni a repülőgép-jegesedés jelenségénél azt a tulajdonságát, hogy  $0^{\circ}\text{C}$  alatt is előfordul folyékony halmazállapotban, a légkörben. Akár  $-40^{\circ}\text{C}$ -ig, vagy még alacsonyabb hőmérsékletre is túlhűlhetnek a vízcseppek, anélkül, hogy megfagynának, így a troposféra jelentős méretű tartományán jegesedéssel kell számolni. A legvalószínűbb azonban, ha a gép felhőn halad át, hogy a  $+3 - (-20)^{\circ}\text{C}$ -os hőmérsékleti intervallumban kezdődik meg a jégképződés, ahol a leggyakoribb a túlhűlt vízcseppek jelenléte. Egy csepp annál alacsonyabb hőmérsékletre hűlhet, minél kisebb a mérete, mivel így kevesebb az esélye a szennyeződésnek, azaz az

aeroszol részecskékkel való találkozásnak, mely megindítja a kristályosodás, a fagyás folyamatát. Mérések és tapasztalatok szerint a 8-20 mikrométer átmérőjű cseppek jegesítik a legjelentősebb mértékben a gépeket. Az ilyen tartományban lévő cseppeket tartalmazó légrészbe jutó repülőgép felszínén azonban az ütközés alkalmával kifagynak ezek a részecskék. Azonban a fagyás folyamatának kezdetekor, egy csepp egészen kicsi hányadánál is annyi látens hő szabadul fel, hogy az elegendő lenne az egész vízcsepp hőmérsékletének 0°C-ra való melegedéséhez. Így a fagyás csak akkor folytatódhat és mehet végbe, ha ez a felszabaduló rejtett hő valamilyen folyamat által elvezetődik. -20°C alatt ez könnyen és gyorsan végbe megy konvektív kicserélődéssel, párolgással vagy vezetéssel. Nem sokkal 0 °C alatt viszont ez lassan történik meg, a hő lassú ütemben vezetődik el, ami miatt a cseppek szétterülhetnek a gép felületén. Ezen hőmérsékleti intervallumokat és a látens hő folyamatból való kivonását leíró függvények figyelembe vételével külön eseteket adhatunk a jégképződés alakjára és fajtájára egyaránt.

## 2.2. A jegesedés fajtái

A fent leírtak alapján három fő fajtát állapítottak meg a megfigyelők.

Első esetben **dérszerű, kristályos lerakódásról, hoar frost**-ról beszélhetünk, amely a leggyakoribb jegesedés fajta. Ekkor a vízgőz közvetlenül fagy ki a levegőből, nagyon kicsi cseppátmérő esetén indul meg ez a folyamat. Felhőzet nélküli repüléseknél is jelentkező esemény. Vékony rétegekben rakódnak egymásra a kisméretű, fehér jégkristályok. A dérszerű lerakódás veszélyessége nem olyan nagymértékű, azonban később ezen a dérszerű bevonaton igen erős jegesedés kezdődhet el. (Ha például az ilyen jéglerakódás után egy felhőn keresztül halad a gép.) Negatív hőmérsékleten, derült éjjeleken akár a nyílt terepen álló repülőgépekre is kicsapódhat. „Ez a vékony, érdes jégfelület akár egyharmadával is csökkentheti a felhajtóerőt felszállás közben. Emiatt is fontos a repülőgépek felszállás előtti hó- és jégmentesítése. Ennek fontosságára katasztrófák sora hívta fel a figyelmet.”(Jég a szárnyon cikk, repulnijo.hu).

A második a **zúzmarás jég, azaz a rime ice** esete. Döntően -10°C alatt, erősen túlhűlt felhőben alakul ki. A kifagyás a túlhűlt vízcseppek a repülővel való ütközésével indul meg. Különálló jégkristályokká válnak egyenként a cseppek. Nagyon gyorsan vezetődik el a látens hő, ezért már megfagyott az egyik csepp, mire a következő rátapadna a felszínre.

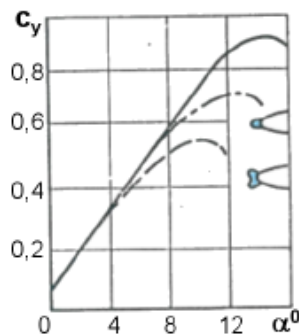
Kristályos szerkezet figyelhető meg, ezáltal szabálytalanul, durván és kis sűrűségben rakódik le a zúzmarás jég. Az aerodinamikai tulajdonságokra jelentős mértékben van hatással (csökkenő felhajtó erő, repülés közbeni többlet súly kialakulása). Jellemzően a szárnyak és a vezérsíkok belépő élénél képződik. [1]

-10 és -15 között általában ék alakú jég képződik, mert a túlhűlt vízcseppek az ütközéskor azonnal megfagynak, és a légáramlat ilyen formára alakítja őket.

A harmadik csoportban az **átlátszó, tiszta jég, a clear ice** tárgyalható. A legveszélyesebb jegesedési fajta, hiszen jégpáncélszerű bevonat keletkezik a felszínen. 0 °C és -5°C-os hőmérsékleti

intervallumban lévő, gyengén túlhűlt felhőben, vagy túlhűlt esőben jön létre. Talajon ónos esőben alakul ki. A kevéssé alacsony hőmérséklet miatt az ütközéskor nem a teljes csepp fagy ki, s amely folyékony csepprészt megmarad, a légáramlással a gép hátsó felére folyik, és ott kristályosodik ki. A veszélye abban is rejlik, hogy ez esetben ott is találunk jéglerakódást, ahol nem képződne jég egyáltalán. Amorf, üvegszerű, sima bevonatot alkot a felületen, amelyet nagy sebességek esetén érdessé, hullámossá tehet a légáramlás, s ez szintén az aerodinamikai tulajdonságokat rontja le. Sokkal nagyobb felületen terül el, nagyobb mértékben tapad és nehezebb eltakarítani a gép különböző részeiről, mint a zúzmarás jeget.

A repülőgép szerkezeti egységein ezen a hőmérsékleti intervallumon általában szarv alakú jegesedés figyelhető meg. Ezt a formát közepes és kis sebességeken lehet tapasztalni, azáltal, hogy a vízcseppek nem fagnak meg az ütközést követően azonnal, hanem a belépő éleken szétfolyva, fokozatosan fejlődő, gátszerű alakzatot öltenek. [2]



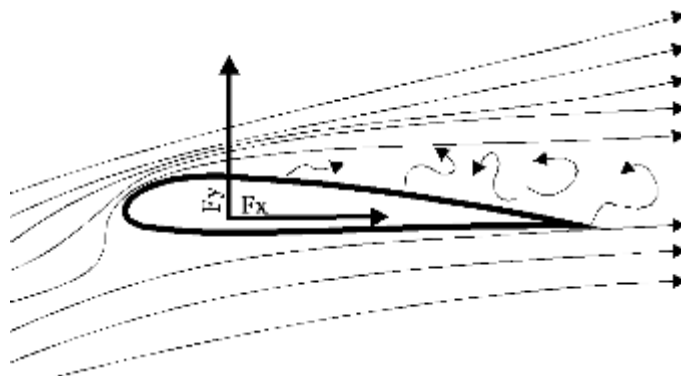
1. ábra. A felhajtóerő komponens alakulása különböző állásszögek és jegesedési formák esetében (Óvári Gyula: Biztonságtechnika a repülésben: a repülőeszközök jégtelenítő rendszerei, 2008.)

Az ábrán a felhajtóerő komponens romlása látszik a szárny állásszögének függvényében, amennyiben a jegesedés szarv (alsó görbe) illetve ék (középső görbe) alakú.

A felhajtóerő:

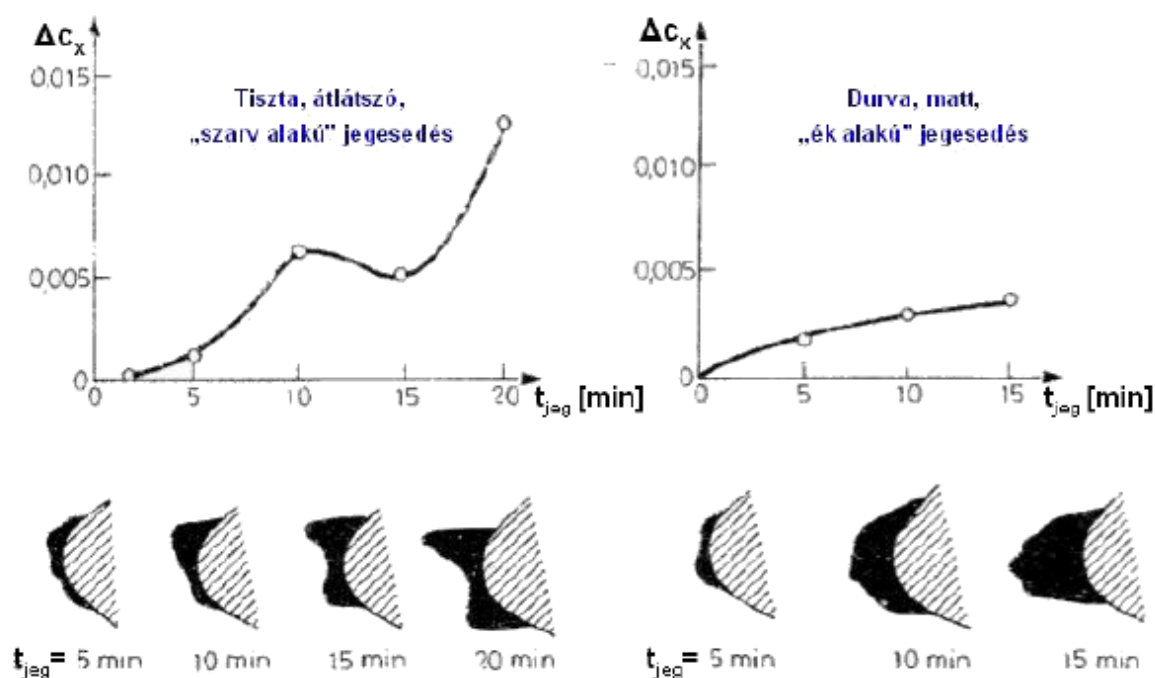
$$F_y = \rho \cdot v^2 \cdot A \cdot c_y, \text{ ahol} \quad (1)$$

- $\rho$  a levegő sűrűsége
- $v$  az áramlási sebesség
- $A$  a szárny felülete
- $c_y$  a felhajtóerő komponens, amely az állásszög függvényében változik. Egy Cessna esetében a kritikus állásszög 16-17° körül van. Ez az az érték, amely fölött átesik a gép, mert az addig lamináris áramlás a szárnyprofil fölött turbulensre vált.



2. ábra. Áramlási kép kritikus állásszögnél (freeweb.hu)

Azonban a jegesedés formája nemcsak a felhajtóerő komponens ( $c_y$ ) csökkenését határozza meg, hanem a homlokellenállás-komponens ( $c_x$ ) növekedését is.



3. ábra. A homlokellenállás-komponens időbeli alakulása a forma függvényében (Óvári Gyula: Biztonságtechnika a repülésben: a repülőeszközök jégtelenítő rendszerei, 2008.)

Látható, hogy a szarv alakú jegesedéskor nem folytonos a homlokellenállás-komponens romlása, míg az ék alaknál ez egyenletesebb.

Homlokellenállás:

$$Q = C_x \rho v^2 / 2 A, \text{ ahol} \quad (2)$$

–  $C_x$  az ellenállási komponens.

-7 °C és -12 °C között mindkét forma előfordulhat, illetve átmeneti formációk is.

A különböző jegesedés fajták mellett **keverék fajták** is megjelenhetnek, azaz a **mixed ice**. Egyszerre rakódik le, de különböző szinteken a zúzmarás és tiszta jég. Veszélyesebb, mint a fő fajtái a

jegesedésnek, az erősség, a vastagság és a túlsúly miatt. A vegyes halmazállapotú felhők a legveszélyesebbek. Olyan felhőben, amelyben átlátszó, tiszta jegesedés indul meg (túlhűlt esőben), jégkristályok és hópelyhek is befolyásolják a jegesítő folyamatot, nagyon durva bevonatú felületet kapunk, amely rendkívül veszélyes.

Több magassági szintet átrepülő gép, több jéglerakódás kockázatát hordozza. Nagy magasságból pozitív hőmérsékletű felhőbe vagy csapadékszónába való érkezéskor az erősen lehűlt gépfelület szintén nagy mennyiségű jég ülhet ki főként az üzemanyag-tartályokon, különösen, ha sok bennük az üzemanyag. Ez a jegesedés azonban nem jelentős, mert a lehűlt gép felülete viszonylag gyorsan kiegyenlítődik a környezetével, fölmelegszik.

| A jegesedés típusa       | A külső levegő hőmérséklete |
|--------------------------|-----------------------------|
| Tiszta jég               | 0°C – -5°C                  |
| Tiszta vagy kevert jég   | -5°C – -10°C                |
| Kevert vagy zúzmarás jég | -10°C – -15°C               |
| Zúzmarás jég             | -15°C – -20°C               |

1. táblázat. A jegesedés és a kritikus külső hőmérséklet (Wantuch-Sándor: Repülésmeteorológia)

### 3.3. Repülőgépen történő jégképződést befolyásoló tényezők

Meteorológiai és aerodinamikai tényezők egyaránt befolyásolják a repülőgépen kialakuló jegesedést.

#### *A jegesedés keletkezésének meteorológiai szükséges kondíciói*

A jégképződéskor egyik legfontosabb szerepe a **hőmérsékleteknek** van. Idetartozik a környező légréteg és a repülőgép felületének hőmérséklete, amely két paraméter négy variációját állapíthatjuk meg, s említhetjük különálló feltétel-kategóriaként.

Első esetben a repülőgép és a levegő hőmérséklete is pozitív. Csak akkor léphet föl ilyenkor a jegesedés, ha a levegő és a gép hőmérséklete is maximum +1-2°C-os, és ha nem felhőben, hanem telítetlen légrétegen halad át a gép, ahol az alacsony parciális vízgőznyomás érték miatt még végbemehet a párolgás. Ilyen tartományban, ha esik az eső, a bekövetkező párolgás által távozó hő miatt 1-2°C-kal lehűl a gép felületi hőmérséklete, és a víz megfagy. Ám a folyamat eredményeként nincs jelentős jégvékony-vastagság.

A második esetben a repülőgép hőmérséklete negatív, míg a környező levegő hőmérséklete pozitív. Ez a jegesedési forma akkor lép föl, ha nagyobb magasságokat járt meg a gép, majd hirtelen süllyedéssel pozitív hőmérsékletű légrétegbe érkezett, ám a felületi hőmérséklete alacsony maradt. (Inverzió esetén, az alacsonyabb, hidegebb rétegből magasabb, melegebb rétegbe való emelkedéskor ugyanez lejátszódhat.) Ha a süllyedés - illetve emelkedés- sebességét csökkentik, a keletkező jégbevonat leolvadhat, mert a gép gyorsan átveszi környezete hőmérsékletét. (Ha a felhő, amin áthalad a gép, és a gép hőmérséklete között jelentős a különbség, szintén veszélyes mértékű jegesedéssel kell számolni.)

Az első két eset alapján megállapítható, hogy a jegesedés hőmérsékleti felső határa  $+2^{\circ}\text{C}$ ,  $+3^{\circ}\text{C}$  körüli érték.

A harmadik és negyedik esetben a levegő hőmérséklete negatív, a gép hőmérséklete pedig (3. esetben) pozitív, majd (4. esetben) negatív. A levegő vízcseppjei mindkét állapotban túlhűltek, a gép felületi hőmérsékletének előjele pedig nem rejt jelentős különbségeket, hiszen hamar bekövetkezik a pozitívról negatív hőmérsékletre való sülyedés, a környezettel való termikus kiegyenlítődé.

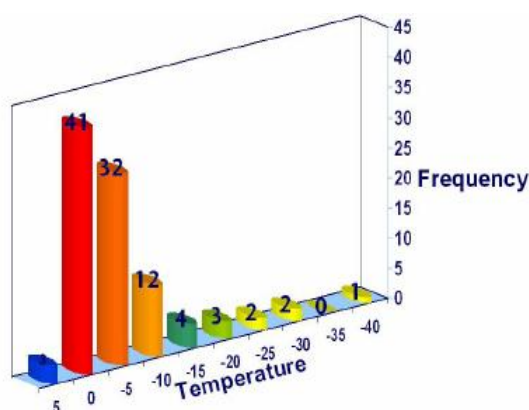


Figure- 25. Percentage frequency of airframe icing (800 reports)

4. ábra. A repülőgéptest jegesedésének százalékos gyakorisága a hőmérséklet függvényében, 800 eset alapján (Wantuch jelentés): Angol és amerikai tapasztalatok azt mutatják, hogy a jegesedések 2-3%-a  $0^{\circ}\text{C}$  felett következik be, míg az esetek 72-76%-ában a  $0^{\circ}\text{C}$  és  $-10^{\circ}\text{C}$  közötti hőmérsékleti intervallumon jelentkezett a jéglerakódás.

A repülőgép-testre kifagyó jég mennyisége az érintkező légáramlásban szereplő **cseppek nagyság szerinti eloszlásától és méretétől** is függ. A levegő vízgőztartalma különböző kémiai összetételű aeroszolokon kezdi meg a kondenzációt, amely következtében a kialakuló cseppek mérete is változó lesz. A nagyobb méretű cseppek nagyobb valószínűséggel okoznak jegesedést, nagyobb tehetetlenségük révén nehezen kerül ki az útjukba kerülő akadályt, a repülőgépet. A felhőkben a nagyság szerinti eloszlása a cseppeknek olyan, hogy a kis görbületi sugarú élek gyűjtik össze a túlhűlt cseppek túlnyomó részét. 1 mm-es átmérőjű cseppeket tartalmazó túlhűlt esőben nagy valószínűséggel a gép felülete az összes útjába kerülő csapadékelemet magára vonja.[1]

A felhőben lévő **túlhűlt víz mennyisége** is meghatározza a jegesedés erősségét, fajtáját. Általánosnak vélt tapasztalat, amely hibás feltételezésen alapul, hogyha a felszínen csapadékot észlelnek, a magasban nem várható jegesedés. Úgy gondolták sokáig, hogy bármely csapadékképző folyamat „kisikálja” a túlhűlt felhőelemeket az egyesülésen és a jégkristályok egymásra rakódó növekedésén keresztül. Ám korábbi tanulmányok és tapasztalatok szerint sok esetben a felszínen detektált csapadék jó indikátora a nagyobb magasságokban kialakult jegesedési állapotoknak. Szoros korrelációt mutattak ki a magasban létrejött közepes vagy erős intenzitású tiszta vagy keverék-jegesedés és az észlelt ónos szitálás, ónos eső és jégdara között. Több kísérletet végeztek, hogy

meghatározható legyen a kapcsolat e jelenségek között és megoldódjon a rejtély a csapadék és a repülőgép-jegesedés hátterében álló fizikai folyamatok viszonyáról.

A túlhűlt nagy cseppek mennyiségének és lokalizálásának előrejelzéséhez az első lépés megvizsgálni az általánosan érvényes és elérhető adathalmazokat (megfigyelői valamint távolról érzékeltek), hogy kedvezőek-e a feltételek a képződéshez. A GOES 3,9 mikronos infravörös műholdképeken megkülönböztethetők egymástól a többnyire jégkristályokból, illetve a túlhűlt vízcseppekből álló felhők. Ezen a hullámhosszon a vízcseppekről nagyobb a visszaverődés, mint a jégreszecskekről, ezért az alacsonyabb szintű felhők (stratus, stratocumulus), melyeket többnyire vízcseppek alkotnak, világosabbak, míg a felsőbb rétegekben lévő, jégreszecskekből álló cirrusok sötétten jelennek meg a képeken. Az alacsony szintű, víztartalmú felhők veszélyesebbek a jegesedésre. A sötétebb cirrus nem tipikusan jegesedési zóna a jégreszecskek miatt, ugyanakkor a felső szintű cirrusok elhomályosíthatják, elrejtethetik az alacsonyabb szintű, túlhűlt felhőket, ezért ezek a területek sem zárhatók ki automatikusan a jegesedésnek kedvező feltételű zónák köréből.

A felhő tetején kialakult és a felhőn belüli szélnyírás is elő tud állítani kedvező körülményeket a túlhűlt vízcsepp-képződéshez, az ütközés-egyesülés folyamatok gyorsítása, fokozása miatt.

A felhőben lévő jégkristály-mennyiség szorosan összefügg a túlhűlt víz mennyiségével. Ha a jégkristályok fejlődése megkezdődött, a túlhűlt víztartalom egyre csökkenni fog. A csak jégkristályokból álló felhőben a jegesedés veszélye nagyon ritkán áll fenn, és akkor sem okoz súlyos károkat. A legnagyobb kockázatot a vegyes halmazállapotú felhők okozzák, amelyekben a túlhűlt vízcseppek és a jégkristályok száma arányban van, valamint jelentős mértékű. Ekkor ugyanis a gép burkolatához ragadó jégkristályokat a környező túlhűlt víz szorosan a felülethez tapasztja. Elengedhetetlen a kötési erő nagyságához, hogy sok, nagyméretű csepp legyen a gép környezetében, hogy benedvesítse a felületet, illetve szükséges feltétel a fagyási folyamat lassú ütemű lejátsszódása. Ez nagyon vastag jégképződést eredményez. Ha a túlhűlt vízmennyiség elenyészőbb, s alacsonyabb hőmérsékleteken lévő nagyon apró méretű cseppekből áll, a burkolattal való ütközéskor szinte azonnal megfagynak, és a továbbiakban érkező jégkristályok már egy viszonylag száraz felülettel találják magukat szembe, s lepattannak, így nem jelentenek gondot.

Hogy milyen iramban csapódik ki a levegőrészből a vízgőz, nagymértékben függ a feláramlás sebességétől. Konvektív felhőzetben, ahol a feláramlás sebessége nagy, akár  $-15^{\circ}\text{C}$  alatt is előfordulhat túlhűlt víz, aktív frontális felhőzetben a  $-15^{\circ}\text{C}$  a hőmérsékleti határa a jelentős mennyiségű túlhűlt víz jelenlétének, amely mellett a jégképződés is szerepel. [4]

### *A felszíni jég képződését elősegítő aerodinamikai tényezők*

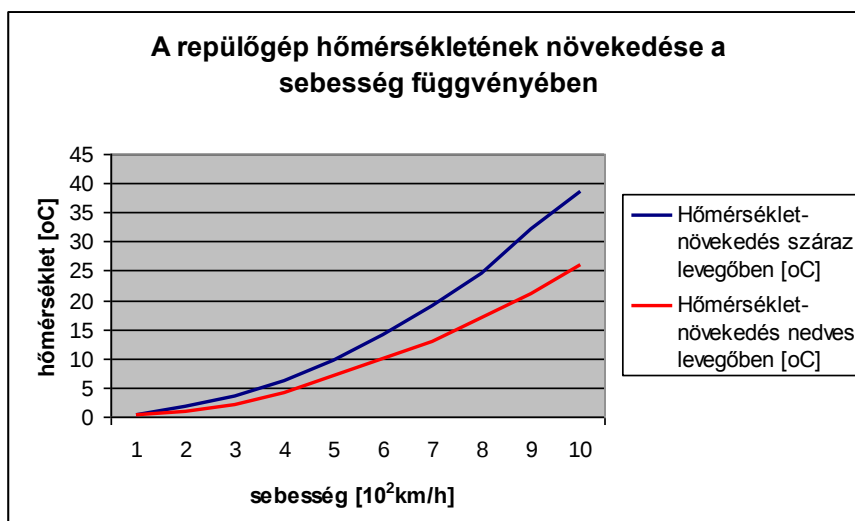
**A repülőgép alakja, anyaga, bizonyos területeinek görbülete, simasága.**

A repülőgép ívesebb, jobban görbülő részein könnyebben megy végbe a jegesedés, mert görbült felületek felett nagyobb a telítési göznyomás értéke, mint sík felületek felett, s hamar megindulhat a fagyás, adott hőmérsékleti körülmények között.

A jegesedést gátló rendszerek használatával kiküszöbölhető a külső váz jegesedésének magas kockázata, ám a sugárhajtású gépek hajtóműire vonatkozó jéglerakódás nagyon fontos problémává vált. Az ilyen gépek esetében már jóval előbb bekövetkezik a jegesedés a kompresszor beömlő nyílásain, mint a szárnyon, vagy a törzsön, mivel a szívócsatorna hőmérséklete  $0^{\circ}\text{C}$  alá hűl a kicsapódó víz párolgása alatt történő hőelvonás, illetve a sűrítés, adiabatikus tágulás miatt, de ezeket egy repülésmeteorológiai állomáson sem veszik bele a jegesedés előre jelezhetőségébe.

### A repülőgép felületének hőmérséklete, áramlásának sebessége.

Minél gyorsabb a gép, annál több cseppecskével találkozik, melyek körülfolynak és az áramvonalak mentén mozognak a gép különböző területein, mint például a szárnyon. A sebesség függvénye ugyanis a körüláramló levegő mennyisége és a különböző méretű cseppek tehetetlenségi ereje. Ahogy nő a sebesség, arányosan nő az érintkező légtömeg, s az abban felgyűlt túlhűlt vízcseppek, jégkristályok száma. Ahogy a gép áthatítja a légrészt, két részre választódik a levegő, s ezáltal a felhőelemek egy csoportja is a gép fölé, másik csoportja a gép alá szorul. A cseppek tehetetlenségüknél fogva nehezen követik az áramvonalat, a nagyobb cseppek az egyenes vonalú mozgásukat őrzik, s az áramvonalak görbületeit nem tudják követni, ezért beleütköznek a szárnyak belépő éleibe. Ahogy növeli a pilóta a sebességet, úgy a kisebb mérettartományba eső cseppeknek is kevesebb az ideje és ereje, hogy kikerüljék a gépet. Azonban ez a sebességnövekedés egyszerre elér egy kritikus pontot, ahol a jegesedést nem segíti, hanem nehezíti. Ennek az a magyarázata, hogy a sokszoros ütközések, a sűrűlódás és a levegő kompressziója során a repülőgép felületi hőmérséklete növekedni kezd.



5. ábra. A repülőgép-test hőmérséklet-növekedése a sebesség függvényében

Ahol a relatív sebesség a gép és a levegő között a legnagyobb (belépő éleken lévő kritikus pontokon, légcsavarok végén), ott nagyobb a felületi melegedés, mert ezeken a területeken a levegőrészecskék kinetikus energiája hővé alakul. (Ezért a légcsavarfejnél keletkezik a jég.) A jegesedés tehát tapasztalat szerint a  $600\text{ km/h}$ -nál alacsonyabb sebességű gépeken a leggyakoribb, kiváltképpen a  $400\text{--}500\text{ km/h}$

sebességükénél. 600 km/h IAS (Indicated Air Speed) felett a jégképződés ritka, 800 km/h TAS (True Air Speed) feletti sebességnél pedig elenyésző a keletkezés mértéke.

Esetünkben a gép maximum 200 km/h-val haladt, tehát a repülőgép felületi hőmérséklete 1 °C volt, míg a környező levegőé 0 °C és -10 °C között változott, magasságtól függően. Amint megkezdődött a jegesedés, a gép felületi hőmérséklete termikusan kiegyenlítődt a környezettel, negatív hőmérsékletre hűlt.

## **2.4. Profil-geometriai tényezők hatása a jegesedés intenzitására**

A jéglerakódást egy merevszárnyú repülőgépnél a húr mentén, azaz a szárny vezéregyenesére merőleges irányban szokás mérni. Ahogy nő az irányfelületek abszolút húr hossza, úgy csökken a jegesedési zóna. A jegesedés húr irányú (a belépő élektől a szárnyprofilon végighúzódnó egyenes a kilépő élekig) terjedelmét a repülés magassága és sebessége is meghatározza, a következő geometriai adatokon kívül. A jegesedési terület kiterjedtsége nő a szárnyak állásszögének növekedésével. Az állásszögtől, illetve a szárnyprofil geometriájától is függ, hogy a szárny alsó és felső felületét milyen áramlás veszi körül. Aszimmetrikus megfűvás esetén az alsó szárnyfelület jobban, a felső szárnyfelület kevésbé jegesedik. A szárnyprofilok vastagsága is befolyásoló tényező; vékony szárny esetében maximum a húr hossz 15%-áig, vastagabb szárnyon ennél kisebb mértékben figyelhető meg a jéglerakódás.

A repülőgépeken és helikoptereken a jegesedés veszélyének leginkább a vezetőfülkék üvegezése, a légszavak, farok-légszavak, merevszárnyak, vezérsíkok, az irányfelületek orrdoboz, a géptesten elhelyezett antennák, különböző műszerek (Pitot-cső, állásszög-adó), a hajtóművek szívócsatornájának keresztmetszete, porvédő és áramlásterelő berendezések belépő keresztmetszetei vannak kitéve. Ezek negatív következményei például az aerodinamikai tulajdonságok megváltozása. A stabilitási és kormányozhatósági tulajdonságok elromlanak a gép súlynövekedéséből eredő súlyponteltolódás miatt. A nem egyenletesen lerakódott, vagy már leváló jég réteg tömeg-kiegyensúlyozatlanságot okoz. A centrifugális erő hatására a forgószárnyakról és a légszavakról leváló jégdarabok súlyosan károsíthatják a gép további szerkezeti elemeit. A vezetőfülke üvegezésén és a külső műszereken lerakódó jég rontja a vizuális tájékozódási lehetőségeken, és a bejövő mért adatokat pontatlanná teszi, ezáltal a robotpilóta működésére is negatívan hat. Akár hajtómű-leállásra is sor kerülhet, amennyiben a szívócsatorna belépő éléről, az áramlásterelő berendezésekről jégdarabok válnak le repülés közben. [2]

## **3. AZ ESET BEMUTATÁSA**

„2010. március 11-én bejelentés érkezett a Légügyi Hatósághoz, hogy egy Cessna típusú repülőgép éjszakai VFR szabályok szerint Zwickau-Békéscsaba útvonalon repül, s Magyarország területe fölött eltévedt és Ferihegyre való irányítását kéri. Az elrendelt készenléti állapotból 8 perccel később „várható légi jármű eseménnyé” alakult a riasztási szint, miután a pilóta jelentette, hogy jegesedési körülmények közé keveredett. Amikor a kisgép 20.00 LT-kor szerencsésen landolt a 31L pályán,

jelzőfényei nem látszódtak a kialakult jégrétegtől. Március 16-án eljárás indult az illető ellen számos légiközlekedési szabálysértés gyanúja miatt. A repülési körülmények és a felelősségi körök megállapítására kivizsgálás kezdődött. Az esethez alább kapcsolódó képek alátámasztják a megállapítást, miszerint életveszélyes helyzet alakult ki.

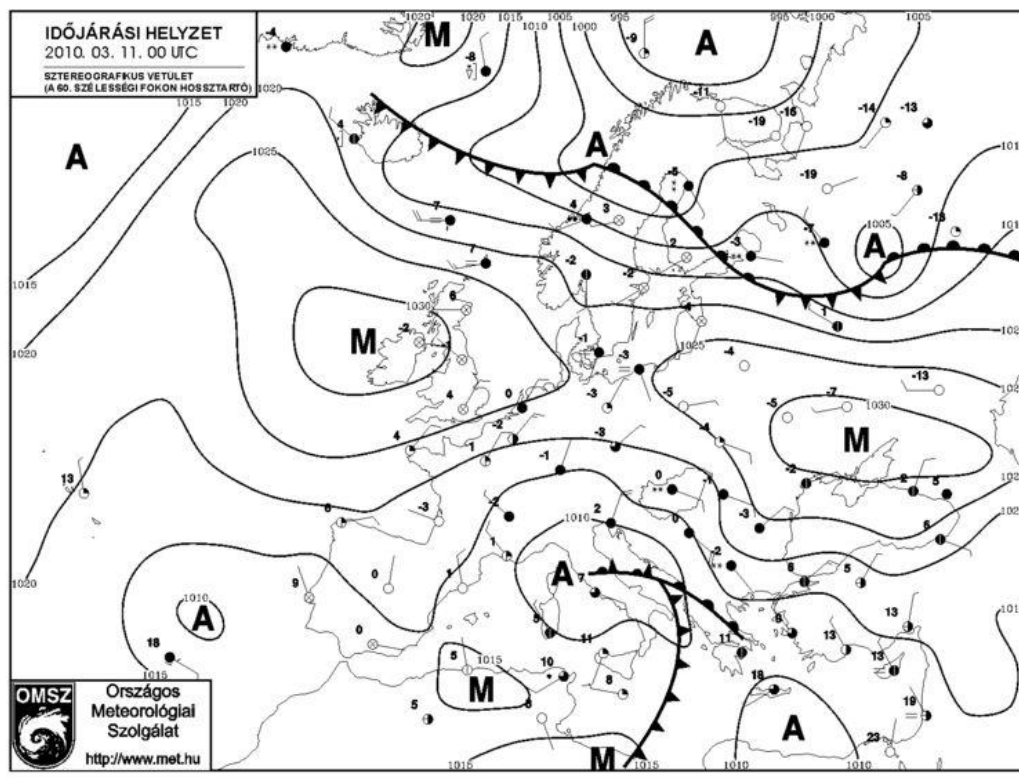
Az alábbi képeket és a 2011. 03.11-ei bécsi, a budapesti magas légköri szondázások hőmérséklet-méréseit tekintve kevert jegesedés állapítható meg az eset kapcsán.



1. kép. Az esetről készült képek

#### 4. AZ ESET METEOROLÓGIAI HÁTTERE

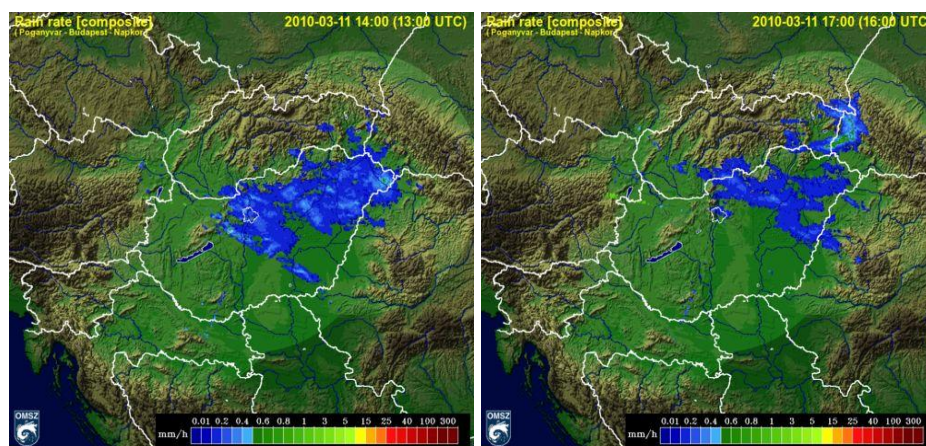
„A kérdéses napon egy mediterrán ciklon alakította hazánk időjárását. Borult idő volt, kezdetben országszerte, majd inkább az ország északi felében havazott, napközben helyenként havas eső is előfordult. A keleties szél mérsékelt maradt. A havazás miatt sokfelé egész nap rossz látási és felhőzeti viszonyok uralkodtak. A hőmérséklet és nedvesség vertikális profilja ideális volt a közepes-erős jegesedés kialakulásához. Az 6. ábrán látható a szinoptikus helyzet analízise.



6. ábra. Mediterrán ciklon-centrum a Kárpát-medencétől nyugatra

Valamint az Esztergom-Budapest- Szolnok-Békéscsaba útvonalon 2010. március 11 14:00 -20:00 (LT):

Egész nap borult volt az ég. A déli órákban havazott az útvonalon majd az erősebb havazást okozó vonal északkeletre tevődött át és ott jelentősebb mennyiségű hó is előfordult. Az intenzív havazást okozó csapadéköna mozgása jól nyomon követhető az időjárási radar által detektált képeken.



7. és 8. ábra. Kompozit időjárási radarkép 2010.03.11. 14:00 LT

A Budapesttől Szolnokig tartó útvonal szakaszon a látástávolság a kezdeti 1300- 1500 méteres látástávolságról az esti órákra 3000 és 6000 méter körüli látástávolságra javult majd ismét romlásnak indult. Az időszak folyamán változó intenzitással havazott. Borult volt az ég néhány felhőfoslány volt

60 és 180 méteres alappal, majd e felett egy teljes égboltot borító felhőréteg 300-400 méteres felhőalappal. A budapesti égből digitális formában is rögzítésre kerül, az égből szerkezetében lényeges változás nem figyelhető meg.

Az útvonal déli részén, Békéscsaba környékén a déli órákban 6-7 kilométeres látástávolság mellett elsősorban eső, havas eső fordult elő. Borult időben több rétegű felhőzetet figyeltek meg. A legalacsonyabb felhőalapok 120 és 150 méter között voltak.

Az útvonal teljes hosszára jellemző, hogy a talaj szintjében a gyenge vagy mérsékelt keleti délkeleti szél lassan délire, délnyugatra fordult.

#### **2010.03.11 13:30 (LT) Budapest**

**A magasabb légrétegek meteorológiai viszonyai valamint veszélyes időjárási elemek előfordulása:**

| <b>Magasság</b> | <b>Hőmérséklet</b> | <b>Rel.nedv.</b> | <b>Szélirány</b> | <b>sebesség(m/s)</b> |
|-----------------|--------------------|------------------|------------------|----------------------|
| 300 méter       | -0.4               | 94%              | Kelet-délkelet   | 1 m/s                |
| 600méter        | -2.7               | 93%              | Délkeleti        | 7 m/s                |
| 900 méter       | -4.5               | 91%              | Délkeleti        | 4 m/s                |
| 1400 méter      | -7.5               | 89%              | Délkeleti        | 8 m/s                |
| 2900 méter      | -8.1               | 88%              | Délnyugati       | 8 m/s                |
| 4015 méter      | -13.9              | 80%              | Nyugati          | 3 m/s                |
| 5114 méter      | -21.7              | 76%              | Déli             | 3 m/s                |

#### **2. táblázat. Budapesten 2010.03.11. 12 UTC kor végzett magas légköri szondázás adatai**

A légkör alsó rétegében közepes-erős jegesedés fordult elő. A jegesedésre történő előzetes figyelmeztetések több formában kiadásra kerültek A 9. ábrán a 2010.03.11-én a hajnali órákban kiadott alacsonyszintű szignifikáns térkép figyelmeztetett a déli órákban várható csapadéokra, alacsony felhőalapokra, gyenge turbulenciára és jegesedésre.



N4717 E01628 - N4705 E01810 - N4602 E01905  
SIG CLD: BKN/OVC 0500-1000/XXX FT AGL  
ICE: 12/15 MOD SFC/FL100  
15/18 MOD SFC/FL100 N OF N4700  
15/18 MOD BLW FL040 S OF N4700  
SIGMETS APPLICABLE: NIL=  
2010. 03. 11. 10:44 UTC Üveges Zoltán és Bozó János

---

Mivel a jegesedési réteg igen vastag volt (7000 méteren is 80 % volt a relatív nedvesség), ezért a nagygépes repülés számára az alábbi veszélyfigyelmeztető távirat került kiadásra 2010.03.11-én a hajnali órákban

---

WSHU31 LHBM 110340 CCA  
LHCC SIGMET 01 VALID 110340/110740 LHBP-  
LHCC BUDAPEST FIR MOD TO SEV ICE FCST OVER LHCC FIR  
BTN FL030/FL120 MOV N NC=  
2010. 03. 11. 03:44 UTC Lambert Károly

---

Végezetül megállapítható, hogy bár a Földközi-tenger feletti ciklon áramlási rendszeréből származó igen nedves levegő több, a VFR repülésre veszélyes időjárási elemet magában hordozott, a kis és a nagygépes repülés számára készült meteorológiai előrejelzések időben figyelmeztettek ezeknek a jelenségeknek a felléptére.” (Wantuch Ferenc)

## 5. A JEGESEDÉS ELLENI VÉDEKEZÉS

A kisgépes repülés során kialakuló jegesedés, mint láttuk, életveszélyes lehet. Amint megkezdődött a folyamat, a pilóta egy teljesen más aerodinamikai tulajdonságú gépet kell, hogy irányítson, mint amivel felszállt. Minden géphez kiadják a szükséges teendők listáját, ha az jegesedés körülményeibe keveredne. Egy Cessna esetében ezek közé tartozik például a Pitot-cső és a kabin fűtésének bekapcsolása, irány-és magasságváltoztatás, tilos a fékszárnyakat kinyitni a magassági kormány hatásossága miatt, ehelyett növelni kell a sebességet, hogy csökkenjen a jéglerakódás a légcsavaron.[5]

A jegesedés kivédésére szolgálnak a jégtelenítő berendezések, ám ezek használata kisgépeken nem elterjedt.

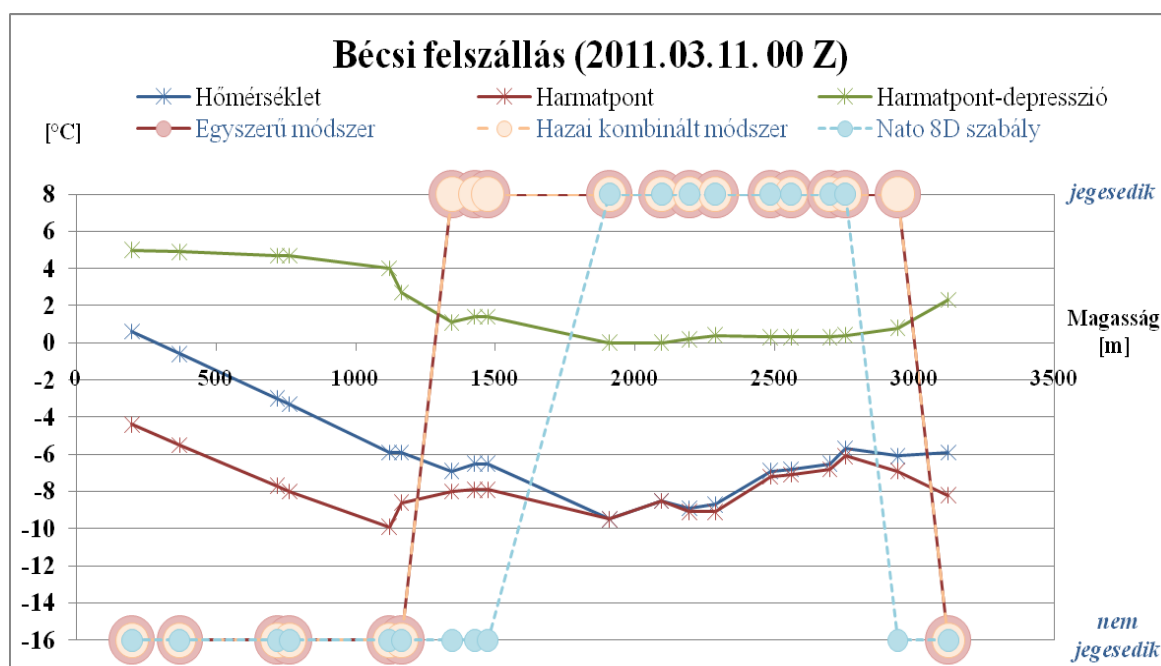
A harmadik legfontosabb szerepe a jegesedés kivédésében az előrejelzéseknek van. Azonban mindig a lehetséges legerősebb jegesedést adják meg a talaj és 3040 m között (OMSZ), amit sokszor túlzott óvintézkedésnek vélnek a pilóták.

## 6. JEGESEDÉS SZÁMOLÁSI MÓDSZEREI, ELŐREJELZÉS

A jegesedés számolását több egyszerű feltétel-rendszer határozza meg. A repülést érintő jegesedés-előrejelzés tanulmányozása során a következő módszereket ismertem meg:

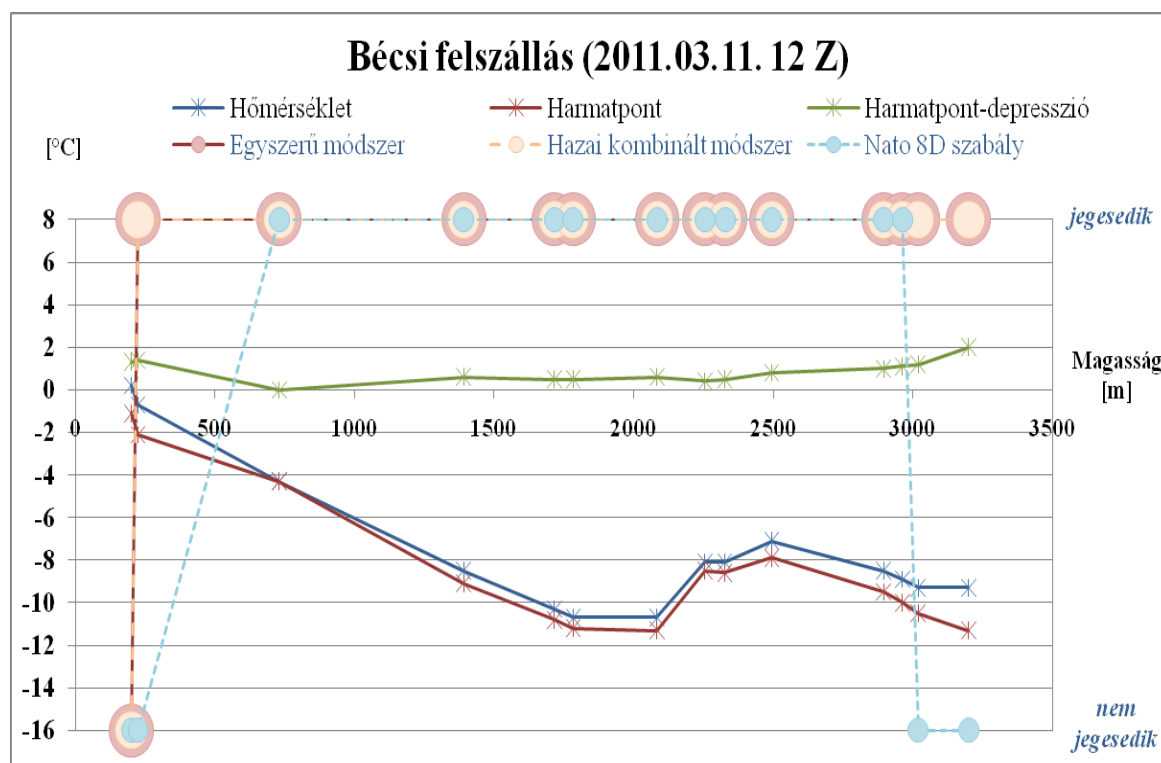
1. Egy *egyszerű módszernek* nevezett séma szerint, ha  $-7^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$  és a  $\text{Depr} \leq 2^{\circ}\text{C}$ , illetve ha  $-15^{\circ}\text{C} < T < -7^{\circ}\text{C}$  és a  $\text{Depr} \leq 3^{\circ}\text{C}$ , akkor jegesedésre kell számítani az adott magasságban.
2. *-8 D szabály* a NATO alkalmazásában. Az alábbi eljárást minden rétegre elkészítik: ha a hőmérséklet  $-22^{\circ}\text{C}$  és  $0^{\circ}\text{C}$  közé esik, kiszámítjuk a harmatpont-depressziót, amelyet megszorozunk -8-cal, s ha az így kapott érték nagyobb vagy egyenlő, mint az adott réteg hőmérsékleti értéke, akkor ott jegesedik.[3]
3. *Hazai kombinált módszer*: Először kiszámítjuk a harmatpont-depressziót, amit megszorozunk -8-cal. Ha az eredmény nagyobb vagy egyenlő a réteg hőmérsékleténél, akkor ott jegesedik. A -8D szabályon kívül, ha  $-15^{\circ}\text{C} < T < 0,01^{\circ}\text{C}$  és  $f \geq 85\%$ , akkor is riaszt. Maximum 5 réteget írunk ki.

A repülési útvonalból kiválasztott két város 2010. március 11-én felküldött magas légköri szondázások adatai alapján alkalmaztam a három módszert az előrejelzések lehetséges kimenetelének vizsgálatára, Bécsben 0 UTC-kor és 12 UTC-kor, Budapesten 12 UTC-kor. A szonda-adatok a bécsi felszállás esetében a 28 km-es, illetve a 35 km-es magasságig terjednek, míg a budapesti felszállásnál 9882 m fölött nincs használható harmatpontmérés. A kisgépes repülés esetén 3000-3500 méterig kell vizsgálni, e magasság fölé ugyanis nem szállnak, illetve Magyarországon az összes repülésmeteorológiai távirat kb. 3000 méterig szól. A helyes előrejelzéseket és a módszerek jelezte jegesedési rétegek jelenlétét az eset több rétegen keresztül lejegesedő gépe igazolja.



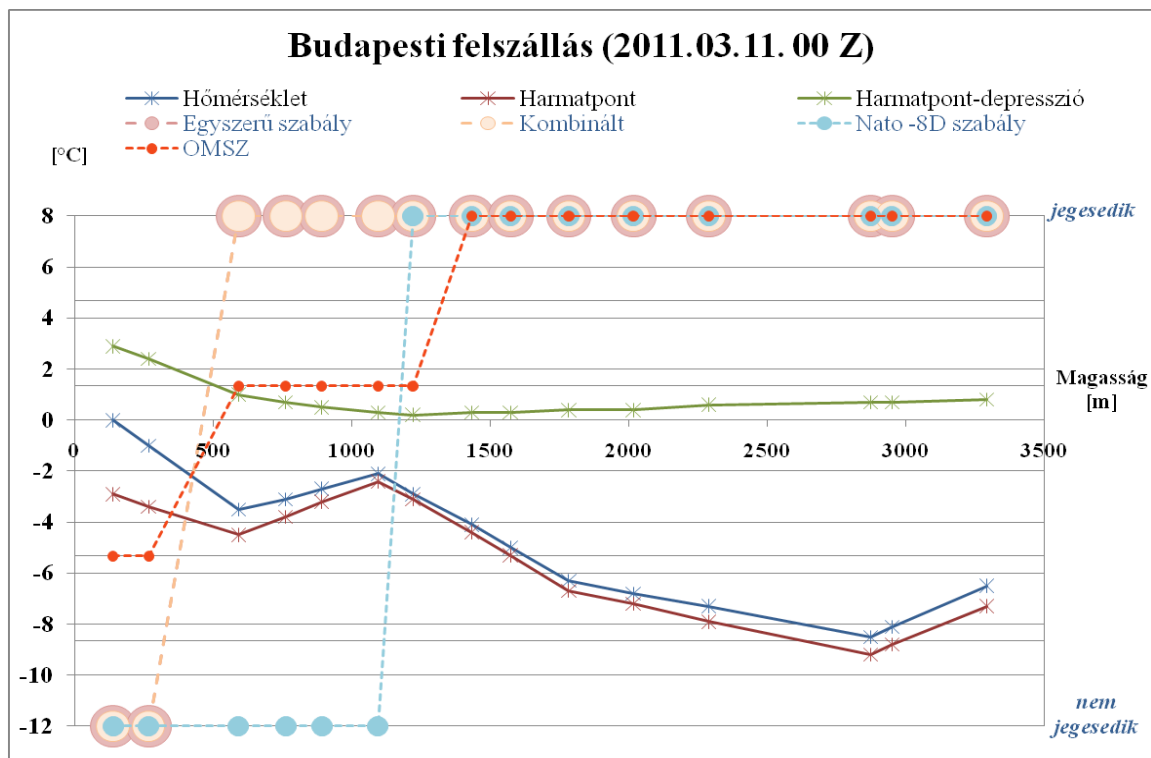
10. ábra. Légköri szondázás adatokra alkalmazott jegesedési módszerek (Bécs 2011. 03.11. 00 UTC)

A hőmérséklet- és harmatpontméréseket, és a módszerek szerinti jegesedés magassággal való alakulását láttató ábráról jól megállapítható, hogy 1164 méteres magasságig (879 hPa) egyik módszer sem jelez jegesedést. Az 1164 m-es szint alatti 5 rétegződésben a relatív nedvesség is 69-81% között mozog. Az egyszerű módszer előbb jelez jegesedést, mint a NATO -8D szabálya, amely csak 1908 m-től számítja a veszélyeztetett szinteket, s alacsonyabban, 2751 m-en mutatja az utolsó jegesedési zónát, míg az egyszerű módszer 2939 m-en (700 hPa). Megfigyelhető, hogy a NATO -8D szabálya szerint jegesítő rétegekben a hőmérsékleti és harmatpont görbe lefedti, illetve közelíti egymást. A kombinált módszer mindkét jelzést érvényesíti, mert a relatív nedvesség minden szinten 85% fölötti. A felszállás napján éjfélkor már Bécs fölött is a repülésre veszélyes jegesedés alakult ki.



11. ábra. Magas légköri szondázás adatokra alkalmazott jegesedési módszerek  
(Bécs, 2010.03.11.12 UTC)

A hazánk és Ausztria időjárását alakító mediterrán ciklon hatására 12 órával később egyértelműen kedvezőbbek a jegesedés feltételei, a harmatpont-depresszió 0°C és 2°C között, a hőmérséklet pedig a jegesedéshez optimális intervallumban mozog minden vizsgált és repülésben érintett rétegben.



12. ábra. Magas légköri szondázás adatokra alkalmazott jegesedési módszerek  
(Budapest, 2010.03.11.00 UTC)

Ezen az ábrán az OMSZ által használt előrejelző-algoritmust is jelöltem, a területet harmadokra osztva. Az alsó harmad gyenge, a második harmad közepes, a diagram tetején jelzett piros pontok pedig az erős jegesedés előrejelzései.

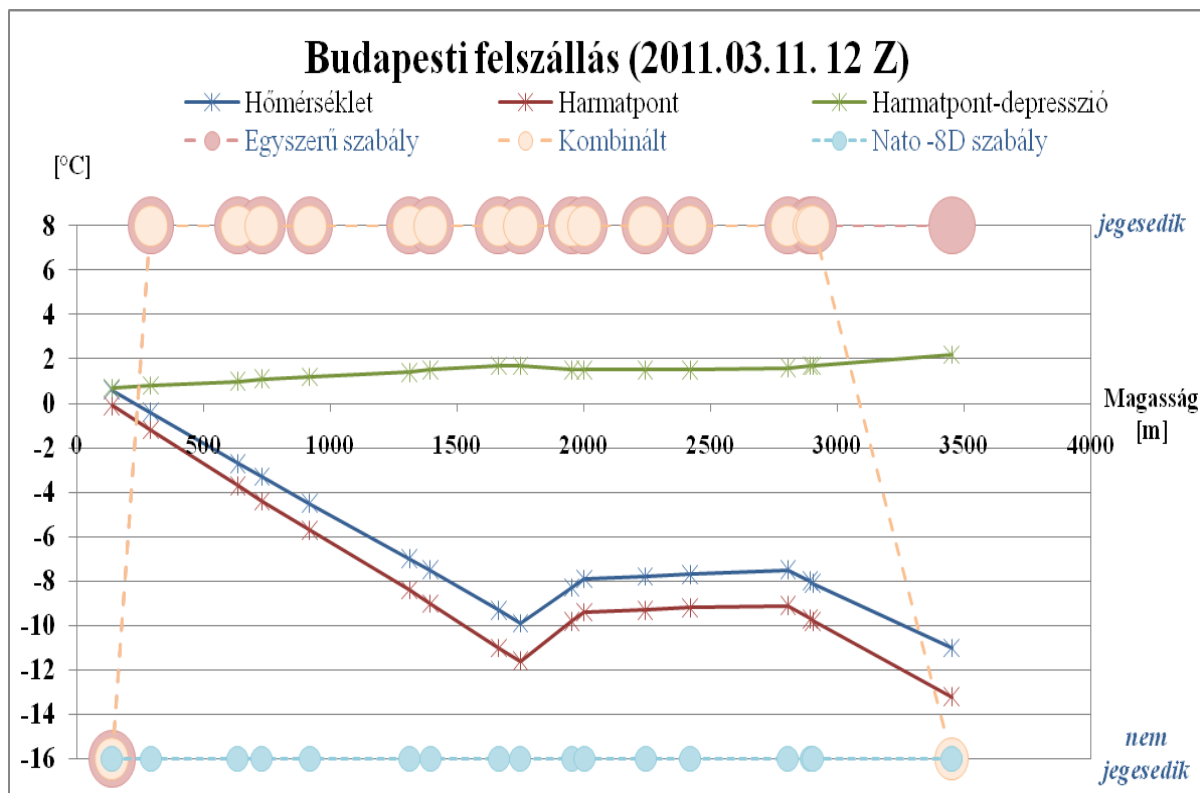
Az Országos Meteorológiai Szolgálat a következő egyszerű döntési algoritmust alkalmazza. Ez a módszer a jegesedés várható erősségét (a lehetséges legerősebbet) is megadja a különböző magasságokban, a talajtól 3040 m-ig. Nem adnak ki jegesedésre előrejelzést  $0^{\circ}\text{C}$  fölötti hőmérséklet esetén, illetve ha az alábbi feltételek közül akár egy nem teljesül.

Gyenge jegesedésről beszélünk, ha a relatív nedvesség ( $f$ ) 65-85% közötti, és  $-4^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$ , vagy  $-25^{\circ}\text{C} < T < -18^{\circ}\text{C}$ . Szintén gyenge a jegesedés, ha  $85\% < f < 100\%$ , és  $T < -25^{\circ}\text{C}$ .

Közepes jegesedés akkor igaz, ha  $65\% < f < 85\%$  és  $-18^{\circ}\text{C} < T < -4^{\circ}\text{C}$ ; vagy  $85\% < f < 100\%$  és  $-4^{\circ}\text{C} < T < 0^{\circ}\text{C}$ , vagy  $-25^{\circ}\text{C} < T < -18^{\circ}\text{C}$ .

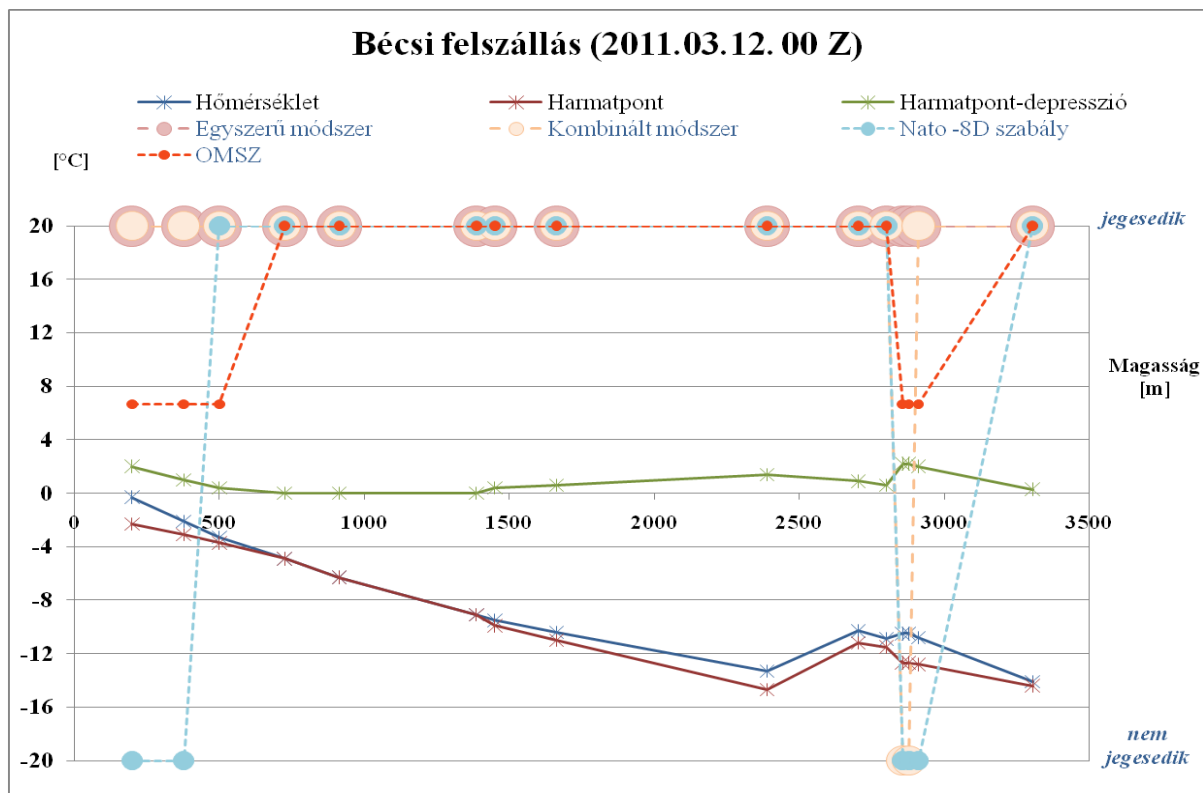
Erős jegesedéshez a következő feltételek tartoznak:  $85\% < f < 100\%$  és  $-18^{\circ}\text{C} < T < -4^{\circ}\text{C}$

Ezek a határértékek a rétegfelhőkre vonatkoznak, ugyanis az a tapasztalat, hogy a rétegfelhőkben magasabb hőmérsékleten jelenik meg az a jegesedés, amely gomolyos felhőkben csak alacsonyabb hőmérsékleten alakulna ki. (Fövényi Attila: Repülésmeteorológiai előrejelzések, produktumok készítése az OMSZ-nál, és az ezekhez való hozzáférés című előadás alapján; A jegesedés előrejelzése)

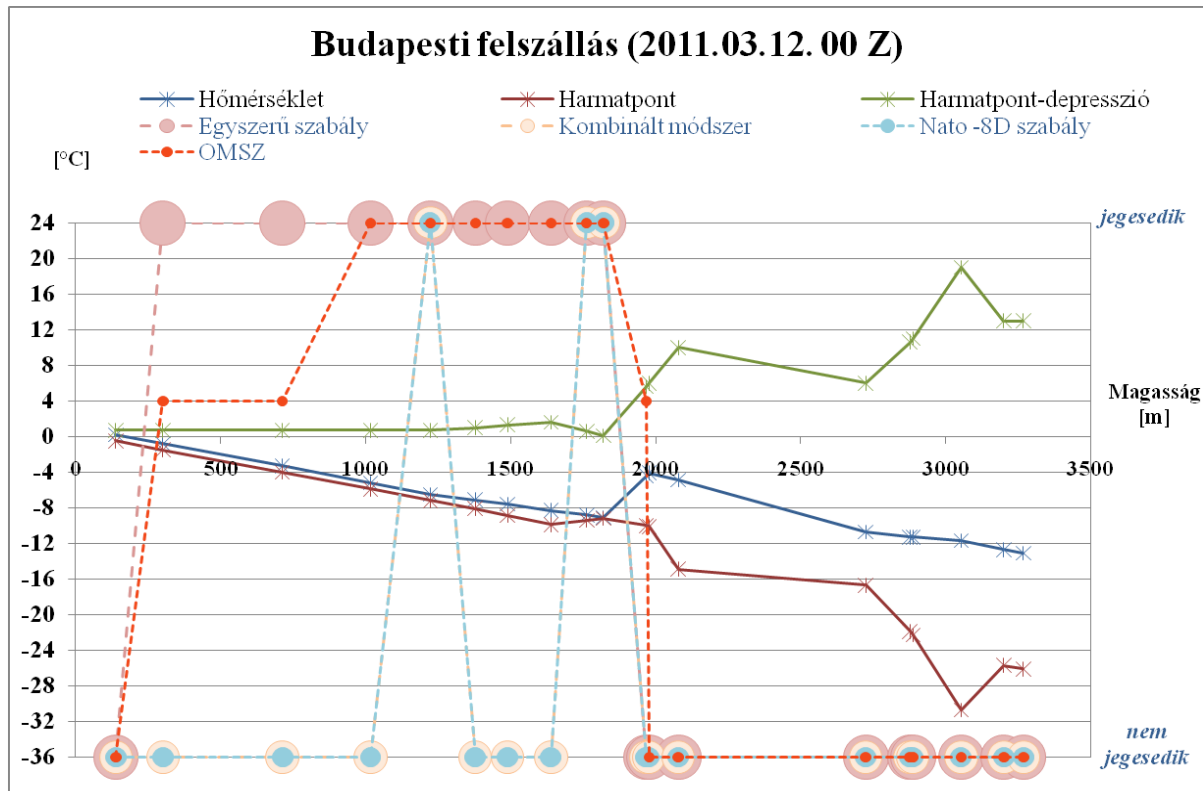


13. ábra: Magas légköri szondázás adatokra alkalmazott jegesedési módszerek  
(Budapest, 2010.03.11. 12 UTC)

A budapesti 12 UTC-s mérésekre teljesen eltérő eredményeket kaptunk. Mivel a hőmérsékleti adatok nem közelítik a harmatpontméréseket, hanem a két görbe párhuzamosan halad egymás mellett, és a harmatpont-depresszió értékei „magasak” (2°C), a NATO módszer egyáltalán nem jelöl ki a repülésre jegesedési szempontból veszélyes területet. Azonban az egyszerű módszer jegesedés jelzéséhez a harmatpontmérések kellően alacsonyak. A budapesti szondázás szerint a 200 m-es szinttől egészen 3452 m-ig a relatív nedvesség 88 és 95% között, a hőmérséklet 0°C és -15°C között alakul, ezért a kombinált módszer által jelzett jegesedés szinte a teljes kisgépes repülési zónára fenn áll.



14. ábra. Magas légköri szondázás adatokra alkalmazott jegesedési módszerek  
(Bécs, 2010.03.12. 00 UTC)

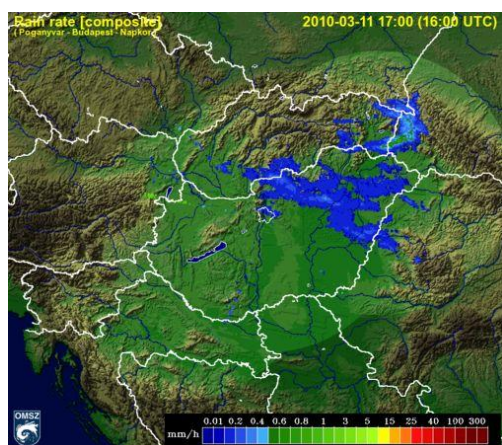


15. ábra. Magas légköri szondázás adatokra alkalmazott jegesedési módszerek  
(Budapest, 2010.03.12. 00 UTC)

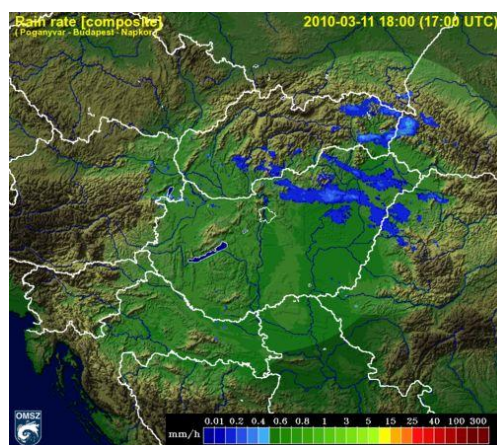
A 12-ei budapesti felszállás szerint nagyobb eltérések állapíthatók meg a módszerek között. A relatív nedvességtartalom hirtelen lecsökken a magassággal 65% alá. A harmatpont és hőmérséklet-mérések között jelentős eltérések adódnak 2000 m-től fölfelé, így a módszerek nem jeleznek jegesedést a felsőbb rétegekben.

Alkalmazva a fenti erősség-előrejelzési algoritmust az eset idejére és helyére, az alábbiak állapíthatók meg:

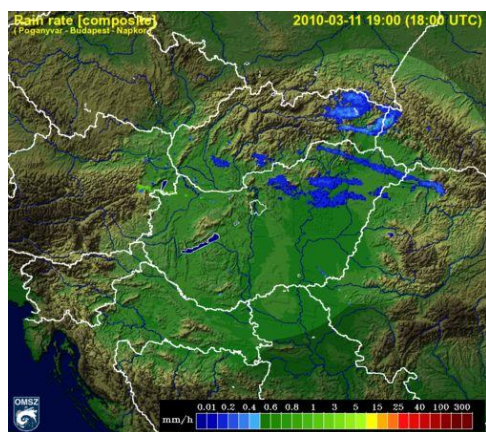
731 m-es magasságig Budapest fölött közepes erősségű jegesedés volt, 3452 m-ig pedig erős jegesedést tapasztalt, aki az eset idejében repült a város fölött. A radar képeken látható, hogy keleti irányban távolodott ez a nedves, hideg légtömeg, amelyet Törökszentmiklós fölött ért utol a pilóta.



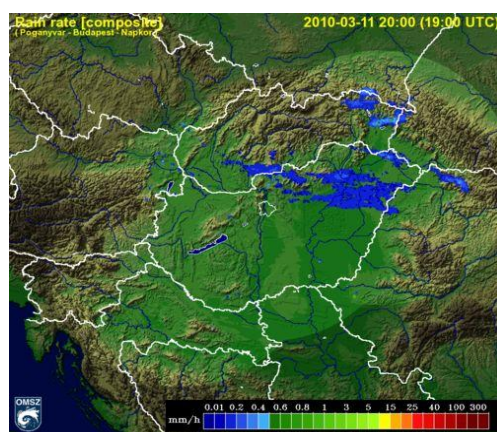
17 UTC



18 UTC



19 UTC



20 UTC

## 7. MEGÁLLAPÍTÁSOK

Az egyszerű módszer alacsonyabb (65-75%) relatív nedvesség adatok mellett is jelezhet jegesedést - 15°C alatt is. A NATO-módszer ezzel szemben annál kevésbé jelez jegesedést, minél magasabbak a harmatpont-depresszió értékek. Az OMSZ alkalmazásában álló algoritmus pontosabb információt szolgáltat a jegesedés intenzitására lebontva. Érdekesség, hogy 2010.03.10-ére is elvégezve a fenti számolásokat arra az eredményre jutottam, hogy bár egyik módszer sem jelzett jegesedést, az OMSZ

algoritmus a közepes erősségű jegesedést adott volna ki azokra a rétegekre, ahol a harmatpont-depresszió 3°C és 12°C között mozgott. Ilyen magas értékekre a többi módszer nem számolt.

Az MM5 és a WRF mezo-skálájú modellek fejlesztésében az egyik legfontosabb feladat a légköri víztartalom térbeli eloszlásának becslése, amely hozzájárulna a jegesedés pontosabb numerikus előre jelezhetőségének alakulásához is. A fent tárgyalt módszerek közti különbségek indokoltá teszik, hogy a vizsgálat tárgyává tegyük a figyelembe vett bemeneti paramétereket és azok súlyozását, megkeresve azokat a döntési kritériumokat, melyek mind az első, mind a másodfajú hiba elfogadható szintjét eredményezik.

## **IRODALOMJEGYZÉK**

- [1] SÁNDOR Valéria - WANTUCH Ferenc: Repülésmeteorológia, 2005.
- [2] ÓVÁRI Gyula: Biztonságtechnika a repülésben, a repülőeszközök jégtelenítő rendszerei, 2008.
- [3] Mr. Mark R.MIRELES - Capt L. PEDERSON - MSgt Charles H. ELFORD: Meteorological techniques, 2006.
- [4] Forecasting Aviation Icing, <http://meted.ucar.edu>
- [5] Cessna „jegesedési” útmutató: Repülés jegesedési körülmények között