

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM  
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR  
METEOROLÓGIAI TANSZÉK

**Repülésre veszélyes időjárási helyzetek  
rekonstrukciójának alkalmazási lehetőségei –  
Felületi jegesedés becslése és a hozzá tartozó  
szimulációs környezet kialakítása**



***Készítette: Hadobács Katalin***

II. éves Meteorológus MSc (időjárás előrejelző szakirányos) hallgató

***Témavezető: Dr. Bottyán Zsolt***

ZMNE Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék

***Tanszéki konzulensek: Dr. Weidinger Tamás, Gyöngyösi András Zénó***

ELTE Meteorológiai Tanszék

**Budapest, 2011.**

# Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék .....	2
1. Bevezetés .....	4
2. Repülőgépek felületi jegesedése és modellezési lehetőségei .....	6
2.1. A felületi jegesedés fogalma és típusai .....	6
2.2. A jégbevonat hatása a repülőgépekre .....	9
2.3. Repülőgép kialakuló jéglerakódás keletkezésének feltételei .....	12
2.3.1. Jegesedést befolyásoló meteorológiai tényezők .....	13
2.3.2. Jegesedést befolyásoló aerodinamikai tényezők.....	15
2.3.3. Jegesedést befolyásoló geometriai tényezők .....	16
2.4. A felületi jegesedés modellezéséről.....	16
2.4.1. Egy egyszerű jégakkumulációs modell - fűtetlen nem forgó henger jegesedésének modellezése.....	18
2.4.2. A jégakkumulációs modell alkalmazhatóságáról .....	23
3. Alkalmazott módszerek és kapott eredmények bemutatása a jegesedés becslésére ...	25
3.1. A repülési esemény bemutatása .....	25
3.2. 2010. 03. 11. szinoptikus elemzése.....	26
3.3. A jegesedési modell bemenő adatainak előállítása WRF modell segítségével ...	33
3.3.1. A WRF-ARW modell felépítése és működése .....	34
3.3.2. A 2011. március 11-ére vonatkozó modellfuttatás .....	35
3.4. A futtatás eredménye és a jégakkumuláció becslése .....	38
4. A szimulációs környezet elkészítése és bemutatása .....	46
4.1. A repülőgép-szimulátorokról röviden.....	47
4.2. A repülőgép-szimulátorok rendszerei .....	48
4.3. A repülőgép-szimulátor meteorológiai alrendszere .....	49
4.4. A jegesedési esettanulmányhoz kapcsolódó szimulációs környezet .....	51
5. Összefoglalás .....	56
6. Függelékek.....	57
I. Függelék: Tsao és Anderson (2005) kísérleteinek kezdeti feltételei.....	58
II. Függelék: OMSZ Napijelentés.....	60
III. Függelék: WRF-ARW modell.....	61
III.1. Modell dinamika .....	61

III.2. Modell-egyenletek .....	63
III.3. Modell parametrizációk .....	67
IV. Függelék: Repülőgép-szimulátor.....	71
IV.1. A repülőgép-szimulátor térhódításának rövid történeti áttekintése.....	71
IV.2. A meteorológiai paraméterek bevitele.....	73
7. Irodalomjegyzék .....	77
Köszönetnyilvánítás.....	84

# 1. Bevezetés

A meteorológia egyik legfontosabb területe a repülésmeteorológia, amely az általános meteorológiai ismeretanyagon túl megköveteli a repülés szempontjából fontos elemekre vonatkozó speciális ismereteket, a repülésmeteorológiai szolgáltatások alkalmazását valamint a repülés biztonságát és gazdaságosságát befolyásoló tényezők ismeretét.

Ezen felül a repülésmeteorológiával foglalkozóknak komoly aerodinamikai és repüléselméleti tudással is rendelkezniük kell.

A repülésmeteorológia feladata a veszély nélküli repülés biztosítása, és a megfelelő repüléstechnika alkalmazása az adott időjárási szituációban. Ez azt jelenti, hogy pontos tájékoztatást ad az aktuális időjárásról és annak megváltozásáról, a repülőterekre és repülési útvonalra. Természetesen teszi mindezt célszerűen adott repülőgép típusra vonatkozóan, adott formában. Kiemelt figyelmet kell fordítani azon időjárási jelenségekre, amelyek különösen nehezen előrejelezhetők, térben és időben kis léptékűek és gyorsan változnak. Ezek okozzák a legveszélyesebb szituációkat a repülés közben. A repülést veszélyeztető elemekhez tartozik pl. az alacsony felhőalap, a rossz látási viszonyok, a turbulencia, a zivatar, a szélnyírás és a jegesedés.

Diplomamunkámban egy, a repülésre veszélyes időjárási jelenséggel, a jegesedéssel foglalkozom. Repülés közben a repülőgép felületén megjelenő jégbevonat számos veszélyt rejt magában. A jegesedés veszélye különösen a kisebb repülőgépeket érinti, de a nagyobb gépek esetén is okozhat problémát. Természetesen a repülőgépeken különböző jegesedést gátló rendszerek üzemelnek, amelyek meggátolhatják a jégréteg megjelenését, ha időben bekapcsolják ezeket.

A repülésmeteorológia kiemelt feladata, hogy időben tájékoztassa a repülőgép személyzetét a jegesedési veszélyről. Egy mai, modern jegesedésre vonatkozó prognózisnak információval kell szolgálnia a jegesedés helyéről a légkörben, a jégbevonat képződésének intenzitásáról, továbbá várható jégakkumuláció mennyiségéről. Amennyiben lehetőség van rá, tájékoztatni kell a pilótát a lerakódás alakjaira is, külön kiemelve a repülésre egyik legveszélyesebb formát, a „szarvszerű” jegesedést.

Dolgozatom első részében a jegesedés fizikai folyamatát, és annak típusait mutatom be. A különböző jéglerakódások eltérő hatást gyakorolnak a repülőgép aerodinamikájára, s így az irányíthatóságára is. Ilyenkor a pilótának egy teljesen más

aerodinamikai tulajdonságú repülőgépet kell irányítani, mint felszálláskor, így minden géptípushoz megadják azon teendőket, amelyeket végre kell hajtani jegesedési körülmények között. A vészhelyzet kivédésében a jó előrejelzésnek is nagy szerepe van. A tudomány fejlődésével, már az 1950-es évektől kezdve, lehetőség nyílt a jéglerakódás modellezésére. A dolgozatban a különböző bonyolultságú eljárások közül a *Lozowski* (1980; 1983a, b) által kidolgozott nem forgó hengerre vonatkozó akkumulációs modellt mutatom be. Ennél természetesen már fejlettebb modellek is léteznek. Egyszerűsége és jó alkalmazhatósága miatt döntöttünk mellette. Jó eredményeket szolgáltat mind a jég mennyiségére, mind alakjára vonatkozóan egy adott környezeti tartományban.

Munkám második részében egy megtörtént, s majdnem katasztrófába torkolló repülés során megjelenő jégbevonat mennyiségére és alaki tulajdonságára készítettem becslést egy 2D modell felhasználásával (*Lozowski*, 1983a). Az akkréciós modell futtatásához szükséges meteorológiai kezdeti feltételeket a WRF-ARW mezo-léptékű modell segítségével állítottuk elő.

Az időjárás és a jegesedési modellek által szolgáltatott adatoknak a pontosabb előrejelzés elkészítése mellett, több más felhasználási területe is létezik, például a pilótaképzésnél. A hajózószemélyzet felkészítése nem egyszerű és egyben nem is olcsó feladat, ezért a földi repülésgyakorló eszközök sok előnnyel járnak. A magyar katonai légi jármű-vezetők képzéséhez is használnak földi gyakorló eszközt, ún. szimulátort. Ezek fejlett meteorológiai alrendszerrel rendelkeznek, amely biztosítja, hogy a pilótáknak valósághű meteorológiai körülmények között legyen lehetőségük gyakorolni. A dolgozat utolsó részében az MS Flight Simulator X program segítségével próbáljuk rekonstruálni a vizsgált eset repülési körülményeit (*Williams*, 2006). Egy ferihegyi megközelítés elvégzése során rámutatunk az egyes meteorológiai elemek, mint például a felhőzet, a turbulencia és kiemelten a jegesedés miatt kialakuló bonyolult időjárási körülmények között fellépő, gyakran a fedélzeti műszereket is érintő problémákra.

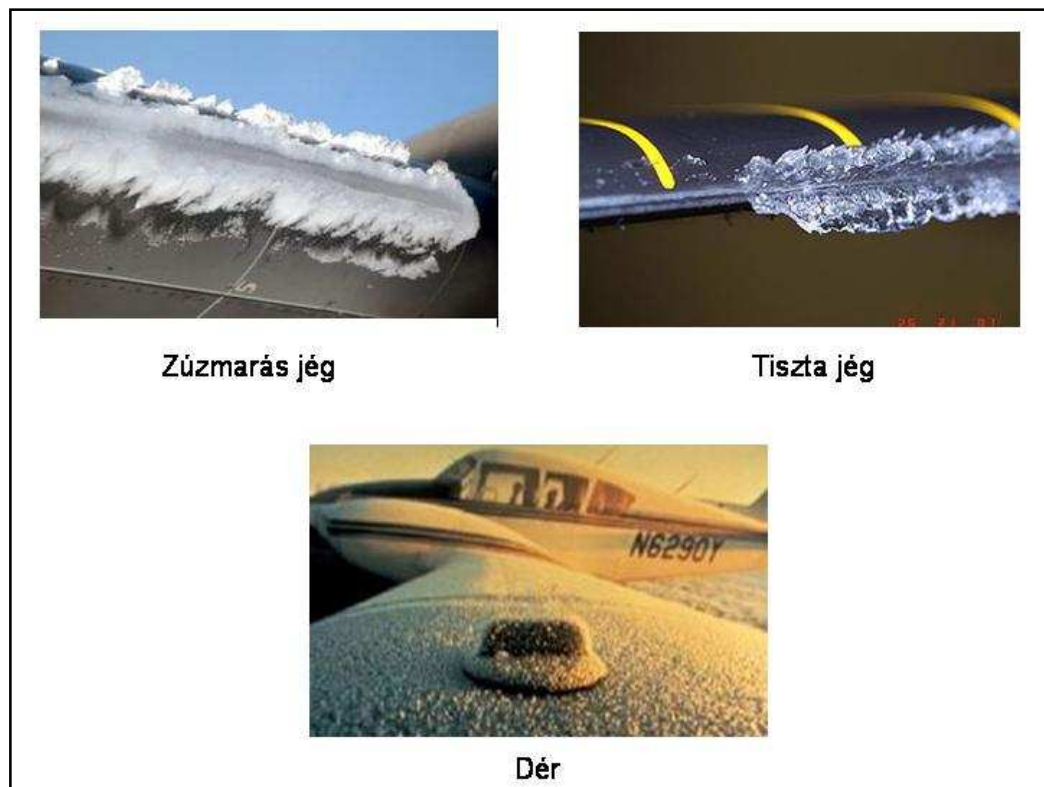
A dolgozatomban alkalmazott módszer egy adott időpontban előfordult meteorológiai szituáció nagy felbontású 3D-ós rekonstrukcióját foglalja magában, melynek további alkalmazása történhet a repülőesemények utólagos, részletes kivizsgálása során.

## 2. Repülőgépek felületi jegesedése és modellezési lehetőségei

A repülés fejlődésével lehetőség nyílt a felhőn belüli hosszabb ideig tartó műszeres repülések végrehajtására. E feladatok elvégzése során a pilóták egy addig kevésbé ismert veszéllyel találkoztak, a repülőgép felületének és hajtóművének jegesedésével. E fejezetben ismertetem a felületi jegesedés fogalmát és azokat a tényezőket, amelyek elősegítik, vagy gátolják ennek kialakulását, és így szerepet játszhatnak a jelenség modellezésében is.

### 2.1. A felületi jegesedés fogalma és típusai

Felületi jegesedésen azt a jéglerakódást értjük, amely felhőben, esőben vagy nedves hóban – ritkán a felhő alatti repülésnél – a repülőgépen keletkezik fagypont alatti hőmérsékleten a túlhűlt vízcseppek repülőgép felszínhez való ütközésével (Sándor és Wantuch, 2005). A továbbiakban jegesedés alatt csak a repülőgép felületének eljegesedésével kapcsolatos hatásokat és jelenségeket értjük, a hajtómű jegesedésének problémáját nem érintjük.

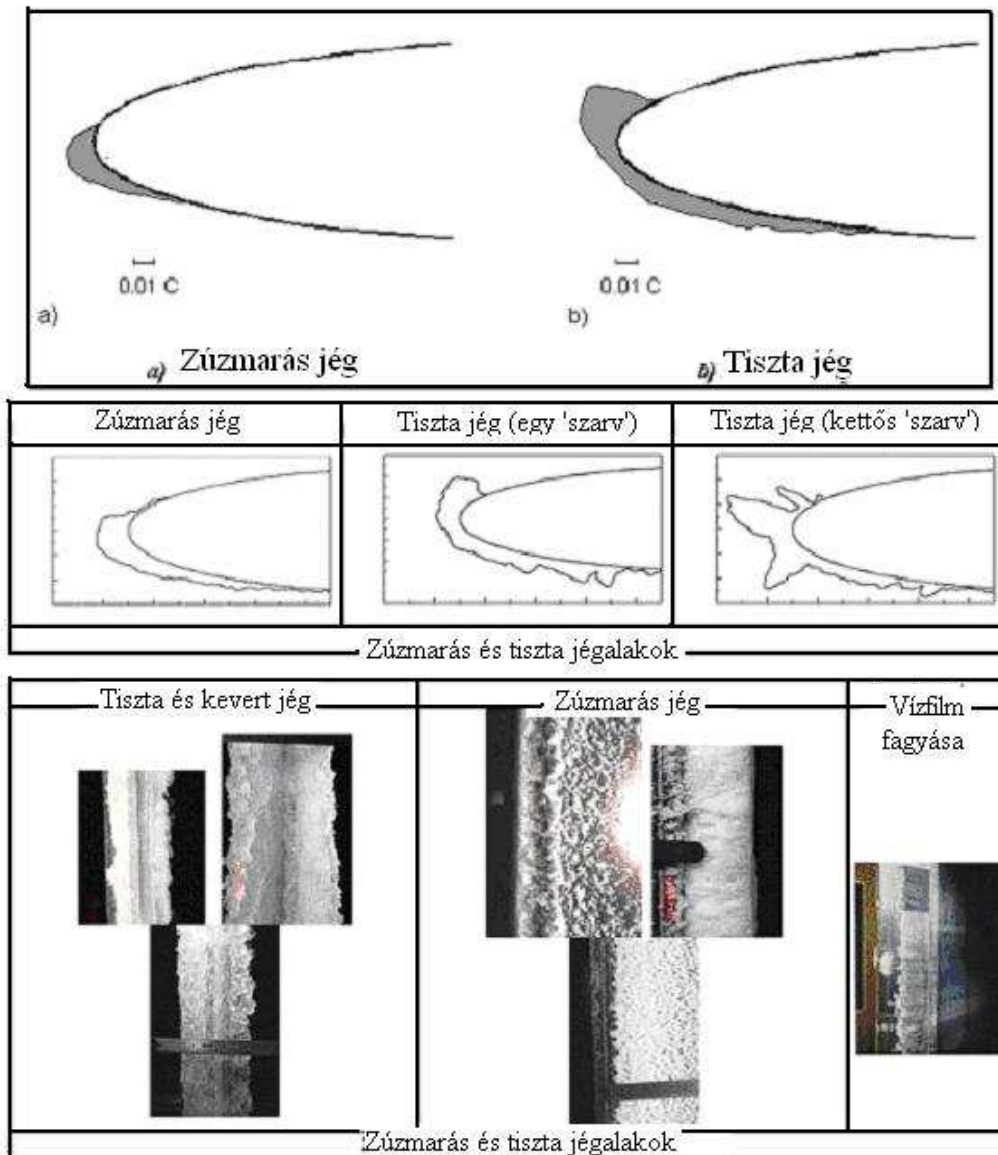


1. ábra. A jég típusai

([http://www.thefullwiki.org/Icing\\_conditions](http://www.thefullwiki.org/Icing_conditions); <http://www.ehfc.net/>).

A jegesedésnek 3 fő típusa van (*1. és 2. ábra*). Az első leggyakrabban előforduló formája, a levegőben lévő vízgőz közvetlen kifagyásával (depozíció) létrejött vékony dørszerű lerakódás (hoar frost). Nem jelent veszélyt a repülésre, de egy későbbi erős lerakódás forrása lehet ez a típus, ami gyakran kialakulhat 0 °C alatti repülési környezetben.

Amennyiben a túlhűlt felhőcseppekkel történő ütközés során a becsapódó cseppek az ütközési pontokban azonnal megfagynak, mielőtt egy másik csepp is odaérne, akkor a jégbevonat képződés száraz típusáról (dry-growth icing) beszélünk. Ez leginkább erősen túlhűlt felhőben, (-7) °C – (-10) °C alatt jellemző (cseppméret eloszlástól is függ). Minden vízcsepp külön jégkristállyá alakul, így létrehozva egy jellegzetes fehérszínű, szabálytalan és durva jéglerakódást, leginkább a szárnyak és vezérsíkok belépő élénél. Ezt a típust nevezzük zúzmarás (rime ice) jégnek (*1. és 2. ábra*).



2. ábra. Jegesedési típusok (<http://extice.cira.it/project/proposal-summary>).

A jégbevonat növekedésének egy másik módja, amikor a becsapódó túlhűlt vízcseppek fluxusa olyan nagy, hogy a megfagyásukkor felszabaduló látens hő elegendő ahhoz, hogy a repülőgép felszínének hőmérsékletét  $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ra emelje. Ez az ún. nedves típusú jégakkreció (wet-growth icing) (2. ábra). Ilyenkor a cseppek egy része azonnal megfagy, más részük a légáramlás hatására az áramlás irányában hátrafolyik (runback water), így ott is tud jégbevonat képződni, ahol más esetben nem fordulhatna elő. Ilyen feltételek mellett egy viszonylag sima, üvegszerű bevonat ún. tiszta (clear/glime ice) jégbevonat fog képződni (1. és 2. ábra) (List, 1977).

E fő fajták mellett keverék típusok is előfordulnak (2. ábra). A következő táblázatban a jegesedés típusait és a hozzájuk tartozó kritikus környezeti hőmérsékleteket foglalom össze (1. Táblázat).



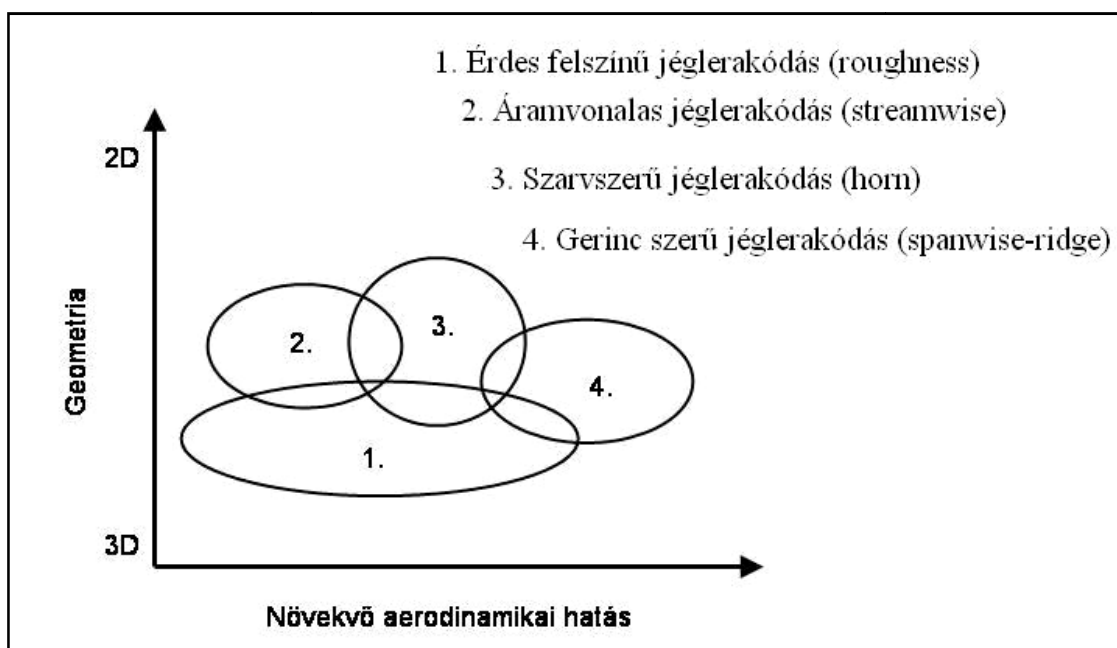
A jegesedés típusa	A külső levegő hőmérséklete
Tiszta jég	0 °C – –5 °C
Tiszta vagy kevert jég	–5 °C – –10 °C
Kevert vagy zúzmarás jég	–10 °C – –15 °C
Zúzmarás jég	–15 °C – –20 °C

1. Táblázat. Jegesedés típusai (Sándor és Wantuch, 2005).

## 2.2. A jégbevonat hatása a repülőgépekre

Évtizedek óta számos kutatás irányul a különböző jégbevonatok repülésre gyakorolt hatására (Bragg *et al.*, 2005).

E vizsgálatoknál gyakori, hogy a jégakkréciót geometriailag a következő négy fő csoportba sorolják: érdesség (roughness); szarvszerű lerakódás (horn ice); áramvonalas jéglerakódás (streamwise ice); gerinc-szerű jéglerakódás (spanwise-ridge ice). A 3. ábra szemlélteti, hogy az egyes jég alakoknak milyen mértékű aerodinamikai hatásuk van, illetve, hogy milyen dimenzionalitással rendelkeznek (Bragg *et al.*, 2005).

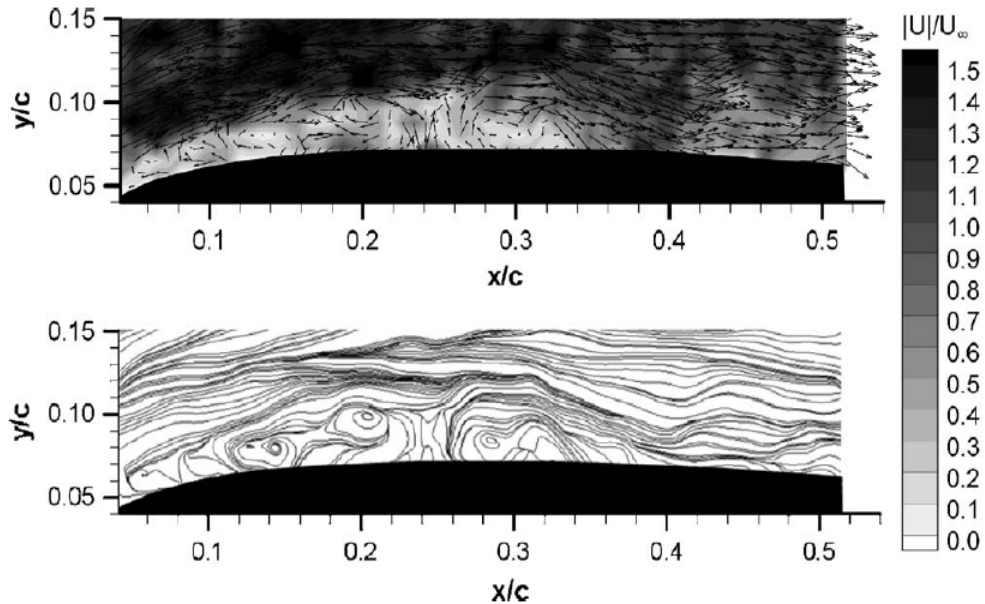


3. ábra. A jégformák aerodinamikai hatásai jeges szárnyszelvény esetén (Bragg *et al.*, 2005).

A vékony jég réteg okozta érdes felület (roughness) a szignifikáns jéglerakódás előtt jelenik meg. Ebben a fázisban még az akkréció nem módosítja például a légcsvár alakját, de már növeli az ellenállást és csökkenti a maximális felhajtóerőt. Az érdességet

a magasságával, amely általában nagyobb, mint a határréteg vastagsága, a sűrűségével és a belépő élen való elhelyezkedésével szokták jellemezni.

A szarv típusú lerakódás nedves típusú jégnövekedési feltételek mellett tud kialakulni. A szarv mögött nagy területen az áramlás turbulensé válik (4. ábra).

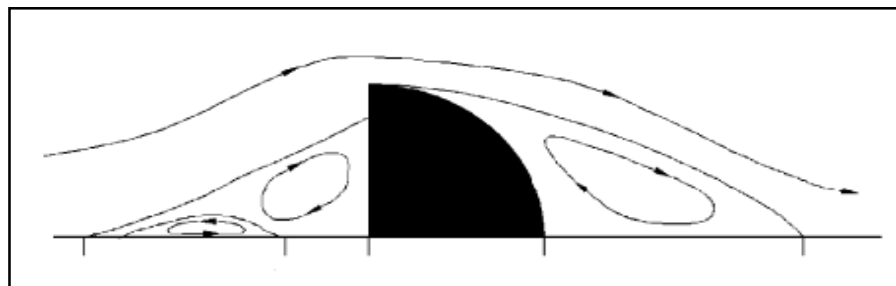


4. ábra. Szarvszerű jéglerakódás áramlás módosítása ( $x/c$ : szárnyszelvény húr hosszával normált hosszúság;  $y/c$ : a szárnyszelvény húr hosszával normált szélesség;  $U/U_\infty$ : a szabad áramlás sebességével normált áramlási sebesség) (Bragg et al., 2005).

Ennél az akkréció típusnál a szarv magassága, helyzete és szöge a meghatározó paraméter.

Az áramvonalas jegesedésnek (streamwise ice) sokkal kisebb az aerodinamikai hatása, de a felszín érdességét nagymértékben növeli, s így nő az ellenállás. Viszont a felhajtó erőre mérsékelt hatása van.

A 'spanwise-ridge' típusú jéglerakódás geometriailag hasonló a szarvszerű alakhoz (5. ábra), azonban másfajta áramlási mezőt hoz létre maga mögött. Akadályt jelent az áramlásnak, és egy turbulens régiót alakít ki az akadály előtt, illetve mögött is.



5. ábra. Áramvonalak a spanwise-ridge típusú jéglerakódásnál (Bragg et al., 2005).

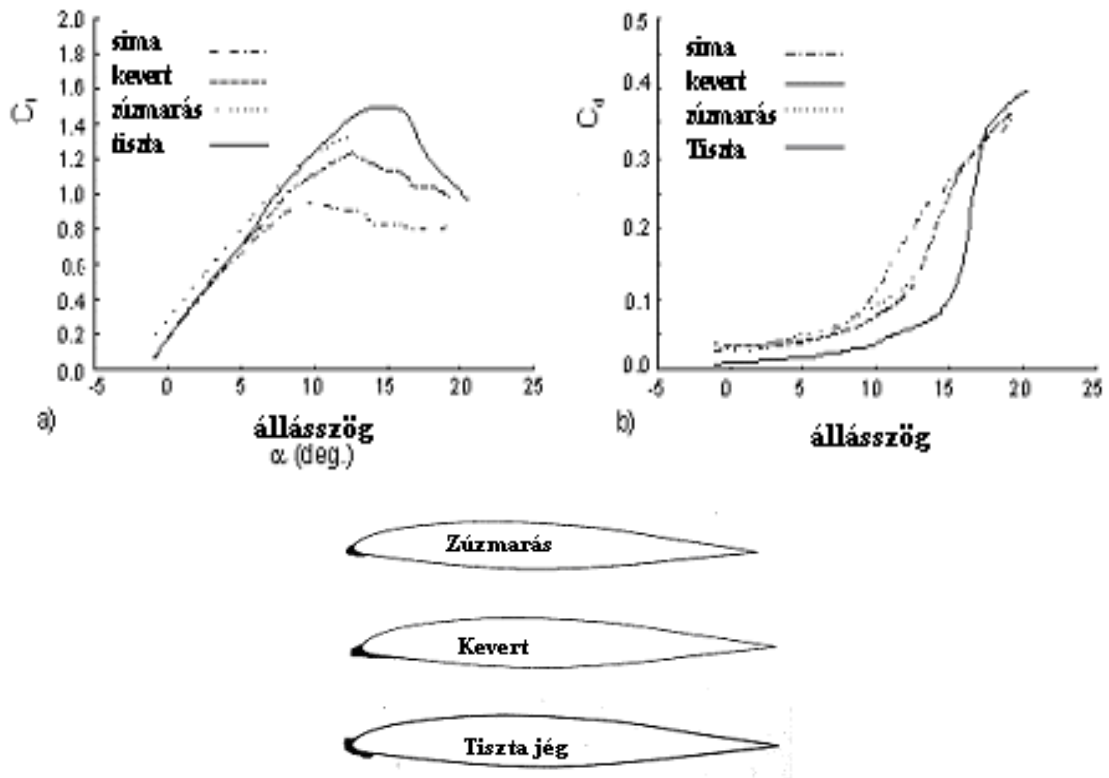
Az említett akkréció alakok külön-külön, de akár együtt is jelentkezhetnek. A repülés minden fázisában előfordulhatnak. Attól függően, hogy a repülőgép mennyi időt tölt a jegesítő zónában, a lerakódott mennyiség súlya is jelentős lehet a repülőgép összsúlyához viszonyítva, így megváltoztatva gép repülési profilját és aerodinamikai tulajdonságait (6. ábra).



6. ábra. A jegesedés repülőgépre gyakorolt hatási.

Az érdesebb felszín miatt növekszik a légellenállás, és a növekvő súly miatt a szükséges tolóerő is. Ezáltal a hajtóművek tartalék tolóereje csökken. A jeges felszín fölött megváltozó áramlás következtében pedig módosul a nyomás eloszlás is, ami a felhajtó erő csökkenését okozza. Így a magasságyerés függőleges összetevője, illetve a csúcsmagasság is csökkeni fog. Ez gazdaságilag is plusz költségeket jelent, mivel az üzemanyag-fogyasztás megnő (Bragg et al., 2000; 2005). Az adott állásszöghöz tartozó felhajtóerő-tényező ( $C_l$ ) a különböző akkréciók megjelenésével folyamatosan csökken, az ellenállási tényező ( $C_d$ ) viszont exponenciálisan növekszik. Minden repülőgépnek van egy maximálisan repülhető állásszöge, amelyhez a legnagyobb felhajtó erő tartozik. Azonban, ha átlépik ezt a kritikus állásszöget, akkor a repülőgép átesik, és a felhajtó erő hirtelen lecsökken. A jéglerakódással a kritikus állásszög is drasztikusan lecsökken (7. ábra).

Ahogy a 6. ábrán is látszik az aerodinamikai mellett egyéb jelenségek is jelentkezhetnek. Ezek közé tartozik a csökkent látástávolság a kabinablakra lerakódott jég miatt, az antennák jegesedése révén a kommunikációs rendszer teljes vagy részleges megbénulása. Az egyes műszerek, kormányfelületek jegesedése miatt fellépő rezonancia, teljesítmény- és határfok csökkenés, valamint hamis mérési adatok szolgáltatása egyszerre jelent problémát a pilótának.



7. ábra. A különböző állásszögekhez tartozó a) felhajtóerő tényezők ( $C_l$ ) és b) ellenállási tényezők ( $C_d$ ) értékei (<http://extice.cira.it/project/proposal-summary>).

### 2.3. Repülőgépen kialakuló jéglerakódás keletkezésének feltételei

A repülőgép jegesedése számos meteorológiai, aerodinamikai és geometriai (alaki) paramétertől függ. A meteorológiai paraméterek közé tartozik a környező levegő hőmérséklete és nedvessége, a folyékony víztartalom, a túlhűlt cseppek koncentrációja, méret szerinti eloszlása (átlagos cseppátmérő) és a felhőben lévő jégkristályok mennyisége. Az aerodinamikai tényezőknél kell megemlíteni a repülőgép sebességét (Mach-számát) és felületi hőmérsékletét, míg a geometriai viszonyokat estünkben a repülőgép mérete, anyaga, érdessége és görbületi viszonyai jellemzik (Gent et al., 2005).

### **2.3.1. Jegesedést befolyásoló meteorológiai tényezők**

#### **1. Az áramló levegő hőmérséklete (környezeti hőmérséklet)**

Felhőben repülve – ha a hőmérséklet 0 °C alatt van – a repülőgép a levegőben lebegő (eső) túlhűlt vízcseppekkel ütközik, amelyek az ütközés hatására az áramlásnak kitett felületeken megfagynak. A környező levegő hőmérsékletének nem szükséges feltétlenül fagypont alatt lenni, hogy a jégbevonat megjelenjen. Ha a levegő hőmérséklete fagypont feletti, akkor a jég megjelenése a repülőgép felületi hőmérsékletétől függ (ritkán előforduló eset!) (Cober *et al.*, 2001; Gent *et al.*, 2000; Sándor és Wantuch, 2005).

#### **2. Folyékony víztartalom (LWC – liquid water content)**

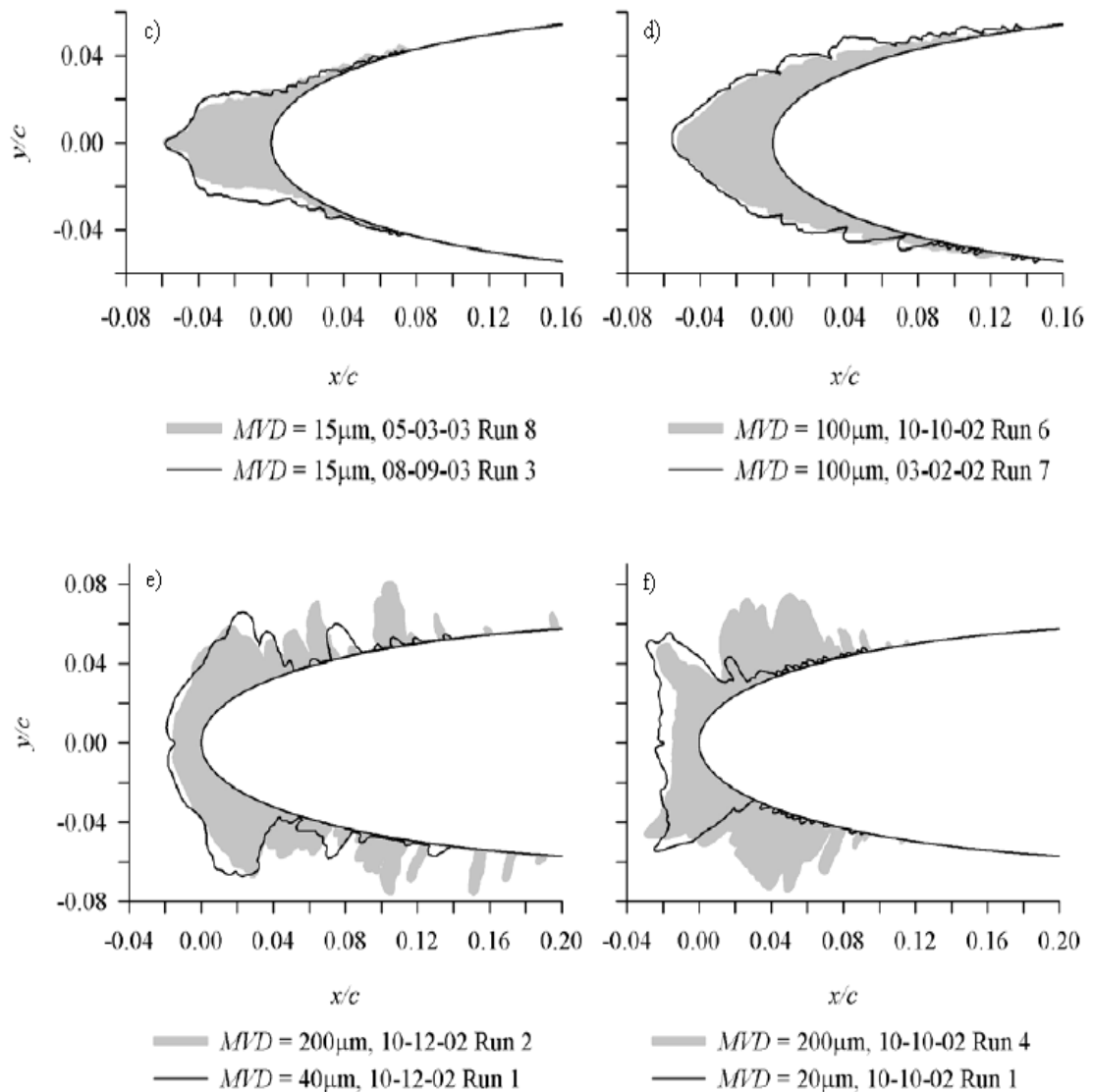
Az LWC jelentős mértékben meghatározza az akkréció típusát és mértékét. Nagy értékeinél a becsapódó cseppek fagyásánál felszabaduló látens hő is nagyobb, ami megemeli a cseppek felfogó felszín hőmérsékletét. Ennek következtében megjelenik a felszínen az áramlás irányába mozgó vízfilm (runback water), ami elősegíti a tiszta (üvegszerű) jéglerakódást a szárny, áramlásnak kevésbé kitett részein is (clear ice). Alacsony LWC és alacsony felszíni hőmérséklet esetén zúzmarás jégbevonat képződik. Másfelől, az LWC érték alapvetően befolyásolja a túlhűlt vízcseppek fluxusát is, ami a jegesedés intenzitását módosítja (Gent *et al.*, 2000; Launiainen and Lyyra, 1986a; Launiainen and Lyyra, 1986b; Cober *et al.*, 2001).

#### **3. Cseppek mérete (MVD – Median Volume Diameter)**

A vízcseppek tömege arányos az átmérőjük köbével. Minél nagyobb méretű egy csepp (az átmérő négyzetével arányos ellenállás) annál kevésbé van kitéve az áramlás sebességének; ezzel szemben a kis cseppeket az áramlat magával viszi. A cseppek spektrumának jellemzésére vezették be az MVD értékét, ami egy olyan átmérőt jelöl, amelynél kisebb illetve nagyobb átmérővel a vízcseppek mennyiségének fele-fele rendelkezik. A felhőben levő felhőcseppek méret szerinti eloszlását legjobban a  $\Gamma$ -eloszlás adja meg (Geresdi, 2004). A környezet hőmérsékletének csökkenésével a túlhűlt vízcseppek átmérője is csökkenni fog. Ez azt jelenti például, hogy 1 mm átmérőjű túlhűlt cseppek már nem lesznek –20 °C-os levegőben. A modellekben az ütközési

hatékonyságot az MVD értékből és az említett eloszlásból számítják (Tsao and Anderson, 2005; Gent et.al., 2000).

Több kísérletet is végeztek, amelyek során megmutatták, hogy különböző MVD értékek esetén a jéglerakódás alakja nagyon változatos lehet. A 8. ábrán látható alakok az I. Függelékben megadott meteorológiai és aerodinamikai feltételek mellett alakultak ki (Tsao and Anderson, 2005).



**8. ábra. Jéglerakódás néhány jellegzetes alakja**  
(MVD: átlagos cseppátmérő;  $y/c$ : szárnyszelvény húrhosszával normált szélesség;  
 $x/c$ : szárnyszelvény hosszúságával normált hosszúság) (Tsao and Anderson, 2005).

## **2.3.2. Jegesedést befolyásoló aerodinamikai tényezők**

### ***1. Repülőgép sebessége***

Állandó felhőcsepp-eloszlást feltételezve, minél nagyobb a repülőgép sebessége, annál több felhőcsepp (esetleg vízcsepp is) fog a felszínnek ütközni, azaz megnő az ütközési hatékonyság (collision efficiency), s ezzel együtt a jegesedés intenzitása. Nagyobb sebességek esetén – a tehetetlenségi erő növekedésével – a kisebb cseppek is becsapódnak a felszínbe. Egy bizonyos kritikus sebességi érték fölött azonban megáll a jegesedés intenzitásának a növekedése, és akár a jégbevonat vastagságának a csökkenését is tapasztalhatjuk. Ez azzal indokolható, hogy a felszín a levegő részecskéivel való súrlódás illetve ütközés hatására felmelegszik. Hozzáadódik még ehhez, a levegő nagyobb sebességek melletti adiabatikus összenyomódásából származó felmelegedése is. A levegő összenyomhatósága, mintegy 100 m/s áramlási sebességig 5% alatt marad, így az alacsony sebességű tartományokban ez a hatás elhanyagolható (Anderson, 2001).

### ***2. Repülőgép felszínének hőmérséklete***

A környezet hőmérsékleténél már említettem, hogy a jegesedés mértéke nagymértékben függ a felszíni hőmérséklettől. A két hőmérsékleti érték függvényében 4 esetet különböztethetünk meg (Sándor és Wantuch, 2005).

Az első esetben a környezet és a felszín hőmérséklete is pozitív (maximum 1–2 °C). Ilyen feltételek mellett csak akkor következhet be jegesedés, ha a gép telítetlen levegőben halad, mert akkor a gép felszínéről még lehet párolgás, ami hőmérséklet csökkenést okoz. Másik lehetőség az, amikor a környezet hőmérséklete pozitív, a felszíné pedig negatív. Ez úgy lehetséges, hogy a repülőgép nagy magasságból gyorsan süllyed a melegebb, 1–2 °C-os alsóbb rétegekbe. Amennyiben a környezet hőmérséklete negatív, akkor attól függetlenül, hogy a gép felszíni hőmérséklete negatív vagy pozitív, jégképződésre lehet számítani, mivel a gép felszíne gyorsan felveszi a környezet hőmérsékletét.

### ***3. Repülési magasság***

Ez a paraméter indirekt és egyben komplex módon befolyásolja a jégakkréción mértékét, így a repülőgép teljesítményét. A levegő hőmérséklete, a légnyomás, a

nedvességi karakterisztikák és a felhőzet eltérő módon változnak a magassággal, de egyidejűleg hatnak a jegesedés mértékére, annak jellegére. *Roach et. al.* (1984) szerint a jegesedést előidéző tényezők a 3000 – 5000 ft (1000 – 1700 m) magasságon a legerősebbek, ami nem meglepő, hiszen ebben a tartományban gyakran előfordul a fagypont alatti hőmérséklet a felhőkben, és még a magassággal csökkenő nedvességből is elegendő mennyiségű felhőcsepp keletkezhet.

### **2.3.3. Jegesedést befolyásoló geometriai tényezők**

Ez a repülőgépre jellemző – a gyakorlatban jó közelítéssel állandónak tekinthető – tulajdonság erősen befolyásolja a jegesedés mértékét, hiszen minél jobban görbül (minél áramvonalasabb) a felület, annál magasabb lesz az ütközési hatékonyság. Így erősebb jegesedésre lehet számítani ugyanazon környezeti körülmények között. Ebből adódóan a kisebb méretű repülőgépek általában nagyobb görbületű belépő élei sokkal érzékenyebbek a jegesedésre, mint például a nagy szállítógépeké.

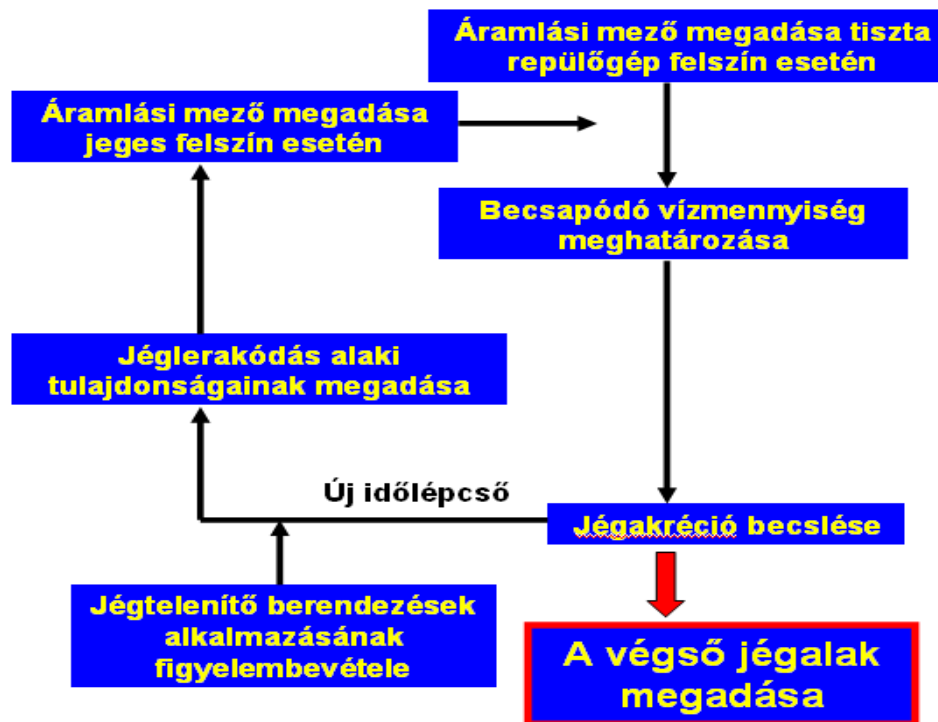
### **2.4. A felületi jegesedés modellezéséről**

A repülés biztonságosabbá tételéhez szükséges mind a jegesedés intenzitásának, mind a jégbevonat geometriájának (alakjának) a modellezése. Már az 1950-es években megadták az első formulákat a jegesedés becslésére. Azóta egyre finomabb és pontosabb modellek fejlődtek ki, de még napjainkban is folyamatos a fejlesztés (pl.: *Lozowski et al.*, 1983a; *Makkonen*, 1981; *Myers and Hammond*, 1999).

Eleinte a repülőgép szárnyprofilját egy megfelelő átmérőjű hengerrel helyettesítették, ami vagy mozdulatlan volt vagy forgó. Ludlam 1951-ben adta meg az első formulát a forgó henger jegesedésére. Ezt követte – a még napjainkban is használt – *Messinger* (1953) által kidolgozott klasszikus jégakkréciós modell. Azt feltételezte, hogy a jegesedés mértéke a hőáramok egyensúlyával vezérelt (energiaháztartási modell). Feltételezése szigorúan véve a stagnációs pontra vonatkozik, de figyelembe veszi a „runback”-jellegű víz létét is. A *Messinger*-féle közelítést korszerűsítette *Consdale* és *Gent* (1983), akik már beépítették a levegő kompresszibilitását is a modelljükbe, így nagyobb sebesség melletti jegesedés vizsgálatára is mód nyílt (*Gent*, 1987, 1995). A közelítések pontosításával, a technika fejlődésével lehetőség nyílt arra is, hogy a henger helyett már valódi szárny esetére vizsgálják a jéglerakódás



mértékét és alakját, szélcsatornás kísérletekkel is alátámasztva, akár 3 dimenzióban is (Myers and Hammond, 1999; Tsao and Anderson, 2005).



9. ábra. A jégakkumuláció becslése  
(<http://extice.cira.it/project/proposal-summary>).

A jégakréció modellezésének fejlődésével párhuzamosan megjelentek, a jéggel borított szárny aerodinamikáját vizsgáló komplex tanulmányok (Bragg *et al.*, 2005), és a konkrét géptípusokhoz kapcsolt, a jegesedés intenzitására vonatkozó veszélyességi küszöbértékek megadását bemutató kutatások (Fuchs, 2003). A modellszámítások eredményeinek verifikálása érdekében gyakori, hogy kutató repülőgépeket küldenek a jéglerakódás mértékének detektálására a túlhűlt folyékony és kevert fázisú felhőkbe. Ilyen vizsgálatoknál a repülőgépre telepített jegesedést vizsgáló rendszereket használnak. Ezek közé tartozik például a RICE (Rosemount Icing Detector), amely működése azon alapszik, hogy a jéglerakódás hatására rezgő henger természetes frekvenciájában történő változásokat detektálja (pl. Mazin *et al.*, 2001).

Természetesen a valós körülmények közötti repülések során tapasztalt jégfelhalmozódások pontosabb becsléséhez nemcsak a jégakkumulációs modellek fejlesztése, hanem az azokat „meghajtó” (input) meteorológiai változók becslésének javulása is szükséges. Különösen nagy jelentősége van a mezo-léptékű modellezés

fejlődésének és a felhőfizikai ismeretanyag bővülésének (*Rasmussen et al.*, 2002; *Geresdi*, 2004).

A jéglerakódás általános modellezése 3 fő lépésből áll (az áramlási mező megadása a tiszta felszín esetén; a becsapódó víz mennyiségének meghatározása (+ termodinamikai analízis) és a jégakkréció becslése). A folyamatot a 9. ábra szemlélteti. Attól függően, hogy milyen hosszú időintervallumra szeretnénk a jégakkréciót megadni, lehetőség van a modellek többszöri lefuttatására.

#### **2.4.1. Egy egyszerű jégakkumulációs modell - fűtetlen nem forgó henger jegesedésének modellezése**

Vizsgálatainkban *Lozowski* (1983) széleskörben használt (*Lozowski et al.*, 1983a) jégakkumulációs modelljét alkalmazzuk, így a következőkben ezt ismertetjük részletesebben. A modell egyenletes  $U$  sebességű áramlásba helyezett  $D$  átmérőjű nem fűtött és nem-forgó hengerrel reprezentálja a repülőgép szárnyprofilját, és az adott környezeti és aerodinamikai feltételek mellett az erre kirakódó jégbevonat viselkedését írja le. Az áramló levegő egy adott méret spektrumba tartozó túlhűlt vízcseppeket tartalmaz, amelyeknek a hőmérséklete ( $t_a$ ) megegyezik a környezetükben lévő levegő hőmérsékletével (termodinamikai egyensúly), sebességük pedig megegyezik az áramló levegő sebességével. Az akkumulálódó jégbevonat számítása 3 részre osztható:

- Elsőként meg kell határozni a felhőcsepp-méret spektrumra vonatkozó összesített ütközési hatékonyságot a henger felületére vonatkozóan, ez kijelöli az adott pontban a beérkező felhőcseppek azon részét, amely nekiütközik a felületnek (*Finstad et al.*, 1988; *Makkonen et al.*, 1987).
- Ezután a henger, áramlással szembeni oldalára beérkező túlhűlt víz fluxusának hatását kell megállapítani, majd meg kell oldani ezen felszínre vonatkozó energiaegyensúlyi-egyenletet, amelyből megkapjuk a jegesedő felszín hőmérsékletét és az ütköző túlhűlt felhőcseppek jégbevonatot képző és elfolyó részének (nedves jegesedés) az arányát.
- Végül az adott időtartamra vonatkozóan becsüljük a jéglerakódás mértékét (intenzitását) a henger felületén, s ennek segítségével képet kaphatunk a lerakódott jég mennyiségéről és alakjáról.

A modellezési munka elején el kell végezni néhány lépést, amely egyszerűsíti, diszkrétizálja a feladatot, hiszen az energiaegyensúlyi-egyenlet (differenciál-egyenlet)

csak numerikusan oldható meg. Elsőként a henger, áramlással szembeni oldalát  $5^\circ$ -os szélességű cikkekre osztjuk fel, melyek középpontjai a  $\theta = 5 i^\circ$ , ahol  $i = 0, 1, 2, \dots, 18$ . A részecskék méret spektrumát 9 kategóriára osztjuk,  $5 \mu\text{m}$ -es a bontásban. A középponti átmérő:  $D_j = 5 j \mu\text{m}$ , ahol  $j = 1, \dots, 9$ . A  $45 \mu\text{m}$ -nél nagyobb átmérővel rendelkező cseppeket – *Lozowski* (1983) vizsgálatához hasonlóan – nem vesszük figyelembe, mert az adott cseppméret eloszlásból adódóan, a  $45 \mu\text{m}$ -nél nagyobb átmérőjű cseppek gyakorisága, lényegében zérónak tekinthető. Természetesen e méretkategóriák megváltoztathatók, annak függvényében, hogy a jegesedés szempontjából fontos réteges felhőzetben milyen méretű cseppek vannak jelen. A diszkrétizációk után elsőként minden szektorra és mérettartományra meg kell adni az ütközési hatékonyságot és a folyékony víztartalom tömegáramát.

$$\beta_i = \beta(\theta_i) = \sum_j f_j \beta_{ij} , \quad (1)$$

$$R_{wi} = \beta_i U w , \quad (2)$$

ahol:  $\beta_i$  az ütközési hatékonyság,  $R_{wi}$  a folyékony víztartalom tömegárama,  $\theta_i$  az adott henger  $i$ -edik cikkének középpontja,  $U$  az áramlási sebesség,  $f_i$  a teljes víztömeg áram  $i$ -edik cikkekre eső hányada,  $w$  pedig a folyékony víztartalom.

A jég akkréció becslésének második szakasza az energiaegyensúlyi egyenlet megoldása (*Messinger*, 1953).

$$q_c + q_e + q_v + q_k + q_f + q_w + q_i + q_r + q_w^* + q_f^* = 0 , \quad (3)$$

ahol:

$q_c$ : a szenzibilis hőáram az akkréciós felszín és a légáramlás között (kondukción és konvekción),

$q_e$ : párolgásból származó latens hőáram,

$q_v$ : a belső súrlódásból és adiabatikus összenyomódásból származó hőáram,

$q_k$ : a becsapódó vízcseppek kinetikus energiájának hővé történő átalakulásából származó hőáram,

$q_f$ : a közvetlenül becsapódó cseppek fagyása miatt felszabaduló látens hő,

$q_w$ : a megfagyó vízcseppek melegítésére szolgáló szenzibilis hőáram,

$q_i$ : az jégakkréció és az alatta lévő felszín közötti hőáram (hővezetés),

$q_r$ : az akkréció és a környezet közötti hosszú hullámú sugárzási hőáram,

$q_w^*$ : a felszíni vízfilm melegítésére szolgáló szenzibilis hőáram (runback water),

$q_f^*$  : tovább folyó cseppek fagyása miatt felszabaduló látens hő.

Ha a különböző hőáram tagok hőt biztosítanak a lerakódás során, akkor pozitív értékűek, ha hőt vonnak el, akkor negatívak. A fenti (3) egyenlet minden szektorra vonatkozik, és figyelembe veszi az esetlegesen megjelenő és tovább folyó vizet is (vízfilm) (két \*-gal jelzet tagba van beépítve a vízfilm). Azonban ezt csak addig lehet figyelembe venni, amíg el nem éri  $\theta$  értéke a  $90^\circ$ -ot, utána azt feltételezzük, hogy a víz a légáramlással elsodródik a felszínről. Természetesen meg kell becsülni a mérlegegyenletben szereplő áramokat, és ha lehetséges, akkor egyszerűbb formára kell hozni (az egyes tagok elhanyagolásával) a (3) egyenletet (Lozowski and d'Amours, 1980; Makkonen, 1981).

Nézzük az egyes tagokat! A  $q_c$  szenzibilis hőáram a környezet és az akkréciós felszín hőmérsékletétől, valamint egy hőszállítási koefficiensstől függ.

$$q_c = h(t_a - t_s), \quad (4)$$

ahol:  $t_a$  és  $t_s$  az áramló levegő és az akkréciós felszín hőmérséklete,  $h$  a hőszállítási koefficiens, amit a következő formulából lehet kiszámítani:

$$h = \frac{k_a Nu}{D_c}, \quad (5)$$

ahol:  $k_a$  a légáram termális konduktivitása,  $Nu$  a Nusselt-szám, míg  $D_c$  a görbületi sugár. A Nusselt-számot Achenbach (1977) által megadott összefüggések alapján számítjuk. Sima felszín esetén:

$$Nu(\theta) = Re_c^{0,5} \left[ 1 - \left( \frac{2\theta}{\pi} \right)^3 \right]. \quad (6)$$

Érdes felszín estén:

$$Nu(\theta) = Re_c^{0,5} \{ 2,4 + 1,2 \sin[3,6(\theta - 0,44)] \}, \quad (7)$$

ahol:  $Re$  a henger körüli áramlásra jellemző Reynolds-szám. Érdemes megemlíteni, hogy a Nusselt-szám maximuma  $\theta = 0^\circ$ -ban van a sima felszín esetén és  $50^\circ$ -ban érdes felszínnél.

A szenzibilis hőáramhoz hasonlóan becsülhető a  $q_e$  latens (itt evaporációs) hőáram. A számításokban a nedves levegő telítési gőznyomását használjuk.

$$q_e = h \left( \frac{Pr}{Sc} \right)^{0,63} \frac{\varepsilon l_v}{pc_p} (e_a - e_s), \quad (8)$$

ahol:  $Pr$  a Prandtl-szám,  $Sc$  a Schmidt-szám,  $\varepsilon$  a vízgőz és száraz levegő molekulaszáraz aránya,  $p$  a statikus nyomás az áramlásban,  $c_p$  a levegő állandó nyomáson vett fajhője,  $e_a$ ,  $e_s$  a telítési gőznyomás  $t_a$  és  $t_s$  hőmérsékleten,  $l_v$  a párolgási hő [J/kg].

A  $q_v$  aerodinamikai melegedés okozta hőáram a következő formulával becsülhető:

$$q_v = \frac{hr_c U^2}{2c_p}, \quad (9)$$

ahol:  $r_c$  egy hengerre jellemző faktor, ami csak a  $\theta$  szögtől függ:

$$r_c = 0,75 + 0,25 \cos 2\theta.$$

A  $q_v$  tag figyelembe veszi a levegő kompressziójából származó adiabatikus melegedést (adiabatic heating) és a határrétegben lévő súrlódásból származó melegedést (viscous heating) egyaránt. Nagy sebességgel történő repülésnél ez a tag különösen fontos lehet. Az (3) egyenlet harmadik tagja, a csepp kinetikus energiájának hővé alakulásából származó tag ( $q_k$ ), ami a következő formulával számolható:

$$q_k = \frac{1}{2} R_w U^2, \quad (10)$$

ahol:  $R_w$  a részecskék tömegárama. A modellben feltételezzük, hogy a részecskék az áramlás sebességével csapódnak be, valamint az összes kinetikus energia hővé alakul.

A következő komponens a víz fagyása során felszabaduló látens hő ( $q_f$ ). Ennek a nagysága attól függ, hogy a becsapódott víz, hányad része fagy meg:

$$q_f = R_w l_{fs} n, \quad (11)$$

ahol:  $l_{fs}$  a  $t_s$  hőmérsékleten történő fagyás által felszabadított látens hő, míg  $n$  a megfagyott és az összes becsapódó víz aránya.

A szenzibilis hőáram a becsapódó cseppek és a már felszínen jelen lévő jégbevonat között ( $q_w$ ) hasonlóan a  $q_c$ -hez, a környezet és a felszín hőmérsékletétől függ:

$$q_w = R_w \overline{c_w} (t_a - t_s), \quad (12)$$

ahol:  $\overline{c_w}$  a víz átlagos fajhője a  $t_a$  és  $t_s$  közötti hőmérséklet tartományban.

A többi taghoz képest kisebb jelentőséggel bíró  $q_i$  és  $q_r$  tagot általában elhanyagolják, így azokra nem adok külön becslést.

*Lozowski* (1983a) jégakkumulációs becslésénél figyelembe vette a becsapódó, de azonnal nem megfagyó vizet is (runback water). Ez a víz, hatással van annak a szektornak a termodinamikájára, ahova belép. Azonban, ha ezt a szektort elhagyja, anélkül, hogy megfagyna, akkor ezt a hatást figyelmen kívül hagyjuk.

Az első ilyen elfolyó (runback) vízre vonatkozó tag, az a szenzibilis hőáram, ami a becsapódó cseppek és a már felszínen jelen lévő jéglerakódás között alakul ki.

$$q_w^* = R_w^* \overline{c_w} (t_s^* - t_s), \quad (13)$$

ahol  $R_w^*$  az adott szektorban a belépő víz tömegárama,  $t_s^*$  a belépő víz hőmérséklete. A fenti (13) egyenlet egyensúlyi állapotra vonatkozik, így az azonnal nem megfagyó (runback) víz létezésének feltétele, hogy  $t_s^* = 0$  °C. A képletben szereplő  $R_w^*$  pedig a következőképpen adható meg:

$$R_w^*(\theta_i) = (1 - n_{i-1})[R_w(\theta_{i-1}) + R_w^*(\theta_{i-1})]. \quad (14)$$

Ez mindenütt igaz, kivéve az első és második szektort, mivel az első szektorban nincs nem megfagyó (runback) víz. A második szektor esetén pedig számolni kell azzal, hogy az első szektorból a (runback) víz fele lefelé a másik fele fölfelé folyik tovább.

Utolsóként a tovább folyó cseppek fagyása miatt felszabaduló látens hőt ( $q_f^*$ ) becsüljük abban a szektorban, ahol a fagyás bekövetkezik:

$$q_f^* = R_w^* l_{fs} n. \quad (15)$$

Ha a fenti hőáram becsléseket beírjuk a kiindulási (3) összefüggésbe, akkor egy nem lineáris differenciál-egyenlethez jutunk, amelynek csak numerikus megoldása létezik. A két ismeretlen:  $t_s$  és  $n$ .

Adott kezdeti feltételek melletti numerikus megoldás végrehajtása után már elkezdhetjük a jégakkrécio mértékének és alakjának konkrét becslését.

Elsőként a jegesedési fluxust  $R_i$ -t kell kiszámítani az egyes szektorokra a következő összefüggés segítségével:

$$R_i = n_i(R_{wi} + R_{wi}^*). \quad (16)$$

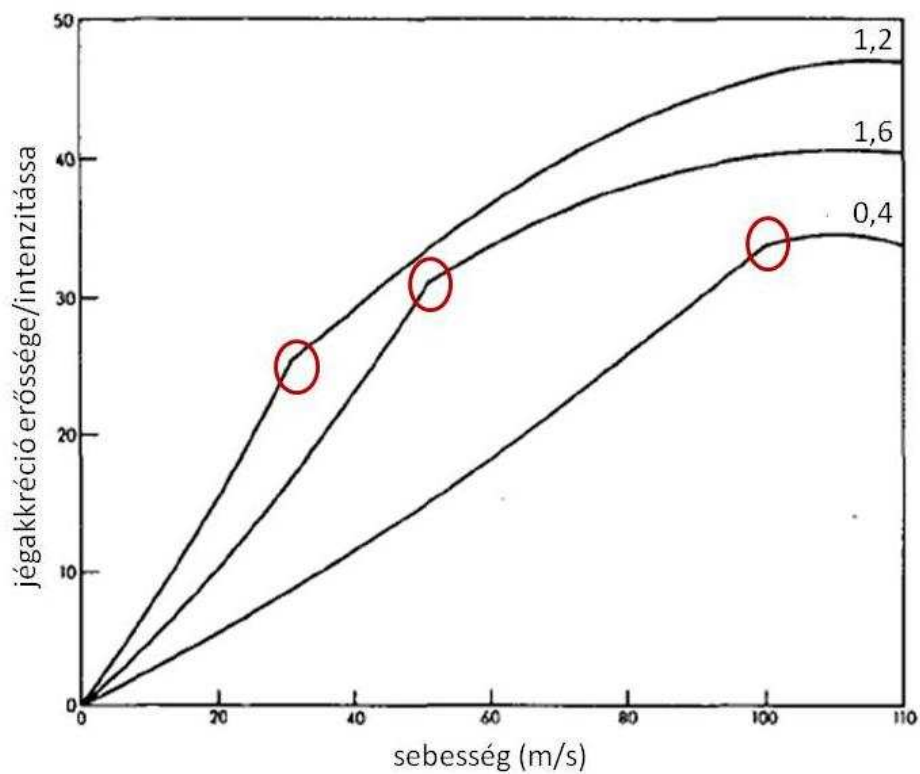
Az  $R_i$  jegesedési fluxus és a jég sűrűség ( $\rho_I$ ) ismeretében már meg tudjuk adni tetszőleges  $\delta t$  időre a lerakódás lokális, szektoronkénti vastagságát ( $h_i$ ). Az összefüggés felírásakor feltételezzük, hogy az  $R_i$  jegesedési fluxus (intenzitás) valamint a felület alakja  $\delta t$  idő alatt szignifikánsan nem változik.

$$h_i = \frac{2R_i\delta t/\rho_I}{1 + \left(1 + \frac{4R_i\delta t}{\rho_I D_c}\right)^{0,5}}. \quad (17)$$

Az időintervallumnak kellően kicsinek kell lennie, hogy az áramlásban sem legyen számottevő a változás. A modell numerikus számításait MS Excel környezetben, az általunk előállított táblázat-rendszer segítségével végeztük el.

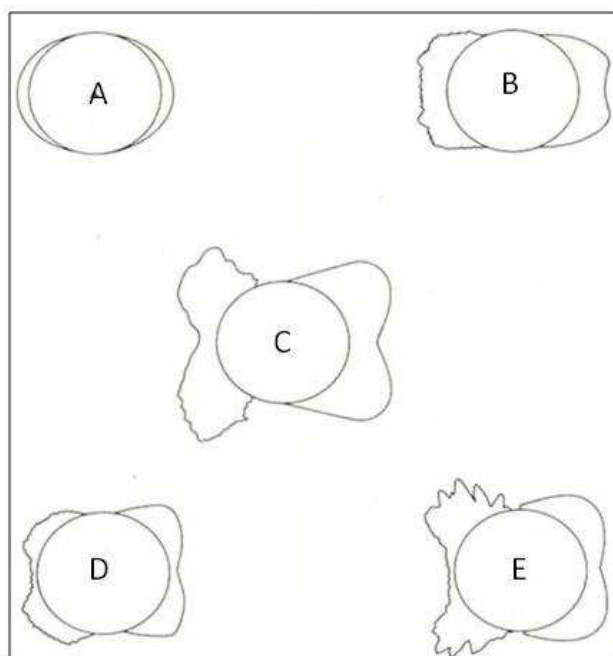
#### **2.4.2. A jégakkumulációs modell alkalmazhatóságáról**

Az előző fejezetben leírt jégakkrecióra vonatkozó becslést alkalmazva *Lozowski* (1983b) néhány konkrét esetre számításokat is végzett. Egy 2,54 cm átmérőjű hengert helyezett az áramlásba, ahol 20  $\mu\text{m}$  *MVD* értékkel rendelkező,  $\Gamma$ -eloszlású vízcseppek voltak. A vizsgálatának az eredményét  $-15$  °C-os léghőmérséklet mellett a *10. ábra* szemlélteti. Az ábrán a görbék törése mutatja, hogy hol van az átmenet a nedves és száraz növekedés között. Száraz növekedés esetén a jéglerakódás intenzitása arányos az áramlási sebességgel, ugyanakkor a folyékony víztartalomtól is jelentősen függ. Ezzel szemben, a nedves növekedés esetében a jégbevonat növekedésének intenzitása csökkenő tendenciát mutat a sebesség növekedésével, sőt egy maximális intenzitásérték után meg is áll a növekedése és csökkenésbe megy át a stagnációs vonalon. Ez a hatás az aerodinamikai és viszkózus melegedésnek valamint a megnövekedett fagyáshőnek köszönhető.



10. ábra. A jéglerakódás növekedésének mértéke a belépő élen, állandó folyékony víztartalomnál ( $0,4 \text{ g/m}^3$ ;  $1,6 \text{ g/m}^3$ ;  $1,2 \text{ g/m}^3$ ).

A jégakkráció alakjára kapott eredményeket a 11. ábra szemlélteti.



11. ábra. A jégakkráció néhány lehetséges alakja.

A 11. ábrán az egyes hengerek bal oldalán egy szélcsatornás kísérlet során kapott jéglerakódás, a jobb oldalán az ugyanazon feltételek mellett a modell által adott



alaki és mennyiségi becslés van ábrázolva. Jól látható, hogy a modell mind a száraz (A,B), mind nedves esetben (C,D,E) jól visszaadja az alaki tulajdonságokat, és akár egy első közelítéses mennyiségi becslésre is alkalmas. Azért csak első közelítésre használható, mert a modell korlátai miatt csak rövid időre lehet az induló tényleges körülményeket változatlanoknak tekinteni. A modell ugyanis nem tudja figyelembe venni a felszín geometriájának megváltozását, és ezzel a bejövő vízcseppek fluxusában (és az ütközési hatékonyságban) történő megváltozást. Az induló jéglerakódás sebessége és jellege azonban elég ahhoz, hogy a kezdeti lerakódás alakjából és mennyiségéből lehessen következtetni a további növekedésre és annak tulajdonságaira.

Összefoglalva elmondhatjuk, hogy a fenti jégakkumulációs modell jól visszaadja a felhalmozódott jég mennyiségét, növekedését és geometriáját, amennyiben az időintervallum nem több mint 5 perc és a környezeti változók értékei az alábbi intervallumban maradnak (*Lozowski et al.*, 1983b):

$$t_a : -5 \text{ és } -15 \text{ } ^\circ\text{C}, U : 30 \text{ és } 122 \text{ m/s}, LWC : 0,38 \text{ és } 1,17 \text{ g/m}^3.$$

A fenti eredmények tükrében, a további számításokban a most bemutatott jégakkumulációs modellt használjuk a repülőgépek felületi jegesedésének becslésére konkrét időjárási helyzetekben, bemutatva a modell operatív alkalmazhatóságát az ismert korlátok figyelembe vételével.

### **3. Alkalmazott módszerek és kapott eredmények bemutatása a jegesedés becslésére**

#### **3.1. A repülési esemény bemutatása**

„2010. március 11-én bejelentés érkezett a Polgári Légügyi Hatósághoz, hogy egy Cessna típusú repülőgép éjszakai VFR szabályok szerint Zwickau-Békéscsaba útvonalon repül, és Magyarország területe felett eltévedt, ezért a Ferihegyi Nemzetközi Repülőtérre 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 jég rétegtől. ... Az esethez

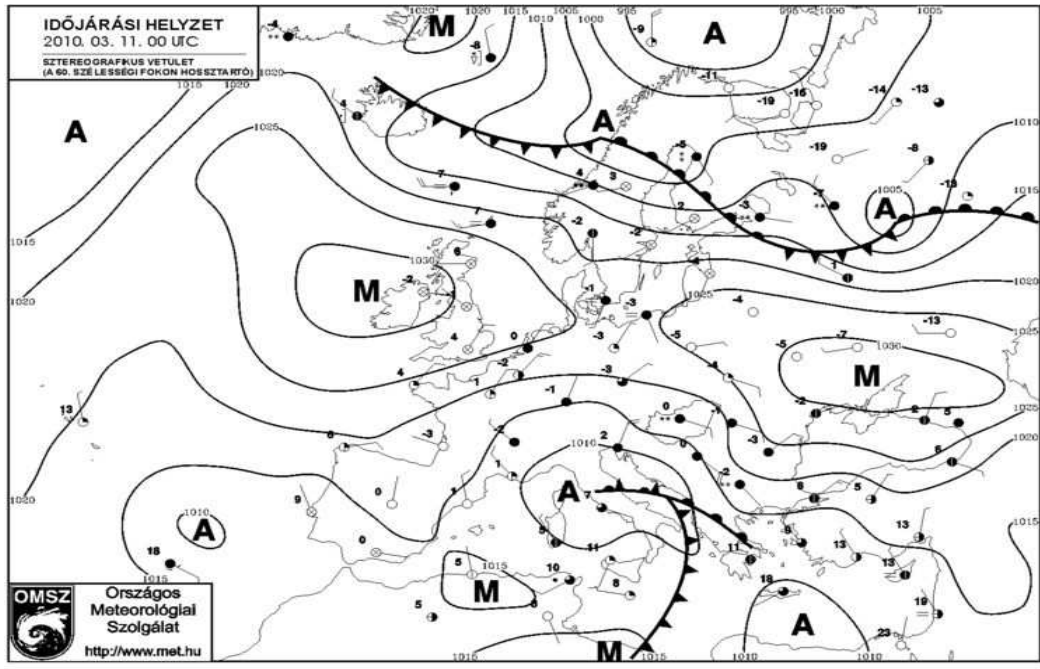
kapcsolódó képek alátámasztják a megállapítást, miszerint életveszélyes helyzet alakult ki” (12. ábra) (Wantuch et al., 2011).



12. ábra. Az esethez kapcsolódó képek (Wantuch et al., 2011).

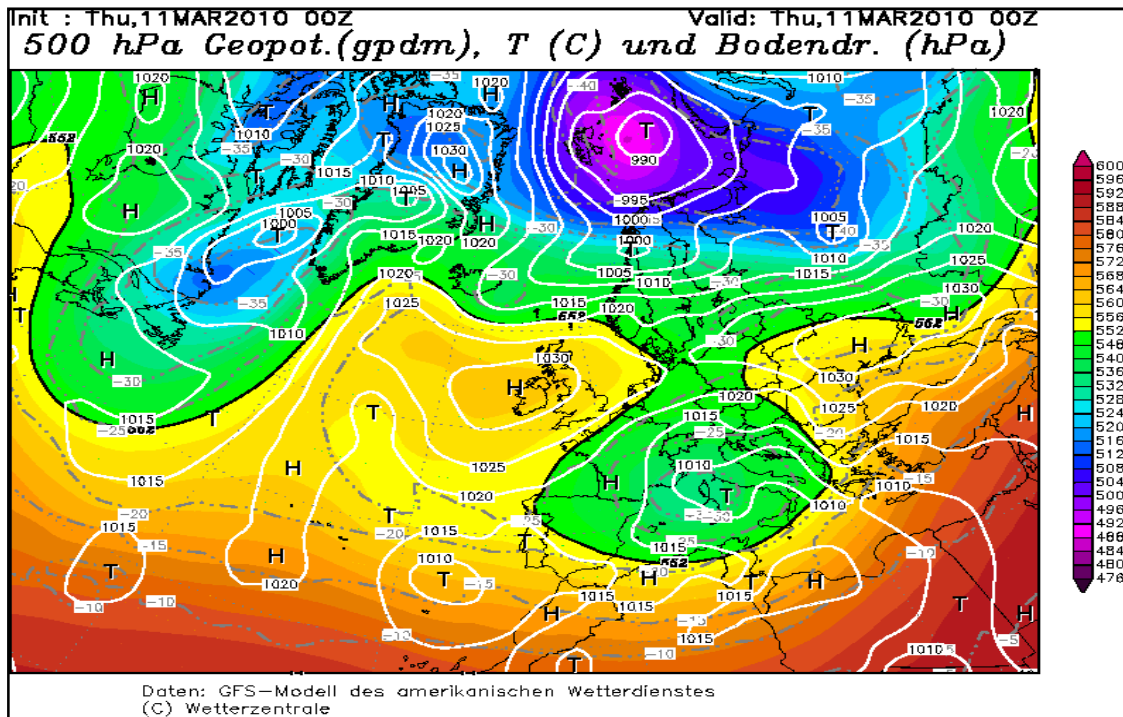
### 3.2. 2010. 03. 11. szinoptikus elemzése

A Brit-szigetektől Közép-Európa északi területein át egészen a Fekete-tengerig anticiklon határozta meg az időjárást. Az anticiklon területén a nagytérségű rendezett leáramlásnak köszönhetően jobbára, napos száraz időjárás volt jellemző. Ugyanakkor Izlandtól egészen az Urál térségéig, valamint Dél-Európa és Közép-Európa déli részein ciklonok és a hozzájuk tartozó frontok okoztak változékony, többfelé csapadékos időjárást (13. ábra).

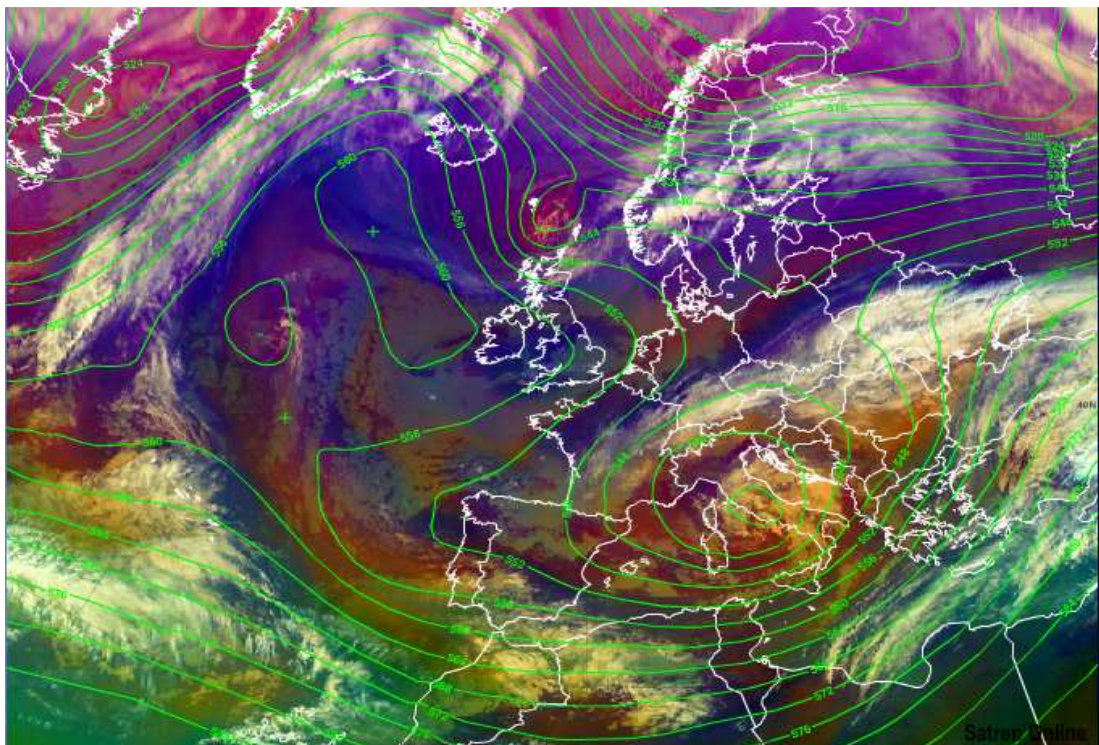


13. ábra. 2010. 03. 11. 00: 00 UTC Európai szinoptikus analízis (<http://www.met.hu/omsz.php>).

Az abszolút topográfiai térképeken (lásd a 14. ábrát is) kirajzolódó nagy hullámhosszú zonálisan meanderező Rossby-hullám csak lassan helyeződik át. Ennek köszönhető, hogy Európa fölött már napok óta egy alacsony geopotenciálú, hideg magassági teknő helyezkedett el, amely egészen Afrika északi partjaiig lenyúlt. A Kárpát-medence 2010. március 11-én e magassági teknő előoldalán helyezkedett el. A teknő mentén az áramlás közel geosztrófikus, ezért az izohipszák alapján lehet következtetni a magassági szél irányára és sebességére, ami ekkor a 15. ábra alapján délkeleti irányú volt, és mérséklet erősségű. A Rossby-hullám mentén kialakuló hőmérséklet és nyomáskülönbségeket csak baroklin folyamatok tudják kiegyenlíteni (ciklon, anticiklon). E képződményeknél már megjelennek a vertikális mozgások. A talajtérkép alapján (13. ábra) megállapíthatók a fel- és leáramlási területek. Az alacsony nyomású központok (ciklon) területén nagytérségű rendezett feláramlás figyelhető meg.



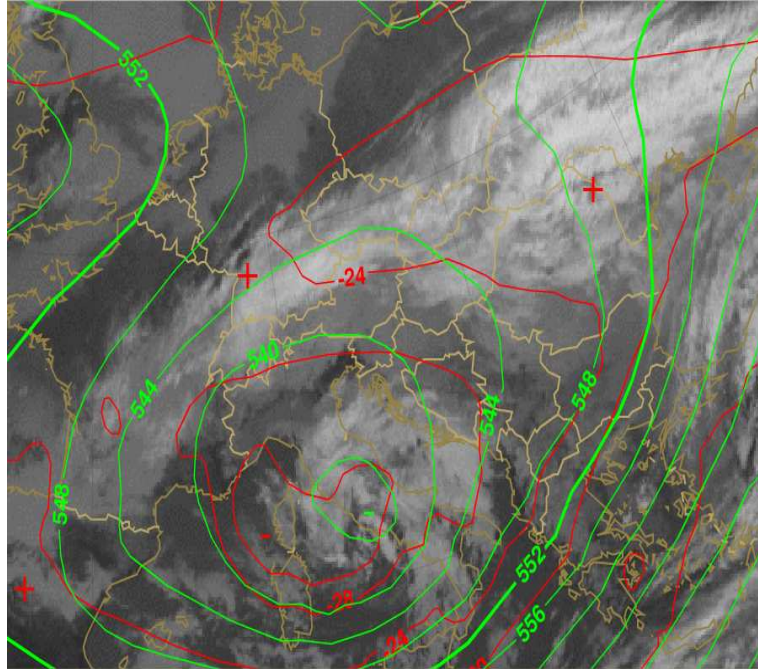
14. ábra. 2010. 03. 11. 00UTC 500 hPa geopotenciál és hőmérsékleti térkép  
 (<http://www.wetterzentrale.de/>).



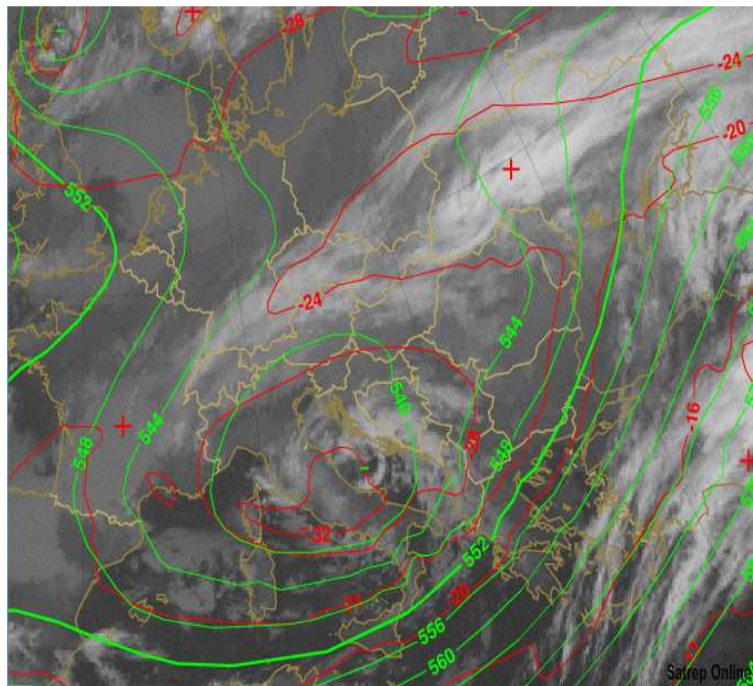
15. ábra. 2010. 03. 11. 12:00 UTC 500 hPa geopotenciál és légtömeg kompozit térkép  
 (<http://www.satraponline.org/index.php?width=1280&height=800>).

Az Atlanti-óceánon néhány nappal 2010. március 11. előtt már kialakult egy mérsékelt övi ciklon, amelynek hidegfrontja az Alpok felett behullámzott, és északnyugat felől

hideg légtömegeket juttatott a Földközi-tenger térségébe, ahol e hideg légtömeg az ott lévő enyhébbel örvényleni kezdett, és a tenger párolgása miatt jelentős mennyiségű nedvességgel töltődött fel.



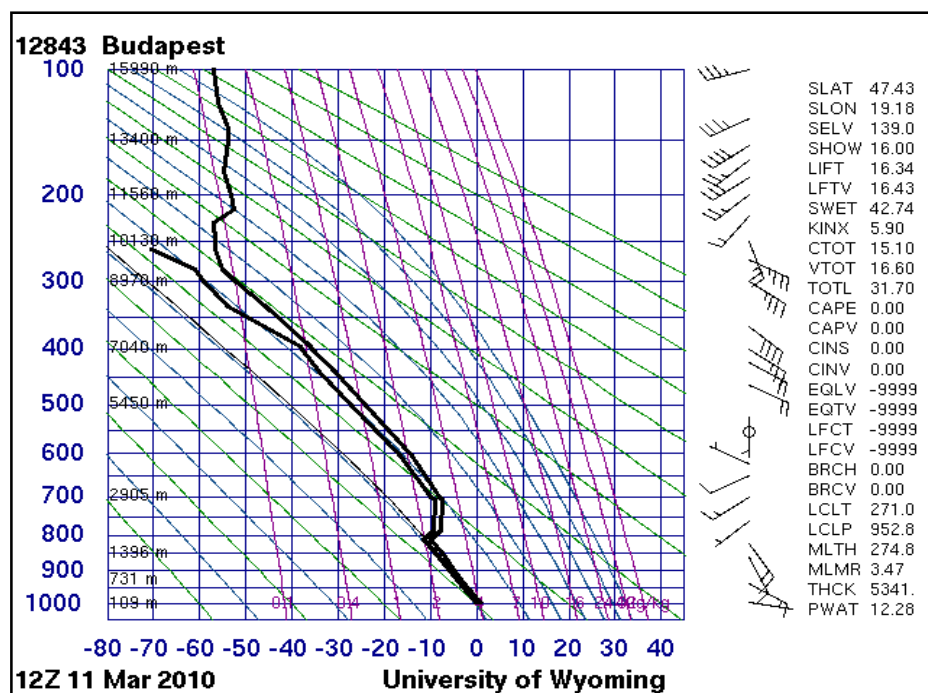
16. ábra. 2010. 03. 11. 12:00 UTC IR10.8 műholdkép; 500 hPa geopotenciális magassága (zöld) és az 500 hPa-os szint hőmérséklete (piros) (<http://www.satreponline.org/index.php?width=1280&height=800>).



17. ábra. 2010. 03. 11. 18:00 UTC IR10.8 műhold kép; 500 hPa szint geopotenciális magassága (zöld) és az 500 hPa-os szint hőmérséklete (piros) (<http://www.satreponline.org/index.php?width=1280&height=800>).

Az így kialakult mélyülő mediterrán ciklon március 10-én (szerdán) megközelítette és az esti órákban el is érte hazánk délnyugati részét. 2010. március 11-én (csütörtökön) Magyarország időjárását alapvetően az éjszaka során megérkező mediterrán ciklon alakította, amely délnyugat felől észak, északkeleti irányba haladt. A ciklon középpontja a délelőtti órákban még Észak-Olaszország fölött helyezkedett el, azonban a délutáni, esti már az ország fölé ért. A 16. és a 17. ábrán is jól látszik, hogy az izohipszák és az izotermák metszik egymást, hiszen a magassági az áramlással meleg levegő advektálódott fölének a 700 hPa-os rétegben, előidézve egy frontális inverziót (18. ábra, budapesti rádiószondás felszállás). Az ábrákból következik, hogy az ország fölött húzódott egy front.

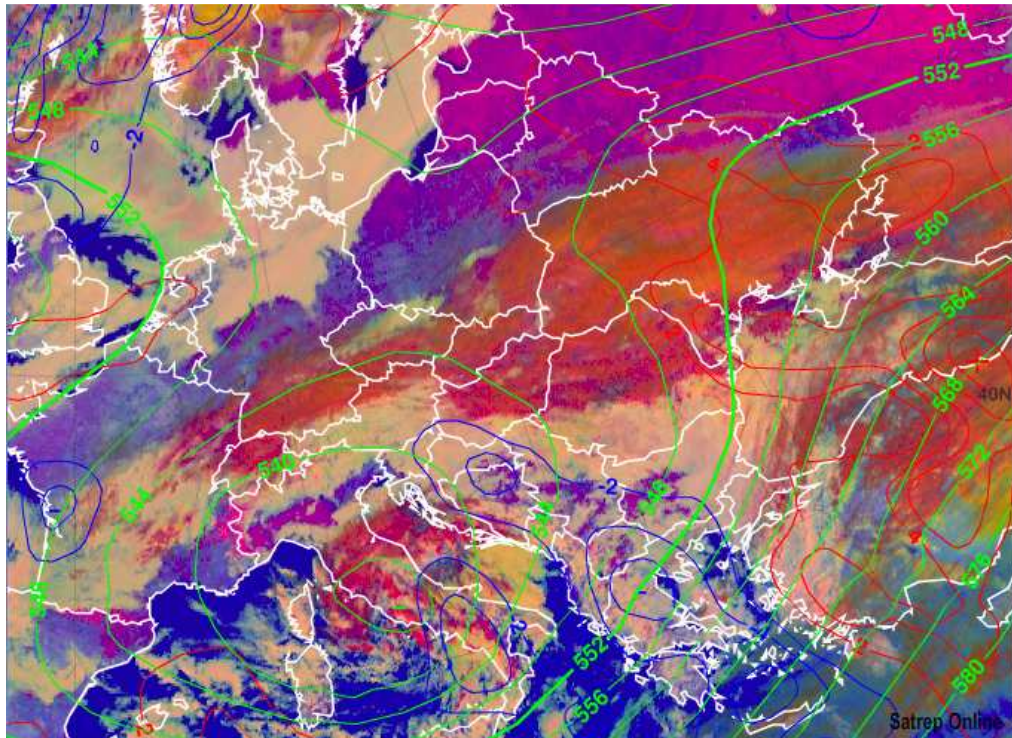
A műholdképen is megmutatkozik, hogy e fronthoz széles felhősáv tartozik (19. ábra). A felszállási görbe hőmérséklet és harmatpont görbéje együtt fut, azaz kicsi a harmatpont-depresszió. Így az is megállapítható, hogy ez a felhőzet vastag lehetett.



18. ábra. 2010. 03. 11. 12:00 UTC Budapesti rádiószondás mérés (<http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>).

Ennek köszönhetően napközben borult, hideg idő volt, a felszínen fagypont körüli hőmérséklettel mind a keleti, mind a nyugati országrészben. A vastag felhőzet miatt alig változott a hőmérséklet a nap folyamán (II. Függelék).

Eleinte az ország egész területén jellemző volt a havazás, azonban délutánra, ahogy a front helyeződött észak felé, és hidegebb levegő advektálódott a Dunántúl déli részére és a havazás is megszűnt.



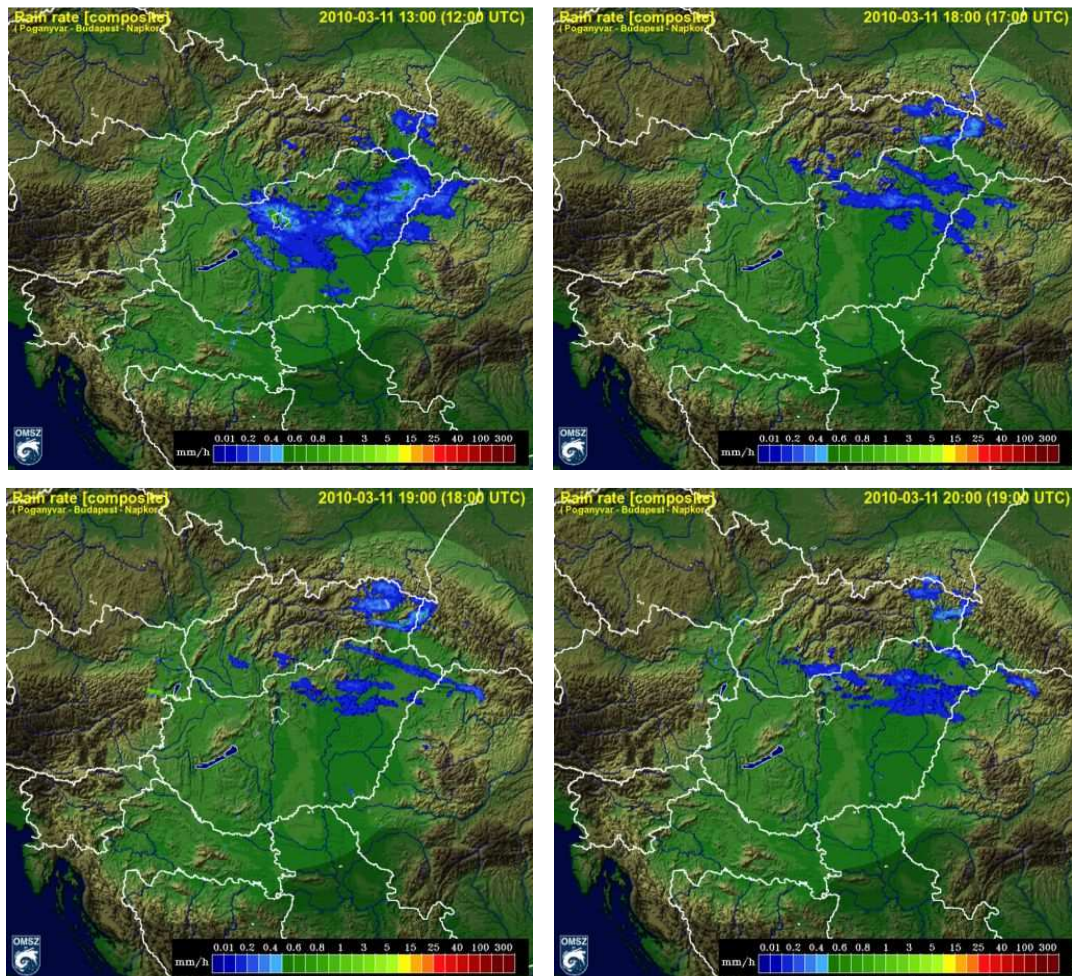
**19. ábra. 2010. 03. 11. 12:00 UTC Nappali mikrofizikai kompozit műholdkép;  
500 hPa geopotenciál (zöld) és 700 hPa hőmérsékleti advekción (piros; kék)  
(<http://www.satreponline.org/index.php?width=1280&height=800>).**

A hideg advekción – tudva a hidrosztatika alapegyenletét – az 500/1000 hPa-os réteg vastagságának csökkenését okozza, vagyis az 500 hPa-os gerinc magassága (geopotenciálja) csökken. Ez a kvázigeosztrófikus elmélet értelmében ciklonális örvényességet kell, hogy generáljon a geosztrófikus egyensúly fennmaradása érdekében. Mivel az örvényességi advekción kicsi (közel zérus a forgástengely mentén), csak a horizontális konvergencia képes ezt az örvényességet kitermelni, ami a kontinuitási egyenlet értelmében leáramlást és az alsóbb szinteken divergenciát generál. A leáramlás miatt a felhőzet elvékonyodott, a csapadék itt megszűnt, és már csak hazánk keleti, északkeleti térségére koncentrált. Mivel a hőmérséklet 0 fok körül alakult így helyenként már csak havas eső hullott. A felszínen gyenge délkeleti szél volt az uralkodó, ami helyenként megerősödött és 9–12 m/s-os szellökéseket is mértek.

A rádiószondás magassági szélmérés (18. ábra) jól mutatja, hogy a felszíntől az inverzió réteg tetejéig erősödött a délkeleti szél, s szélfordulás sem következett be. A 800 hPa-os szinttől felfele haladva viszont délnyugatra fordult a szél, és mérséklődött. 6000 m magasságban pedig megfigyelhető egy újabb nagyság és irány szerinti szélváltozás (szélnyírás).

Ahogy a ciklon távolodott északkeleti irányba, mögötte kialakult egy jelentős északi áramlás, amelyben hideg levegő érkezett hozzánk. Az éjszakai órákban a

Kárpát-medence nyugati felében, ahol már a délután folyamán felszakadozott a felhőzet, és vastag hótakaró is kialakult, meglehetősen hideg lett. A hőmérséklet az erős kisugárzás miatt általában  $(-6) - (-8) ^\circ\text{C}$  között alakult, de helyenként  $-10 ^\circ\text{C}$  is előfordult. Az ország középső és keleti részein, ahol még borult volt az ég és többfelé havazást is jelentettek, a minimum hőmérséklet nem tért el jelentősen a nappali átlaghőmérséklettől, azaz  $0 - (-4) ^\circ\text{C}$  között alakult.

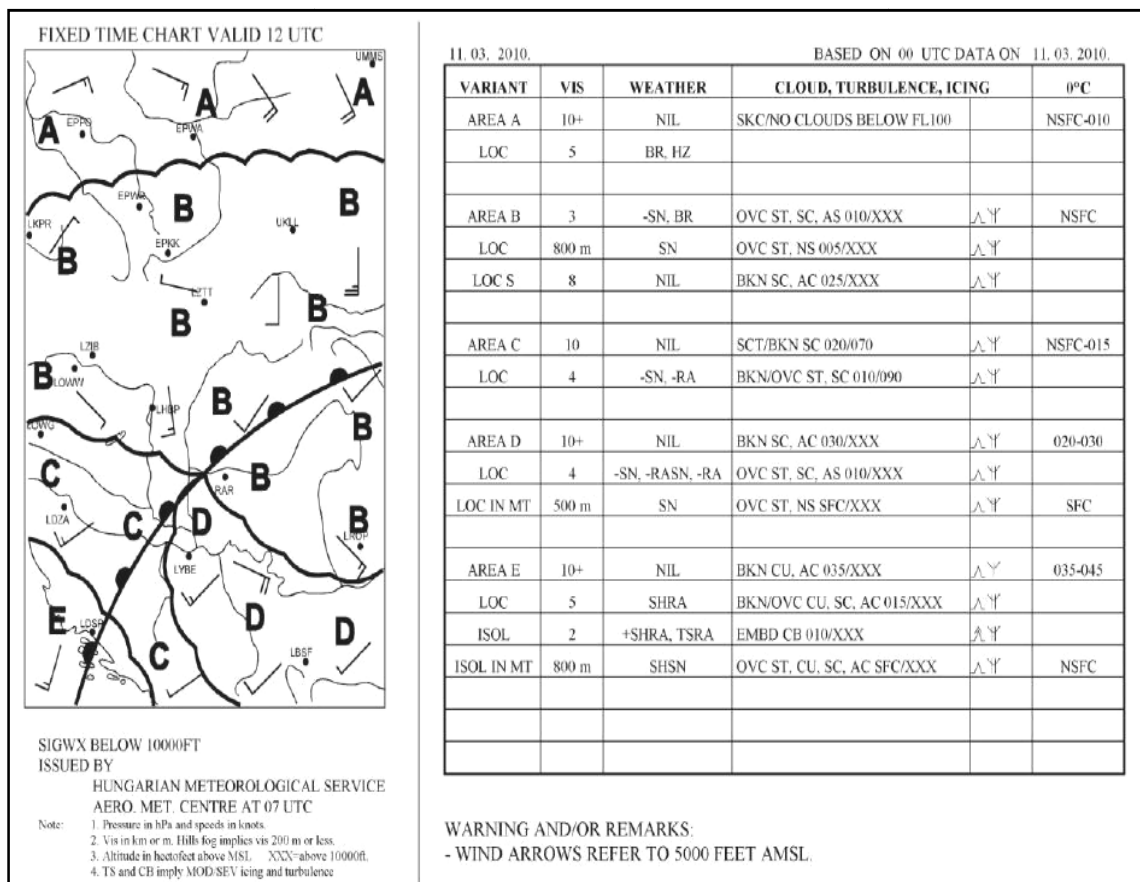


20. ábra. 2010. 03. 11. Radar térkép (12:00 UTC; 17:00 UTC; 18:00 UTC; 19:00 UTC)  
(<http://www.met.hu/omsz.php>).

A repülésre veszélyes időjárási helyzet alakult ki, hiszen adottak voltak a feltételek a jegesedés kialakulására. Ezt mutatja a radarkép (20. ábra) és a hajnali órákban kiadott alacsonyszintű szignifikáns térkép, ami már figyelmeztetett a jegesedésre (21. ábra). A szignifikáns térkép mellett az egész nap, rendszeresen kiadott GAMET előrejelzési táviratokban is megjelent a közepes-erős jegesedésre való figyelmeztetés (ICAO). Ezek a táviratok nemzetközileg elérhetők, tehát a Zwickau-ból



elinduló kisgép pilótája is tájékozódhatott a Magyarország területére vonatkozó várható időjárásról (Wantuch et al., 2011).



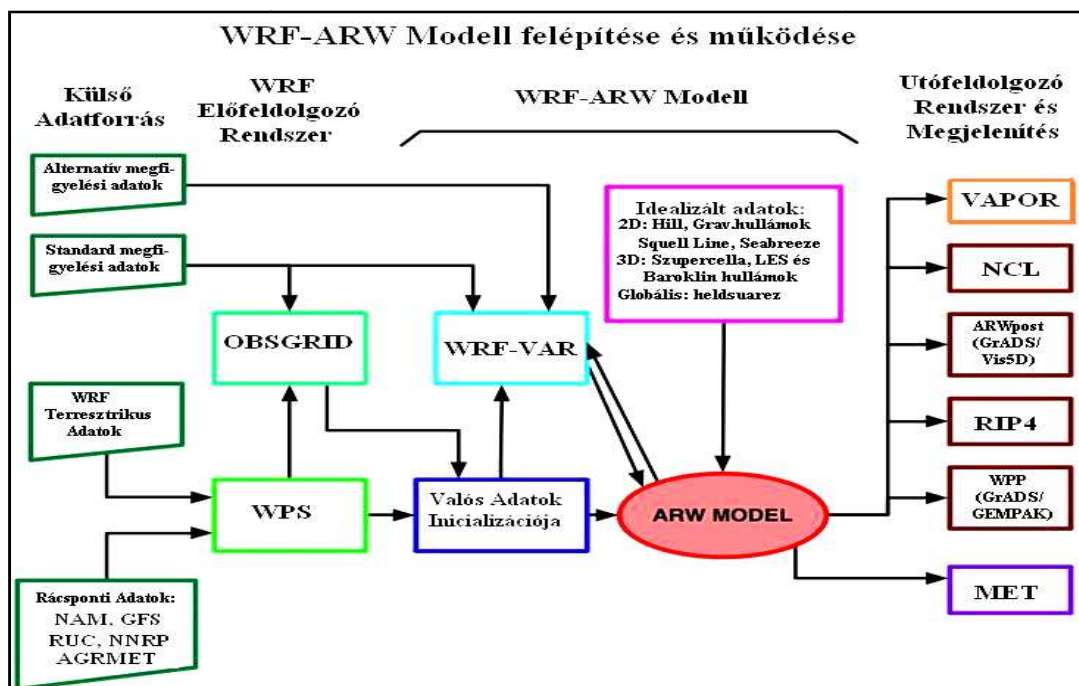
21. ábra. Alacsonyszintű szignifikáns térkép 2010. 03. 11. (Wantuch et al., 2011).

### 3.3. A jegesedési modell bemenő adatainak előállítása WRF modell segítségével

Az jegesedés előrejelzéséhez, vagyis az akkréciós felszínre vonatkozó energia-egyenlet megoldásához szükség van a kezdeti feltételek megadására, amit a környezeti és az aerodinamikai feltételek alkotnak. Az aerodinamikai feltételeket, mint például a repülési sebességet a repülési naplóból ismerjük, a környezeti (meteorológiai) paramétereket az adott időintervallumra és helyszínekre – amikor és ahol a repülés történt – a WRF-ARW modell segítségével határoztuk meg.

### 3.3.1. A WRF-ARW modell felépítése és működése

A WRF modell részletes ismertetése a kormányzó egyenletek és az alkalmazott parametrizációs eljárások bemutatása a *III. Függelékben* található. E fejezetben a modell felépítését (22. ábra) és a futtatás menetét ismertetjük Wendl (2009) alapján.



22. ábra. A WRF-ARW felépítése és működése (Wendl, 2009).

A WRF ARW modell fő programegységei:

- WRF Előfeldolgozó Rendszer (WPS),
- WRF 3DVAR: 3D adatasszimilációs rendszer,
- ARW megoldó szegmens (ARW dynamic solver), ami tartalmazza az inicializáló programokat idealizált illetve valós adatokkal történő modellfuttatásokhoz, valamint része a numerikus integrálás elvégzéséért felelős program.
- Utófeldolgozás, grafikus eszközök: a modell output netCDF fájljait dolgozza fel, illetve grafikusan megjeleníthetővé teszi.

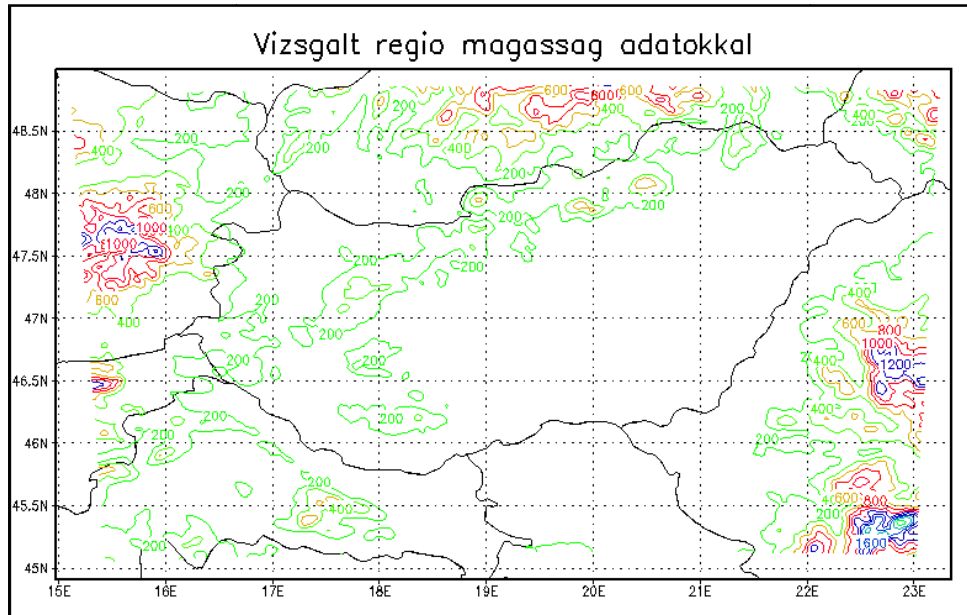
A munkafolyamat első lépése a szükséges kezdeti feltételek előállítása. A modell előfeldolgozó rendszere (WPS) előállítja a felhasználó által meghatározott horizontális rácsot, az esetleges beágyazott területekkel (nest) együtt. Emellett az időfüggetlen mezőket is interpolálja az előrejelzési tartományra. Ezt követi egy külső modell, például a GFS modell által szolgáltatott mezők (GriB2 formátumú fájlokban történő)

interpolációja az aktuális modellterületi rácsára, azaz a kezdeti feltételek kialakítása. Az adatok átalakításáért a *geogrid*, *ungrib* és a *metgrid* segédprogramok a felelősek. E szegmensben történik a modellhez tartozó alsó határfeltételek előállítása is. Ezután futtatjuk az ún. *real* programot, amely az inicializáció és a vertikális modellszintek előállításáért felelős. Már itt beépíti a modell az integrálás során alkalmazandó talajsémát. Azt követően, hogy a real program előállította a modell 3D-s kezdeti- és határfeltételeit, elindulhat a térbeli és időbeli integrálás (*wrf*), ami a teljes futtatási idő döntő része. Miután az előrejelzési időnek megfelelő időpontba ért az integrálás – a modell befejezi a munkáját. Számításokat és egyéb felhasználásokat tekintve könnyen kezelhető netCDF formátumú output-fájlokat kaptunk. A munkafolyamat befejező lépése az utófeldolgozás (*ARWpost*) és pl. a grafikus megjelenítés. Itt történik a modell által számolt (a modell koordináta-rendszerébe transzformált) mennyiségek átszámítása meteorológiai (z-rendszerben, vagy p-rendszerben használt) alapmennyiségekké, és a modell által felkínált diagnosztikai változók származtatása (pl. örvényesség, potenciális örvényesség, advekción tagok). Az előállított modell produktumokat különböző grafikus eszközökkel lehet megjeleníteni (Wang, 2009).

### 3.3.2. A 2011. március 11-ére vonatkozó modellfuttatás

2010. 03. 11-én a késő délutáni órákban nemcsak a körülmények voltak megfelelőek jégbevonat kialakulásához, de valóban meg is történt egy kisméretű jegesedés. A gépen kialakult jégakkréció becsléséhez a 2.4.1. fejezetben ismertetett modellt használtuk fel. Az akkréciós modell kezdeti feltételeit alkotó meteorológiai paraméterek előállításához a 3.2.1. fejezetben bemutatott WRF-ARW modellt alkalmaztuk, mivel az adott repülési útvonalra vonatkozóan térben és időben nem állt rendelkezésünkre kellő mennyiségű valós mérési adat, egy 24 órás modellfuttatást végeztünk 2010. 03. 11. 00:00-tól 2010. 03. 12 00:00 UTC-ig. A modell számára kezdeti feltételekként a GFS (Global Forecast Model) modell  $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ -os felbontású előrejelzett mezőit használtuk, melyek 6 óránként álltak rendelkezésre az archívumból. A minél pontosabb eredmény érdekében az adott térségre (23. ábra) a modellt  $3 \times 3$  km-es horizontális felbontással futtattuk. Az ehhez tartozó időlépcső 18 másodpercnek adódott a CFL stabilitási kritérium miatt. Lehetőség lett volna ún. adaptív időlépcső alkalmazására is, amely a futtatási idő csökkenését eredményezte volna, azonban ezt főleg operatív céloknál érdemes használni.

A teljes prognosztikai (modellezési) tartomány a 23. ábrán látható. Természetesen a vizsgálat során e tartomány azon részét használtuk fel, amely számunkra a legfontosabb területet jelenti.



23. ábra. Vizsgált régió magassági adatokkal.

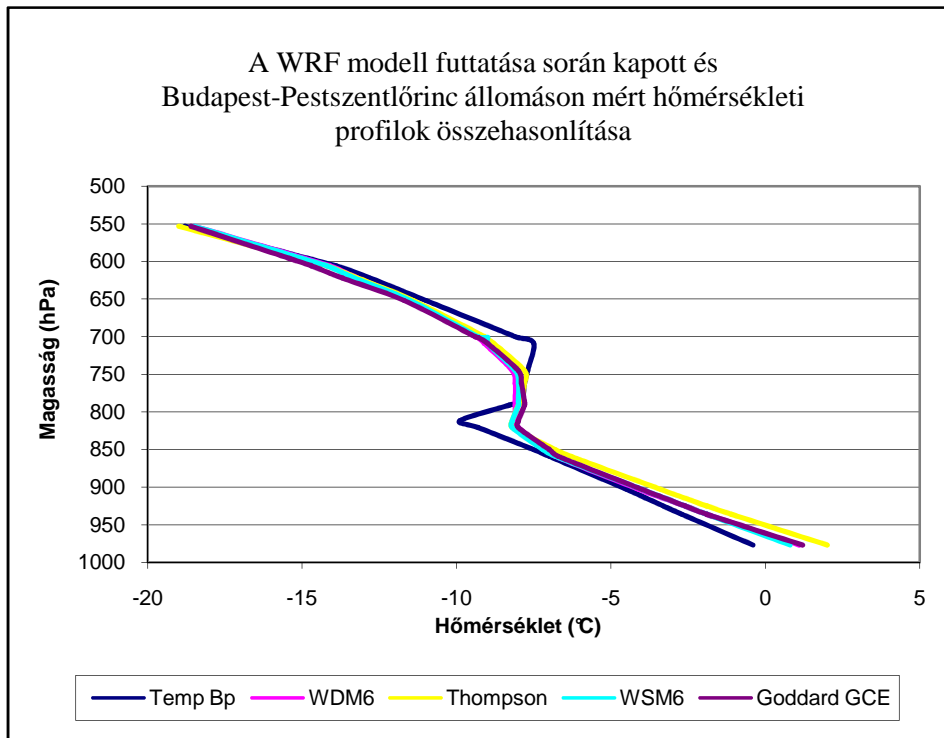
A futtatást 28 magassági szintre végeztük, amelyek közül számunkra az alsó 1500 m volt a fontos, ugyanis a repülés ebben a légrétegben történt.

Mivel a WRF-modell kimeneti adataival egy a kezdeti feltételekre nagyon érzékeny akkréciós modellt szeretnénk meghajtani, így olyan WRF parametrizáció együttest kellett választani, amely kellő pontossággal közelíti, illetve figyelembe veszi a különböző mikrofizikai folyamatokat (felhőképződés, határreteg dinamika, stb.). A választható parametrizációs sémákról a III.3. Függelékben bővebb leírás található.

Több különböző beállítással ellátott futtatást végeztünk (WDM6; Thompson; WSM6; Goddard GCE), melyeket a vertikális hőmérséklet görbék segítségével hasonlítottunk össze egymással és a rádiószondás felszállásokkal (24. ábra). A kék színű hőmérsékleti görbe a Budapest-Pestszentlőrinc állomáson, az adott napon 12 UTC-kor mért valós értékeket ábrázolja, a többi az egyes parametrizációs beállításokkal kapott hőmérsékleti profilokat. Csak olyan felhő-parametrizációkat vizsgáltunk, amelyek prognosztikai változóként számolják az LWC (folyékony víztartalom) értékét (Rajeevan et al., 2010; Wolf and McDonough; Ikeda et al., 2008).

Minden parametrizáció esetén tendenciájában hasonló eredményt kaptunk. Csak néhány tized fokos eltérések figyelhetők meg az egyes hőmérsékleti görbék között.

Az átlagos négyzetes hibákat véve a legjobb eredményt, a WSM6 mikrofizikai séma alkalmazásával kaptuk (2. Táblázat).



24. ábra. WRF modell különböző parametrizációs beállításával kapott hőmérsékleti profilok.

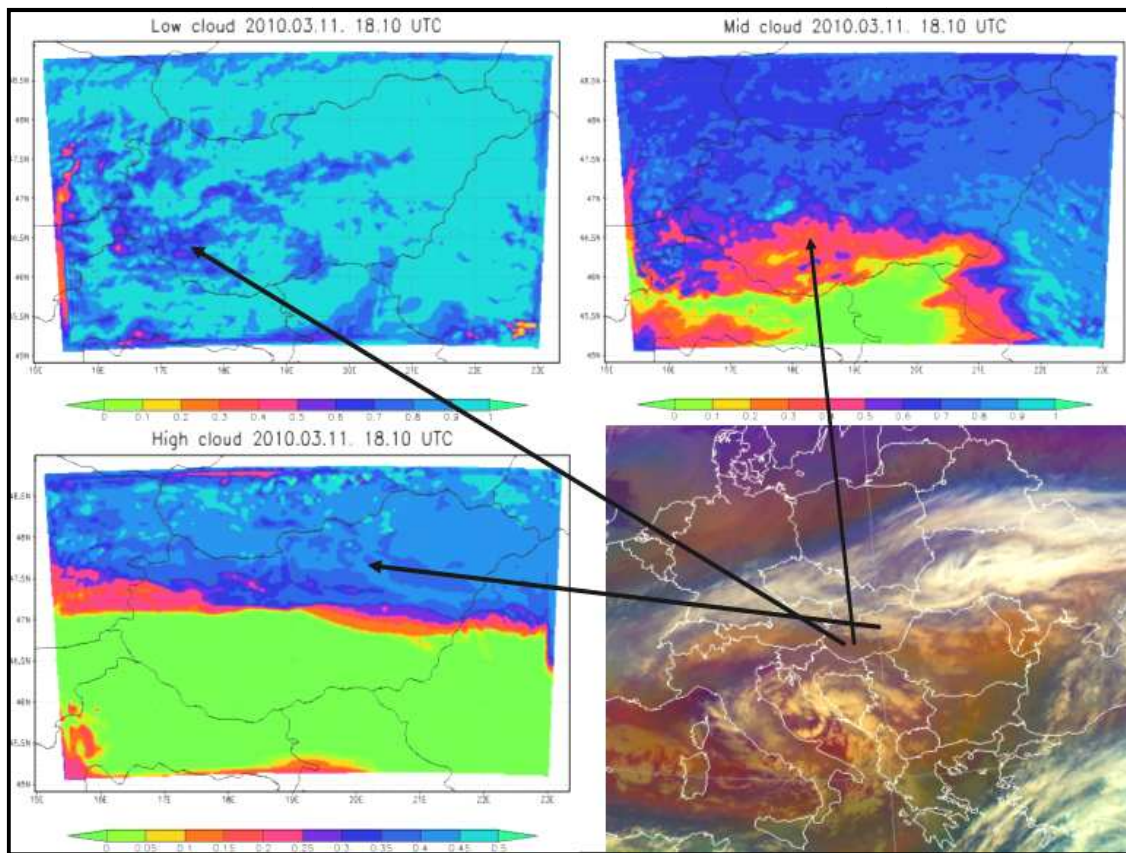
	MSE (T)	MSE (MIX)	delta (DIR)	MSE (SPD)
WDM6Class	0,779	<b>0,044</b>	33,05	<b>10,395</b>
Thompson	1,056	0,063	29,35	12,253
WSM6Class	<b>0,638</b>	0,048	27,45	10,606
Goddard GCE	0,896	0,089	<b>25,65</b>	11,078

2. Táblázat. Az egyes paraméterek átlagos négyzetes hibája (MSE), hibája (delta) (T: hőmérséklet; MIX: keverési arány; DIR: szélirány; SPD: szélesség).

Tehát az akkréciós modell kezdeti feltételének meghatározásához szükséges WRF futtatást a következő parametrizációs sémák felhasználásával végeztük:

- Mikrofizikai: WSM 6-class graupel séma
- Cumulus parametrizáció: nincs
- Planetáris határreteg parametrizáció: YSU séma
- Felszín-légkör kölcsönhatásának parametrizációja: termális diffúziós séma
- Hosszú hullámú sugárzás: rrtm séma
- Rövid hullámú sugárzás: Dudhia séma
- Szárazföldi felszín parametrizáció: Monin-Obukhov séma

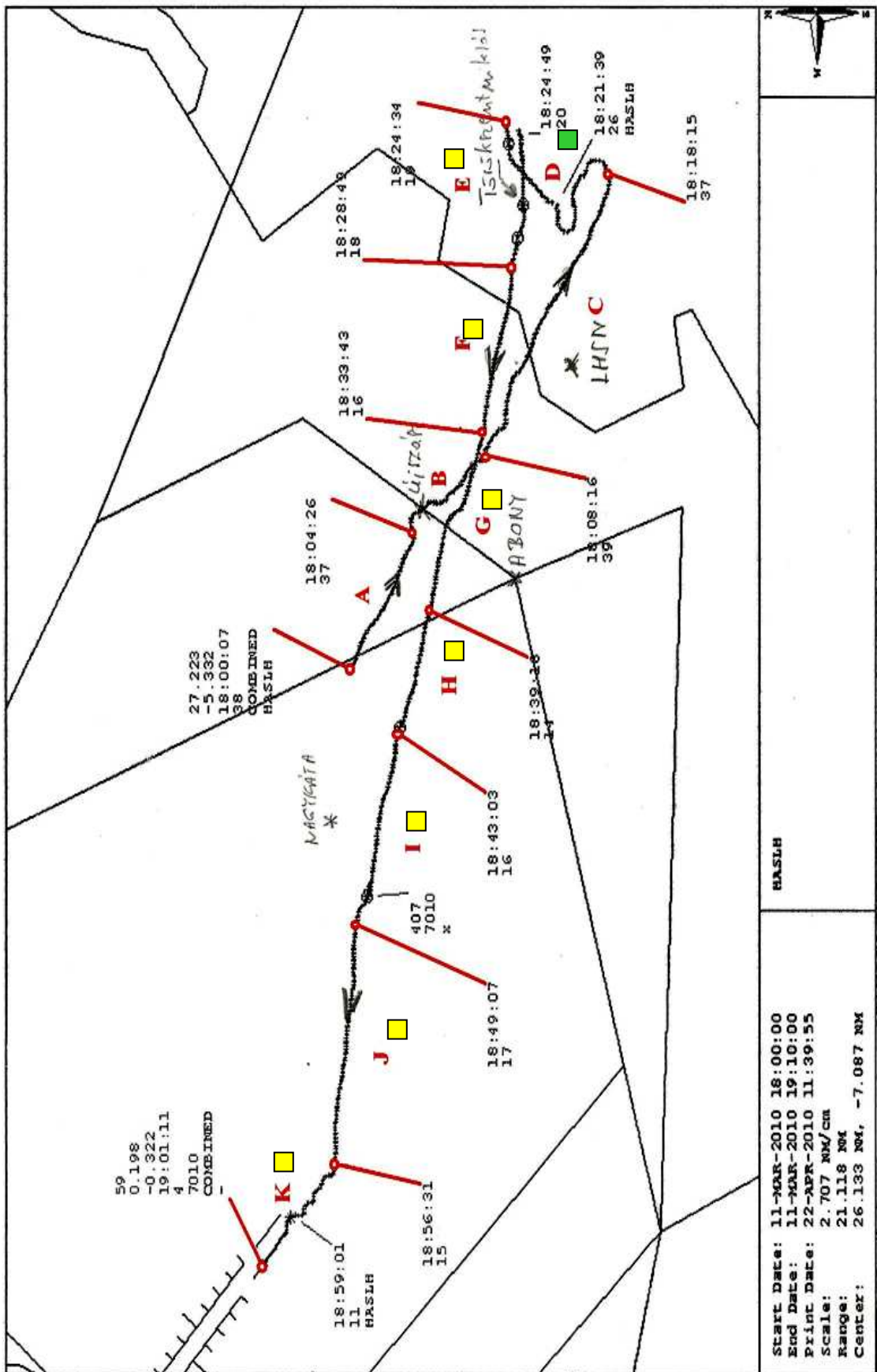
Mivel a repülés jegesítő sztratiform felhőzetben történt, így mielőtt az akkumulációs modellt lefutattuk, megvizsgáltuk, hogy a modellnek sikerült-e visszaadnia, a felhőzet jellegét. A Grads grafikus megjelenítő program segítségével kirajzoltattuk a 2010.03.11. 18:10 UTC-ra vonatkozó alacsony (low), közép (mid) és magas szintű (high) felhőzetet, majd ezt egy ugyanerre az időpontra vonatkozó kompozit műholdképpel hasonlítottuk össze (25. ábra). Jól látszik, hogy a kiválasztott parametrizációs beállításokkal végzett modellfuttatás eredménye jól közelíti a valós felhőzet elhelyezkedését és jellegét.



25. ábra. Modell által adott felhőzet és a műholdkép összehasonlítása (2010. 03. 11. 18:00 UTC) (<http://www.satreponline.org/index.php?width=1280&height=800>).

### 3.4. A futtatás eredménye és a jégakkréció becslése

A WRF modell futtatásából kapott eredmények közül az akkréciós modell meghajtásához a hőmérsékletet, a statikus nyomást és a folyékony víztartalmat használtuk fel, a repülőgép útvonalára történő jegesedés becsléshez. A Cessna-182 Skywagon repülőgép útvonala a 26. ábrán látható.



26. ábra. Cessna – 182 repülési útvonala és az adott útszakaszhoz tartozó jegesedési intenzitás.

Az akkréciós modell a 2.4.1. fejezetben bemutatott 10 tagból álló (3) energia-megmaradási-egyenleten alapul. Ha ebbe az egyenletbe behelyettesítjük az egyes tagok definíciós egyenleteit, akkor egy két ismeretlenes nem-lineáris differenciál egyenletet kapunk. A két ismeretlen, amelyekre ezt az egyenletrendszer meg kell oldani az akkréciós felszín hőmérséklete ( $T_s$ ), valamint az  $n$  a beérkező és a megfagyott vízmennyiség arányát jelző szám. Az egyenletben szereplő többi tag ismert állandó (pl. víz átlagos fajhője, vagy a fagyáshő), a modell által számított együtthatók (pl. a Prandtl-szám vagy a Schmidt-szám) a környezeti (meteorológiai) illetve a geometriai (a repülőgép jellemzői) feltételekből megadható változók. A jegesedés intenzitása és alak tulajdonságai tehát a kezdeti feltételként megadandó változóktól ( $T_a$ ; LWC;  $p$ ; cseppméret eloszlás; TAS; repülőgép fizikai paraméterei) függenek.

A jéglerakódás modellezéséhez elsőként az adott meteorológiai szituációnak megfelelően lerögzítettünk egy jellegzetes gamma cseppméret-eloszlást, 20  $\mu\text{m}$ -es átlagos cseppátmérővel a felhőben. Ez a cseppméret-eloszlás leginkább a réteges felhőzetre igaz (Geresdi, 2004). (Az adott napon a repülőgép Ns felhőzetben történő repülés során jegesedett.)

Az akkréció becslését a Cessna – 185 Skywagon típusú merevszárnyú repülőgépre végeztük el, melynek fizikai paraméterei gyakorlatilag megegyeznek a szóban forgó Cessna – 182 gépével (27. ábra).

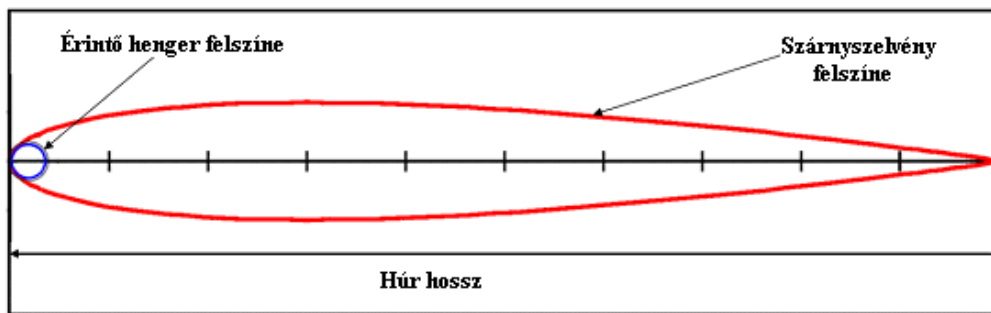


27. ábra. Cessna – 185 Skywagon merev szárnyú repülőgép (Bottyán, 2011).

E kisgép szárnyprofilját a NACA012-es kódú szárnyszelvény adja meg. E szárnyszelvényhez egy érintő hengert illesztettünk a könnyebb modellezés érdekében (<http://www.janes.com/products/janes/index.aspx>) (28. ábra). A repülőgép adataiból a



görcbületi sugár is kiszámítható. Így a geometriára vonatkozó kezdeti feltételeket is megadtuk.



28. ábra. Szárnyszelvény keresztmetszet és a hozzá tartozó érintő henger (Bottyán, 2011).

Ezek után már csak a meteorológiai és aerodinamikai körülményekből származó kezdeti értékeket kell megadni, melyek közül a meteorológiai paramétereket az előző 3.3.2. fejezetben ismertetett futtatás eredményei szolgáltatják. Az repülési sebességeket az NKH (Nemzeti Közlekedési Hatóság) által rendelkezésre bocsátott radaradatokból határoztuk meg. A számításoknál a repülési útvonalat szakaszokra (A-K) osztottuk fel, amelyekre egy-egy átlagos sebesség értéket vettünk (26. ábra). Erre a felosztásra azért is szükség volt, mivel a jegesedési modell nem alkalmazható hosszú idő intervallumokra, ugyanis nem tudja figyelembe venni a megváltozott felszín okozta áramlásmódosulásokat (Lozowski *et al.*, 1983b). Számításainkat minden szakaszra külön-külön elvégeztük az oda vonatkozó kezdeti feltételekkel, amelyek a 3. Táblázatban szürke háttérűek. Az egyes útvonal részekén a teljes ott töltött időre ugyanazokkal a hőmérséklet ( $T$ ), átlagos teljes víztartalom ( $TWC_{\text{át}}$ ) és nyomás ( $p$ ) értékekkel számoltunk, feltételezve, hogy ilyen rövid időintervallumok alatt szignifikáns változás nem történt sem a környezeti, sem az aerodinamikai feltételekben.

<b>Interv. jele</b>	<b>Idő (UTC)</b>	<b>h [láb]</b>	<b>h [m]</b>	<b>V<sub>át</sub> [m/s]</b>	<b>Interv. hossza</b>	<b>T [°C]</b>	<b>p [hPa]</b>	<b>TWC<sub>át</sub> [g/kg]</b>
<b>A</b>	18:00:07	3800	<b>1158</b>	<b>56</b>	<b>0:04:19</b>	<b>-5,5</b>	<b>872</b>	<b>0,05</b>
<b>B</b>	18:04:26	3700	1128	51	0:03:50	-5,5	873	0,05
<b>C</b>	18:08:16	3800	1158	52	0:09:59	-5,5	871	0,05
<b>D</b>	18:18:15	2800	853	53	0:06:19	-2,9	910	0,10
<b>E</b>	18:24:34	1900	<b>579</b>	<b>57</b>	<b>0:04:15</b>	<b>-1,2</b>	<b>940</b>	<b>0,15</b>
<b>F</b>	18:28:49	1800	518	55	0:04:54	-1,0	945	0,15
<b>G</b>	18:33:43	1500	<b>457</b>	<b>55</b>	<b>0:05:35</b>	<b>-0,7</b>	<b>951</b>	<b>0,20</b>
<b>H</b>	18:39:18	1500	457	51	0:03:45	-0,7	951	0,20
<b>I</b>	18:43:03	1600	488	50	0:06:04	-0,8	952	0,20
<b>J</b>	18:49:07	1600	488	50	0:07:24	-0,8	952	0,20
<b>K</b>	18:56:31	1000	305	33	0:04:40	-0,6	959	0,25

**3. Táblázat. Az egyes útvonalszakaszokra vonatkozó meteorológiai és aerodinamikai paraméterek.**

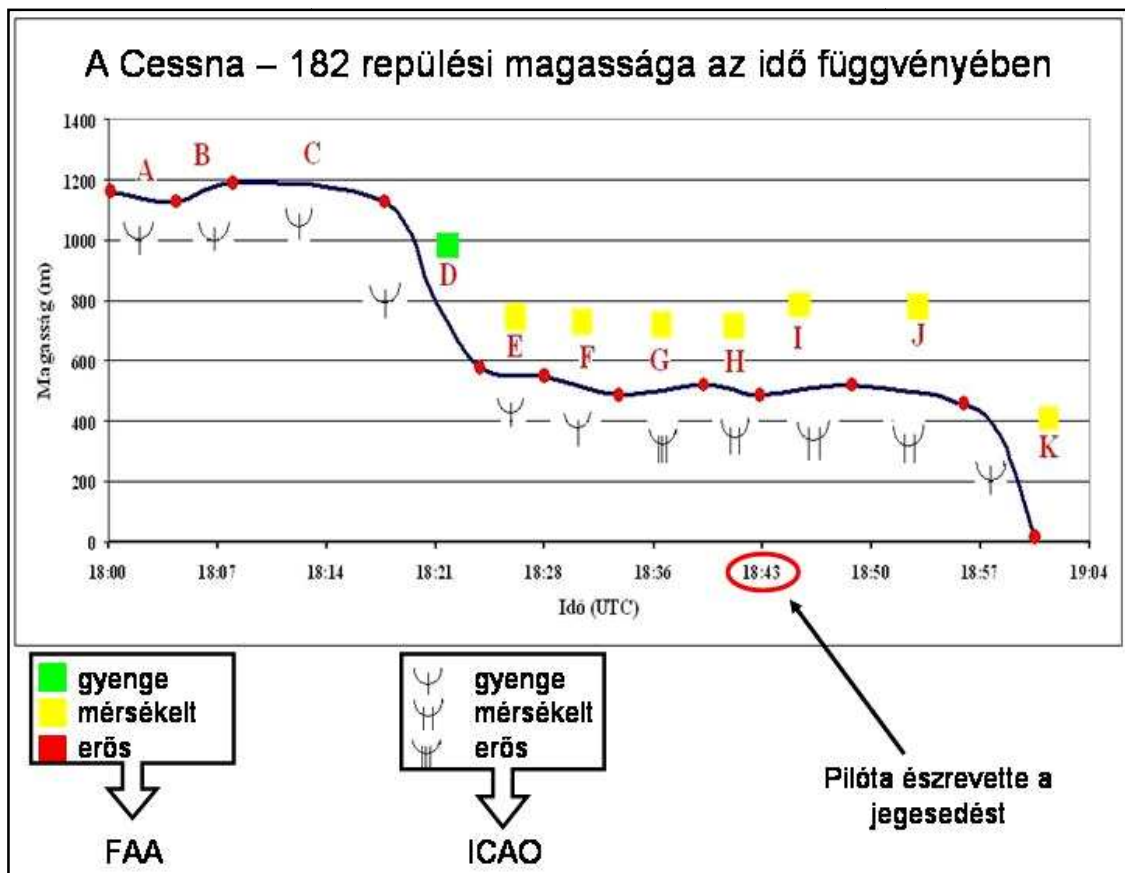
A kezdeti feltételek ismeretében megoldottuk a két ismeretlenre az egyenletrendszerünket. A definíciós egyenletek segítségével kiszámíthatók a különböző termodinamikai folyamatok fluxusai, amely segítségével utolsó lépésként már becslést adhatunk a jegesedés intenzitására. Minden intervallumra kiszámolta a modell a maximális jégakkumuláció értékét, amelyből a repülőgép ott töltött ideje ismeretében megadtuk azt a jégvastagságot (mm-ben), ami a szárnyszelvényt közelítő érintő hengeren kialakulhatott. Az akkumulációs modell segítségével képet kaptunk arról is, hogy a kialakult jégbevonat nedves típusú vagy száraz típusú volt.

Int.jel e	Idő	h <sub>át</sub> [m]	Int.hossz	Max.Jégakk [mm/perc]	Jégvast. [mm]	Jelleg	FAA
A	18:00:07	1158	0:04:19	0,102	0,440	száraz	TRACE
B	18:04:26	1128	0:03:50	0,091	0,348	száraz	TRACE
C	18:08:16	1158	0:09:59	0,093	0,930	száraz	TRACE
D	18:18:15	853	0:06:19	0,187	1,178	száraz	LGT
E	18:24:34	579	0:04:15	0,431	1,832	nedves	MOD
F	18:28:49	518	0:04:54	0,434	2,127	nedves	MOD
G	18:33:43	457	0:05:35	1,076	6,004	nedves	MOD
H	18:39:18	457	0:03:45	0,670	2,513	nedves	MOD
I	18:43:03	488	0:06:04	0,526	3,193	nedves	MOD
J	18:49:07	488	0:07:24	0,526	3,892	nedves	MOD
K	18:56:31	305	0:04:40	0,330	1,551	nedves	MOD

**4. Táblázat. A repülési útvonal szakaszokra vonatkozó jégakkumuláció becslése**  
(FAA – Federal Aviation Administracion; TRACE – nyomokban; LGT – gyenge; MOD – közepes).

A repülési útvonal első négy szakaszában (A, B, C, D) száraz típusú jégréteg növekedés lehetett a jellemző. Ez azzal magyarázható, hogy ekkor repült a gép a legnagyobb magasságban (26. és 29. ábra), ahol a folyékony víztartalom értéke már kicsi, a környezet hőmérséklete pedig már elég alacsony volt ahhoz, hogy a cseppek becsapódása során a súrlódásból és aerodinamikai összenyomódásból származó szenzibilis, valamint a cseppek fagyása során felszabaduló látens hő elég gyorsan tudjon távozni a környezetbe. Az E szakasztól kezdve már nedves típusú lerakódást adott a modell. Ekkor a felszabaduló hő nagy része a felszín hőmérsékletének emelésére fordítódott, így a becsapódó cseppek csak egy része tudott megfagyni a belépő élnél, a többi az áramlással tovább folyt, kialakítva a felszínen az ún. vízfilm, ami a szárny (a modellben a henger) távolabbi részein fagyhatott meg, kialakítva így a repülésre legveszélyesebb jégalakot, a szarv típusú lerakódást. Lehetőség van a modellbe beépíteni egy olyan algoritmust is, amely a maximális jégakkumuláció figyelembevételével kategorizálja a jegesedés mértékét. Vizsgálataink során egy ICAO kategorizáláshoz hasonló nemzetközileg elfogadott osztályozást alkalmaztuk (Jeck, 1998). Ezt a FAA (Federal Aviation Administracion) dolgozta ki az Amerikai Egyesült Államokban. Négy kategóriát hoztak létre: TRACE (nyomokban), Light (gyenge), Moderate (közepes) és Severe (heves/erős). Az egyes kategóriákhoz színek tartoznak. Általában ezeket szokták feltüntetni, ahogy az a 26. és 29. ábrán is

látszik. Az intervallum jele mellett lévő négyzet színe az intervallumra jellemző jegesedési intenzitás osztályt jelöli. A zöld a gyenge, a sárga a mérsékelt/közepes míg a piros az erős jegesedést mutatja. A nyomokban előforduló jegesedést nem szokták külön feltüntetni. A vizsgálatunkból kiderült, hogy alacsony repülési magasságokon lehet számítani intenzív jegesedésekre. A teljesség kedvéért a Cessna-182 Skywagon magasságát ábrázoló diagrammon (29. ábra) a FAA osztályozás mellett (színes négyzetek) az ICAO által használt jegesedési jelöléseket is feltüntettük. Látható, hogy ennél már megjelenik az erős jegesedés is, ami abból fakad, hogy ebben az osztályozásban némileg mások az intervallumok határértékei.

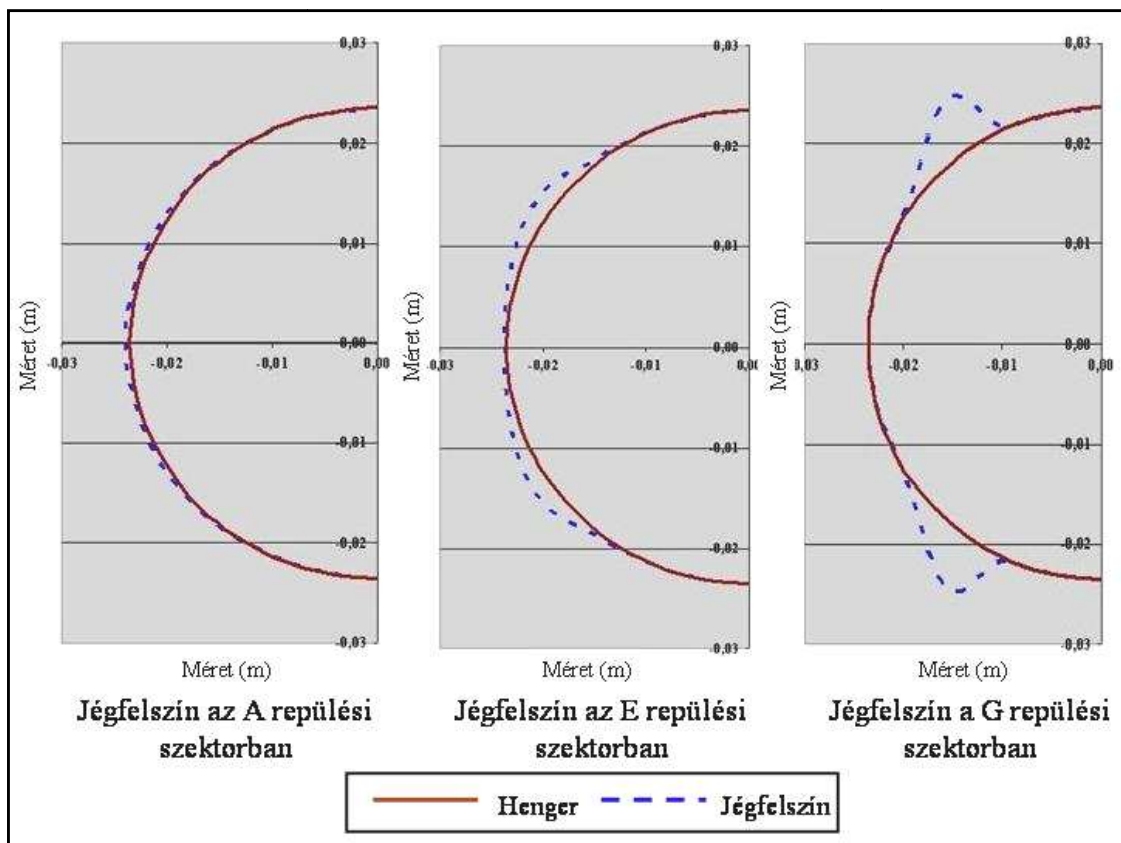


29. ábra. A Cessna – 182 repülési magassága az idő függvényében.

A G és H szakaszhoz tartozó adatokat vizsgálva látható, hogy habár az átlagos folyékony víztartalom, a hőmérséklet, és ezáltal az ehhez tartozó magassági formulából kapott nyomás ugyanolyan értékű, mégis kétszer nagyobb maximális akkumulációs értéket kaptunk a G szakaszra. Ez csak annak lehet a következménye, hogy a repülőgép átlag sebessége a G útvonalon 4 m/s-mal nagyobb volt, ami mutatja a repülési sebesség rendkívül fontos szerepét a nedves jellegű jegesedés során (Bottyán és Hadobács, 2011). Ezzel magyarázhatjuk, hogy miért a G szakaszban volt

maximális a lerakódás vastagsága. Ugyanezt bizonyítják az A, B és C szakaszra vonatkozó maximális akkumulációs érték is.

Az akkréciós becslés utolsó lépéseként az alaki tulajdonságok meghatározása következett. Természetesen a modell nem tudja pontosan megadni, hogy milyen alaki típus kezd képződni adott feltételek mellett, és megadja a maximális jéglerakódás irányát és helyét a szelvényen. A teljes 2D akkréciós geometriát 3 repülési szektorra rajzoltattuk ki (30. ábra), amelyek intervallum jeleit a 3. és 4. Táblázatban piros háttérrel emeltünk ki.



30. ábra. Jégfelszín az adott repülési útszakaszon.

Az A szakaszhoz tartozó ábra száraz növekedésre vonatkozik. Jól mutatja, hogy e típusnál a belépő élen mérhető a legnagyobb jégvastagság. Az E szakaszhoz tartozó ábra már a nedves típusra jellemző, azonban ekkor még a teljes bejövő vízmennyiségnek csak egy része megfagy rögtön a becsapódást követően a stagnációs ponton, és a maradék folyik tovább a felületen. A képződött vízfilm ebben az esetben ugyan nem a belépő élen, de ahhoz elég közel fagy meg. A G szakaszhoz tartozó ábra mutatja azt az esetet, ami arra az útszakaszra vonatkozik, ahol a legintenzívebb a jegesedés. Itt már jól látszik, hogy a belépő élen és annak közvetlen közelében nem képződik jégbevonat, mivel annak a felszíni hőmérsékletét a becsapódó cseppek

súrlódása és adiabatikus összenyomódása miatt felszabaduló hő 0 °C-ra melegítette. Ez annak köszönhető, hogy itt a környezet hőmérséklete is közel volt a fagyponthoz. Ekkor a képződő vízfilm a szárny, jelen esetben a henger távolabbi szektoraiba is el tud jutni, anélkül, hogy megfagyna, így kialakítva a repülésre legveszélyesebb szarv típusú jéglerakódást.

A modell előrejelzései alapján a repülés teljes útvonala alatt volt jegesedés. Erre vonatkozóan biztos információink azonban nincsenek, mivel a pilóta nem jelentett a toronynak jegesedést, mindaddig, amíg az irányító 18:42:51-kor megkérdezte, hogy felhőben repül-e, illetve, ha igen, akkor tapasztal-e jegesedést. A válasz 18:43:06-kor érkezett, miszerint a belépő élen, a szárnydúcon és a plexin már megjelent a jéglerakódás (29. ábra). Valószínűleg ez a bevonat még nem befolyásolta a gép mozgását, ezért nem vette előbb észre a pilóta. Azonban ekkor a gép még távol volt a repülőtértől, pontosabban még minimum 20 perc volt hátra a leszállásig. Ezt az időtartamot végig jegesítő sztratiform felhőzetben kellett eltöltenie, tehát mire elérte Ferihegyet már vastag, a mozgását befolyásoló jégakkréció jelent meg a gép felszínén.

Összefoglalva elmondható, hogy a repülési útvonalon az átlagos akkumuláció intenzitása 0,436 mm/perc volt. A repülés 61 perce alatt a repülő személyzet száraz és a nedves jégnövekedéssel is találkozhatott. A teljes útvonal nagy részén közepes jegesedési intenzitásra lehetett számítani. Ezek az eredmények természetesen csak közelítések, amelyek a jegesedés kezdeti intenzitásáról, annak jellegéről adnak információt az adott repülési tartományra vonatkozóan.

#### **4. A szimulációs környezet elkészítése és bemutatása**

A WRF-ARW modell által számított meteorológiai mezők egy másik felhasználási területe a pilóták képzésénél jelentős szerepet játszó repülőgép – szimulátor meteorológiai háttérének kialakítása. E fejezetben néhány szóban a szimulátort és annak meteorológiai alrendszerét mutatom be. A szimulátor térhódításának történeti háttérét e fejezetben részletesen nem mutatom be, azonban a *IV. Függelékben* megtalálható. Végül a konkrét repülési esemény szimulációs megjelenítése során kapott tapasztalatokat ismertetem.

## 4.1. A repülőgép-szimulátorokról röviden

A repülőgép-szimulátor a repülés egy mesterséges földbázisú reprezentációja. A szimulátor lelke egy matematikai modell, ami olyan kormányzó egyenleteken alapul, amelyek irányítják a repülést, és azt is, hogy hogyan reagáljon a gép a külső környezet hatásaira, pl. turbulenciára, felhőzetre, csapadéokra, a levegő sűrűségére stb. A szimulátorok elterjedésének több oka is van. Az egyik és talán legfontosabb, hogy a hajózárszemélyzet felkészítése, kiképzése nem könnyű és nem olcsó feladat. A szimulátor segítségével a pilóták megismerkedhetnek a repülőgéppel és annak irányításával, valamint veszélytelen környezetben hajthatják végre a bonyolult körülmények között zajló repülést. Másik nagy előnye, hogy segítségével a repülőgépek kialakítását és fejlesztését is könnyebben végre lehet hajtani.

A magyar katonai légijármű-vezetők kiképzését a Magyar Honvédség 86. Szolnok Helikopterbázison települő Repülő Felkészítési Osztály segíti és koordinálja. A képzés egyik eszköze a 2008-ban átadott ROBINSON 2244/IR FNPT I. (Repülő és Navigációs Eljárás Kiképző) forgószárnyas rendszer, a másik egy merevszárnyú Cessna repülőgép-szimulátor. Mindkét szimulátor a Microsoft Flight Simulator 2004 szoftver egy átdolgozott, adaptált változatán alapszik. A nagyobb magyarországi repülőterek nagy felbontású háromdimenziós virtuális modelljeinek segítségével valóság-hű vizuális virtuális környezetet lehet előállítani (31. ábra). A továbbiakban az említett helikopter-szimulátoron keresztül, mutatjuk be ezeknek a berendezéseknek a részeit, különös tekintettel a meteorológiai alrendszer ismertetésére.

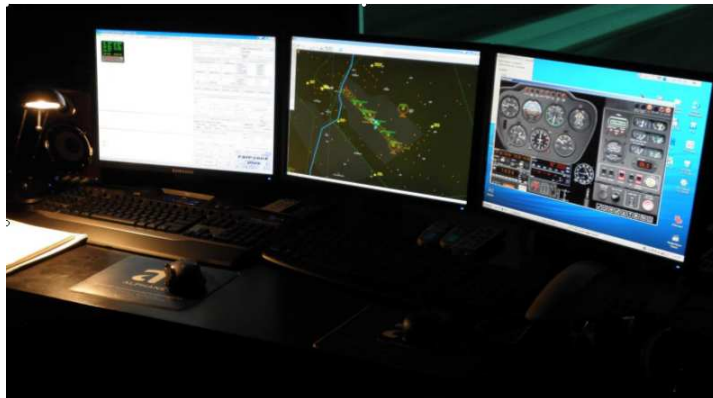


31. ábra. ROBINSON 2244/IR FNPT I. helikopter-szimulátor átfogó képe  
(Bottyán és Szabadi, 2010).

## 4.2. A repülőgép-szimulátorok rendszerei

### 1. Oktatói vezérlőrendszer

A szimuláció körülményeinek meghatározására szolgál a számítógéprendszer (32. ábra). Ennek segítségével az oktató nyomon tudja követni a növendék repülésének minden mozzanatát. A számítógépek és az ezen lévő programok segítségével lehet a repülésmeteorológiai paramétereket bevinni, amelyek meghatározzák a légköri környezet modelljét, és a gépre gyakorolt hatását.



32. ábra. Az oktatói vezérlőrendszer számítógépei.

### 2. Hang- és képgeneráló, kivetítő-rendszer

E rendszer célja a pilóták látóterének minél teljesebb kitöltése. A három video-projektor a pilótakabin előtt és mellett lévő három vászonra (33. ábra) vetíti a vezérlőrendszer által alkotott képet, így a látóteret vízszintesen  $180^\circ$ -ban függőlegesen  $60^\circ$ -ban tölti ki. A hanggeneráló rendszer a kabin előtt és mellett elhelyezett három hangszóróból áll.



33. ábra. A képgeneráló és kivetítő-rendszer (Szabadi, 2010).



### 3. *Pilótakabin és műszerezettsége*

A szimulátor kabinja szinte teljesen megegyezik a valós pilótakabinnal (34. ábra). Pl. a helikopter-szimulátor két vezető ülésel és párhuzamosított kormányzervekkel rendelkezik, így az oktató közvetlenül segítheti a hallgató munkáját. Az oldalkormány pedálja terheléssel van ellátva, illetve az ülés egy rezonáns betéttel, ami még jobban biztosítja a valósághűséget. Intercom illetve a külső rádióösszeköttetés is alkalmazható. Így lehetőséget kapnak a pilóták a rádióközlemények gyakorlására, illetve repülés közben is tudnak nekik feladatot szabni.

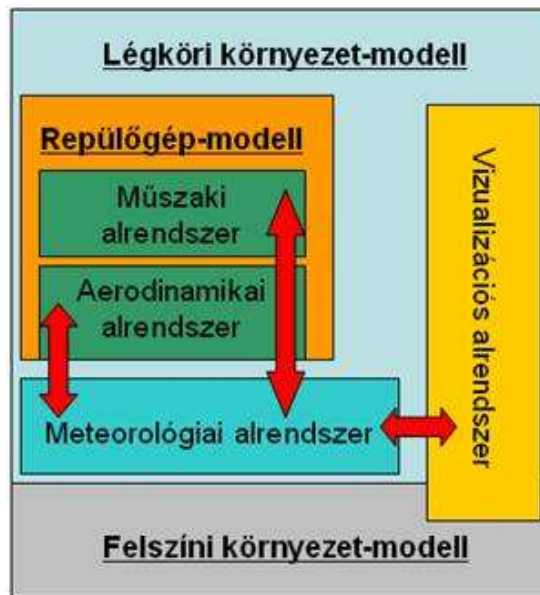


34. ábra. A pilótakabin és műszerezettsége (Szabadi, 2010).

### 4.3. A repülőgép-szimulátor meteorológiai alrendszere

Napjainkban a repülőgép-szimulátorok egyik fontos feladata, hogy lehetőséget adjon a pilóták kiképzése során, a valós légköri viszonyokhoz minél jobban hasonlító virtuális környezet kialakítására és megjelenítésére. Az ehhez szükséges valós időjárási adatok bevitelét a szimulátor meteorológiai-alrendszerén keresztül lehet megtenni.

A szimulátorok három nagy modellből épülnek fel (35. ábra). Az egyik a légköri környezet modellje, amelyben az időjárási helyzet tulajdonságai és jelenségei, valamint a repülőeszközök vizuális és audio jellemzői vannak beépítve. Itt található tehát a meteorológiai alrendszer is. A második nagy modell-rész a repülőgép-modell, amelynek több alrendszere van, amelyek pl. az aerodinamikára vagy a repülőgép geometriai jellemzőire vonatkoznak. A felszín-környezet modell a domborzat háromdimenziós modelljét és az ezekre épülő tereptárgyakat tartalmazza (Rolfe and Staples, 1988).



35. ábra. A repülőgép-szimulátorok modellje (Bottyán, 2009).

A meteorológiai alrendszer az adott időjárási helyzet fizikai állapotjelzőinek beviteli felületének a megjelenítését és kezelését végzi, valamint a légkör állapotából eredő hatásokat csatolja a repülőgép-modell aerodinamikai és műszaki alrendszeréhez. E rendszer a betáplált meteorológiai adatok alapján előállít egy virtuális légköri környezetet, és az ehhez kapcsolódó jelenségek jellemző tulajdonságait hozzáilleszti a vizualizációs alrendszerhez (Bottyán, 2009).

A légkör állapotát két módon lehet megadni: fizikai állapotjelzőkkel (pl. hőmérséklet, légnyomás, felhőalap stb.) illetve meteorológiai jelenségekkel, mint például csapadék, turbulencia stb.. Ezeket az alrendszer input felületén tudjuk bevinni. A bevitel egy interaktív adatkezelő-felület segítségével történik, amely grafikus felülettel is rendelkezik. Mivel a repülési környezet háromdimenziós, így a meteorológiai alrendszerbe vertikális profilokat (magasság szerinti megváltozásokat) kell megadni. A réteg határai 50 km magasságig 20 méteres pontossággal megadhatók. Így az atmoszféra tetszőleges magasságú és vastagságú rétegeit paraméterezni tudjuk meteorológiai szempontból is mért vagy számított adatok alapján (Williams, 2006; Van West and Lane-Cummings, 2007). A meteorológiai input adatok nagy része nem számszerű (numerikus), hanem egy jelenség előfordulását és jellemző karakterisztikáit mutatja. Ezek formáját és megjelenését grafikai objektumként kezeli a vizualizációs alrendszer. Ezt szemlélteti a 36. ábra. Szembetűnő, hogy a szimulátor milyen élethűen ábrázolja a felhőzetet, így a repülés közben megjelenő vizuális valóságot (Bottyán, 2009).



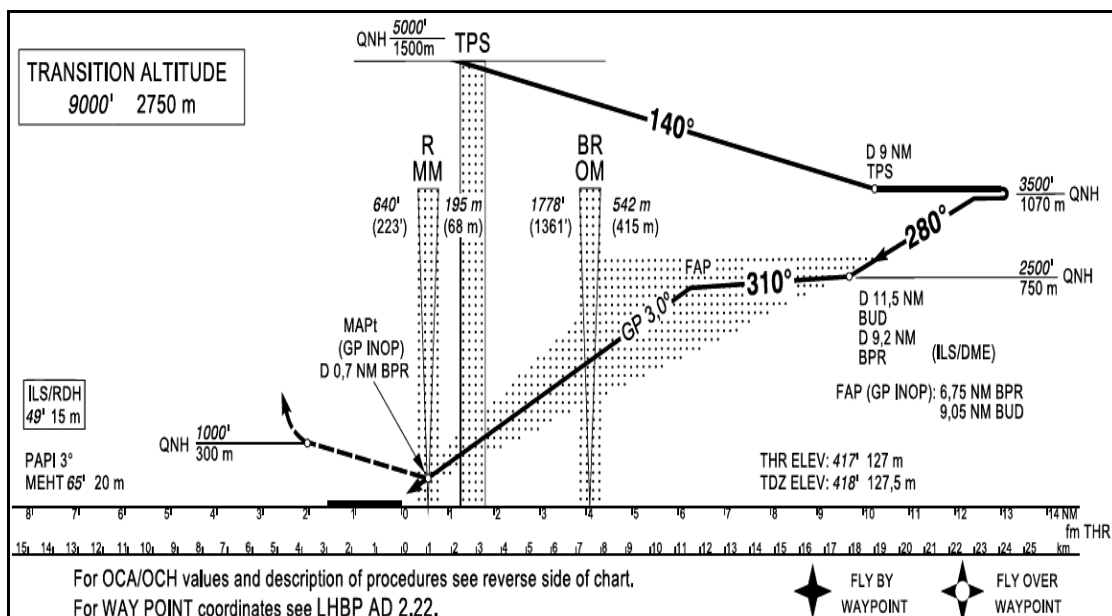
**36. ábra.** Szépidő gomolyfelhők (cumulus humilis) megjelenítése az MS Flight Simulator X vizualizációs alrendszerében (bal oldali kép), és ugyanezen felhőzet a valóságban (jobb oldali kép) ([http://www.alaska-in-pictures.com/data/media/13/puff\\_1035.jpg](http://www.alaska-in-pictures.com/data/media/13/puff_1035.jpg)) (Bottyán, 2009).

Napjainkban az adatbevitel már nem csak manuálisan történhet, hanem Internetről automatikusan frissített közel real-time meteorológiai adatok is elérhetők különböző szerverekről, de továbbra is van lehetőség manuális adatbevitelre, például archív meteorológiai szituációk feldolgozására, rekonstruálására.

Az input adatok repülőgép-modellhez történő csatolása elhagyhatatlan, mivel szinte minden időjárási paraméter hatással van a repülőgép repülés közbeni viselkedésére. Például a levegő sűrűsége és a szélvektor megváltoztatja a dinamikus nyomást, így közvetlenül a felhajtóerőre hat. Az áramló levegő meteorológiai állapota hatással lehet a fedélzeti mérő és érzékelő műszerekre. Például a Pitot-cső, amely a repülőgép sebességének meghatározásához szükséges, pl. a jegesedés miatt hamis értékeket szolgáltathat (Bottyán és Palik, 2010). Az egyes meteorológiai változók adatbeviteli lehetőségeit a *IV.2. Függelékben* fogom bemutatni.

#### **4.4. A jegesedési esettanulmányhoz kapcsolódó szimulációs környezet**

Ahogy azt a 4.3. fejezetben bemutattam, a szimulátor fejlett meteorológiai input felülettel rendelkezik. Ez lehetőséget adott a 2010. 03. 11-én történt repülési útvonal mesterséges előállítására. A vizsgált megközelítési eljárás Budapest Ferihegyi Nemzetközi Repülőtér 31R futópályájára az AIP Hungary dokumentumban található meg (37. ábra).



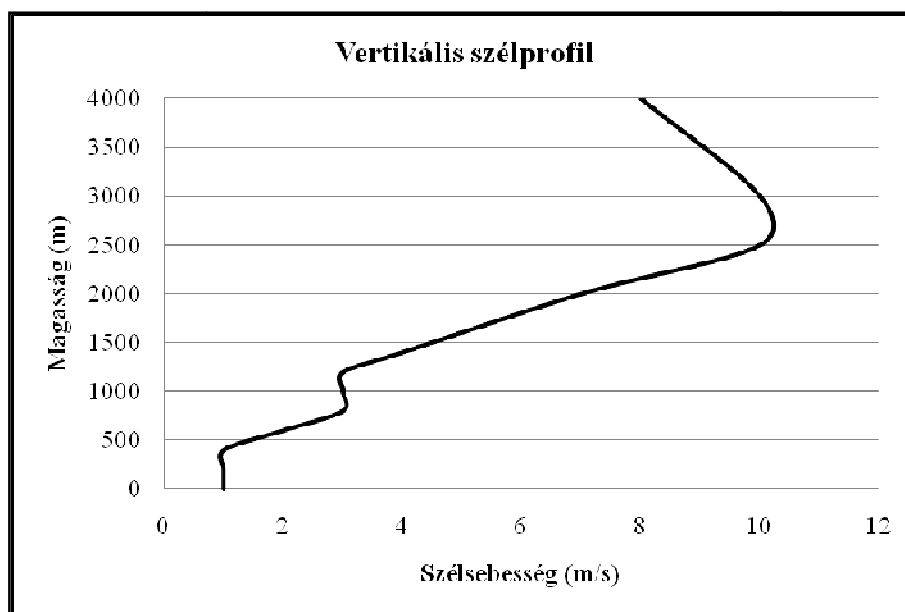
37. ábra. 31R futópályára előírt szabvány műszeres megközelítés vertikális profilja (Valentini, 2011).

A szimulációs környezet előállításával a jegesedés vizsgálata mellett a felhőzet, turbulencia és a látástávolság hatásait is dokumentáltuk. A WRF modell valamint az akkréciós modell futtatási eredményeit – amelyek a szimulátor bemenő adatai – az 5. Táblázat tartalmazza.

Magasság (m)	Látástávolság	Felhőzet	Jegesedés
0-200	3000 m	nincs felhőzet	közepes
200-1400	100 m	7-8 okta St	közepes
1400-2000	600 m	5-6 okta St	gyenge
2000 felett	40 km	nincs felhőzet	nincs

5. Táblázat. Látástávolság, felhőzet alakulása és a jegesedés intenzitása 2010. 03. 11. 18:00 UTC.

A megközelítés közepes mértékű jegesedés és alacsony látástávolság közt lett végrehajtva a 37. ábrán látható módon. Ahogy az 5. Táblázatban látszik, az adott időpontban a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtéren (az akkori Ferihegyi Nemzetközi Repülőtéren) és annak környezetében az alsó 1400 m-es rétegben közepes, míg ennél magasabb szinteken a csökkenő TWC miatt gyenge jegesedés volt. A Ns felhőzet vertikális kiterjedése 200 m-től 2000 m-ig terjedt. 1400 m-ig OVC (overcast-teljes borultság), e fölött BKN (broken-szakadozott) felhőzet mennyiség jelentkezett. E sztratiform (réteges) felhőzetből gyenge havazás, havas eső hullott. A látástávolság az időjárási helyzetnek megfelelően alakult. A megközelítés során az uralkodó szél, melynek iránya 230–250° között változott a földfelszínhez közeledve csökkent (38. ábra).



38. ábra. Vertikális szélviszony alakulása 2010. 03. 11. 18:00 UTC.

A megközelítés 3 szakaszra lett bontva a felhőzet szerint. Az első szakaszban a repülőgép 3000 méterről süllyedt, és a 140°-os irányon az 1070 m-es magasságot akarta elérni. Mivel itt a látástávolság 40 km fölött alakult a felhőzet hiánya miatt, így ez a szakasz volt a legegyszerűbben végrehajtható. E szinten jegesedés nem jelentkezett, és ha turbulencia elő is fordult, akkor is csak alacsony szintű volt.

A Ns felhőzetbe való belesüllyedés pontjától következik a második szakasz. Ekkor a látástávolság hirtelen 600 m-re esett. Mivel innentől már nem lehet vizuálisan navigálni, így a pilótának nagyrészt a műszerekre kell hagyatkoznia. A Ns felhőzet miatt közepes szintű turbulencia jelenlétére kellett számítani. 1600 m-es magasságban a repülőgép felületén jégbevonat jelent meg. Mivel a pilóta a jégtelenítő funkciót kikapcsolva hagyta így a sebességmérő használhatatlanná vált, nem szolgáltatott adatot (39. ábra). A sebességmérő nulla értéket jelzett, amit magyaráz, hogy a Pitot-cső befagyásával a mért teljes nyomás megegyezett a statikus nyomás értékével. Ha a pilóta itt kapcsolta volna be a jégtelenítő berendezést, akkor sem tudta volna már eltávolítani a jeget a külső műszerekről. 200 m-es süllyedésre volt szüksége, hogy a műszer (Pitot-cső) újra a valós sebességet mutassa. A szimulátor szerint 400 m felhőben való süllyedés után rakódott le annyi jég a gép felszínre, hogy a műszer 0 értéket mutasson. Figyelembe kell venni azonban, hogy a valóság ettől eltérhet, mivel a jegesedést a szimulátor előre beprogramozott folyamatok alapján állítja elő, és nekünk csak a jegesedés erősségét és magasságát van lehetőségünk megadni.



**39. ábra. A Pitot-cső jegesedésének hatására történő sebességi adatvesztés repülés közben.**

Az 1400 m-es szinttől, ahol a felhőzet OVC mennyiségre nőtt, a látástávolság ennek megfelelően lecsökkent 100 m-re. Ekkor már kizárólag a műszereket lehetett csak navigálásra használni, a vizuális megfigyelés a kabinba beszűrődő rendkívül kevés fény miatt lehetetlen volt. Mivel a műszerek tökéletes láthatósága kiemelten fontos volt, így fel kellett kapcsolni a kabin és a műszerek világítását.

Folytatva a süllyedést 1070 m-re a pilóta 280°-ra, majd 310°-ra fordította a repülőgépet, az ILS irányzás adójának megfelelően. A turbulencia miatt az ILS jel tartása nehézkes volt. A további süllyedéssel 350 m-es szintnél a repülőgép kijött az Ns felhőzetből, így a látástávolság hirtelen 3000 m-re emelkedett. Ez másodpercek alatt megtörtént. Ekkor pillantotta meg a pilóta a futópálya fényeit és bevezető fénysorát. Ezt a hirtelen átmenetet a 40. és a 41. ábra próbálja érzékeltetni. Az 40. ábrán még 100 m a látástávolság, a 41. ábrán pedig már 3000 m. Ezen még látszik a felhőzet alapja is. A felhőzetből kilépve a gép már nagyon közel volt a talajhoz, a küszöb és a repülőgép közötti ferdetávolság mindössze 6700 m volt. Ez már túl kevés bármilyen korrigálásra, amire esetleg szükség lenne. A Ns felhőzetből hulló havas eső miatt a futópályán megnövekedett kifizési idővel kellett számolni.



**40. ábra.** Ns felhőzetből való kilépés előtt a műszer szerinti magasságon  
(A magasságmérő beállítása: 29,90 Hg inch) (Valentini, 2011).



**41. ábra.** Ns felhőzetből való kilépés után, gyenge havas esőben (Valentini, 2011).

Összefoglalva: az adott szituációban a szél magassággal való megváltozásának nem volt nagy szerepe a repülésre. A szimulátorban megjelenő turbulencia kizárólag a felhőzet alapján lett generálva. A jegesedési helyzet viszont bonyolult feladat elé állította a pilótát. Elsősorban a már létrejött jegesedést kellett eltávolítania, majd a fellépő turbulencia okozta nehézségek ellenére kellett követnie az ILS jelet. Emellett a látástávolság lecsökkenése miatt kizárólag műszeres navigálás mellett kellett a repülést végrehajtania, miközben még e műszerek megvilágításáról is gondoskodnia kellett. A nehézséget növelte a sebességmérő többszöri meghibásodása az adott időjárási helyzetben bekövetkezett jegesedés miatt.

## 5. Összefoglalás

Dolgozatomban átfogó képet alkottam a repülésre egyik legveszélyesebb időjárási jelenségről, a jegesedésről mind meteorológiai mind a hajózó személyzet képzésének szempontjából. Részletesen bemutattam a jegesedés fizikai folyamatát és hatását a repülésre. Ezután egy konkrét repülő esemény során kialakuló jégakkréció típusára, mennyiségére és alaki tulajdonságára végeztem becslést. A felületi jegesedést termodinamikailag összetett folyamatok kormányozzák, amelyek eltérő erősséggel vesznek részt az akkréció kialakításában. A vizsgálatok kimutatták, hogy a repülési sebesség megváltozásával módosul a felületi jégbevonat intenzitása és alaki tulajdonsága. Meg kell jegyeznünk, hogy a dolgozatban megadott akkrécióra vonatkozó értékek kizárólag modellközelítések, amelyeket az egyszerűsítő körülményekkel és korlátokkal együtt kell értelmezni. *Lozowski* (1983) jégakkumulációs modelljének adaptálásával a jegesedés erősségének és formájának megadásán túl lehetővé vált a modellezett jegesedés intenzitásokat nemzetközileg elismert kategóriákba sorolni. A dolgozatban az FAA osztályozását alkalmaztuk.

A modellezés után a repülési környezet szimulátoros rekonstrukcióját végeztük el. Egy ferihegyi megközelítés segítségével az egyes meteorológiai elemek okozta veszélyeket mutattuk be. Megállapítható, hogy a jegesedést magában foglaló környezet komoly feladat elé állítja a pilótát, amelynek megoldása egyszerűbbé válhat a valóságban, ha már szimulációs környezetben szerzett tapasztalatokat.

Ezért a további céljaink közé tartozik egy adatbázis létrehozása, mely különböző meteorológiai szituációkat tartalmaz, amely érdekes lehet a pilóták képzése során.

Érdeemes lenne megvizsgálni, hogy a dolgozatban bemutatotthoz hasonló akkréciós modellt hogyan lehetne az előrejelzési rendszerbe illeszteni, a pontosabb jegesedési prognózisok készítése érdekében, ezzel is biztonságosabbá téve a repülést. (Természetesen, amennyiben valóban beépítésre kerülne egy ilyen jegesedés előrejelzési platform, akkor az osztályozási határokat érdemes az ICAO által megadott értékekre beállítani.)

A repülésre veszélyes időjárási jelenségek pontos leírásához és előrejelzéséhez még hosszú út vezet. A dolgozat egy komplett, modern jegesedés-előrejelzés alapjait rejti, a kívánt pontosság eléréséhez azonban érdemes több akkréciós modellt és numerikus modell-parametrizációt és platformot is vizsgálni valamint tesztelni.



## **6. Függelék**

## I. Függelék: *Tsao és Anderson (2005)* kísérleteinek kezdeti feltételei

A 2.3.1. fejezet 8. ábráján található modellezett jégalakokhoz tartozó környezeti és aerodinamikai feltételeket a 6. Táblázat tartalmazza (*Tsao and Anderson, 2005*).

Táblázatban szereplő jelölések:

$c$ :	szárnyszelvény húr hossza, ( <b>cm</b> )
$t_{st}$ :	statikus hőmérséklet ( <b>°C</b> )
$V$ :	áramlási sebesség ( <b>m/s</b> )
$MVD$ :	átlagos cseppátmérő ( <b><math>\mu\text{m}</math></b> )
$LWC$ :	folyékony víztartalom ( <b><math>\text{g/m}^3</math></b> )
$\tau$ :	akréción idő ( <b>min</b> )
$\beta_0$ :	ütközési hatékonyság a stagnációs pontra vonatkozóan (dimenziótlan)
$A_c$ :	akkumulációs paraméter (dimenziótlan)
$n_0$ :	stagnációs pontra vonatkozó fagyási frakció/arány (dimenziótlan)
$b$ :	relatív fűtési faktor (dimenziótlan)
$\Phi$ :	cseppek energia vezetési/szállítási paramétere ( <b>°C</b> )
$\theta$ :	potenciális hőmérséklet ( <b>°C</b> )
$Re$ :	modell Reynolds-száma (dimenziótlan)
$We$ :	cseppmérete és víztartalomra vonatkozó Weber-szám (dimenziótlan)
$We_c$ :	levegőtartalomra vonatkozó Weber-szám (dimenziótlan)
$We_L$ :	víztartalomra vonatkozó Weber-szám (dimenziótlan)

Dátum/ Futás	c	t <sub>st</sub>	V	MVD	LWC	τ	β <sub>0</sub>	β <sub>0Ac</sub>	n <sub>0</sub>	b	Φ	θ	Re	We	We <sub>c</sub>	We <sub>L</sub>
	cm	°C	m/s	μm	g/m <sup>3</sup>	min	%				°C	°C	10 <sup>4</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>3</sup>	10 <sup>6</sup>
5-3-03/8	91,4	-26	77	15	1,00	20,3	51,1	1,82	1,0	0,50	25,5	32,4	18,9	1,37	3,55	2,56
8-9-03/3	91,4	-21	77	15	0,50	40,8	51,1	1,82	1,0	0,25	20,6	26,9	18,1	1,36	3,42	2,61
10-10-02/6	91,4	-26	77	100	0,68	16,4	93,2	1,82	1,0	0,61	25,6	32,5	19,1	9,16	3,59	2,63
3-2-02/7	91,4	-26	77	100	0,68	16,4	93,2	1,81	1,0	0,61	25,7	32,6	19,1	9,16	3,59	2,63
10-12-02/2	53,3	-8	51	200	1,20	7,1	97,8	1,71	0,32	0,70	8,1	11,9	6,7	8,13	0,88	2,69
10-12-02/1	53,3	-6	51	40	1,13	10,8	84,0	2,44	0,28	0,57	6,1	9,0	6,6	1,62	0,87	2,68
10-10-02/4	91,4	-10	77	200	0,86	11,4	97,1	1,71	0,32	0,81	9,5	12,7	17,1	18,38	3,36	2,66
10-10-02/1	91,4	-8	77	20	1,15	17,0	61,1	3,39	0,27	0,68	7,3	9,7	16,8	1,82	3,30	2,63

6. Táblázat. NASA jégakkreciós kísérleteihez tartozó környezeti és aerodinamikai kezdeti feltételek (Tsao and Anderson, 2005).

## II. Függelék: OMSZ Napijelentés

### 2010. 03. 11. Országos Meteorológiai Szolgálat napi jelentésének B oldala

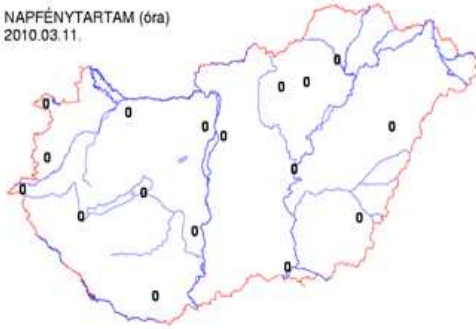
LEGMAGASABB HŐMÉRSÉKLET (°C)  
2010.03.11.



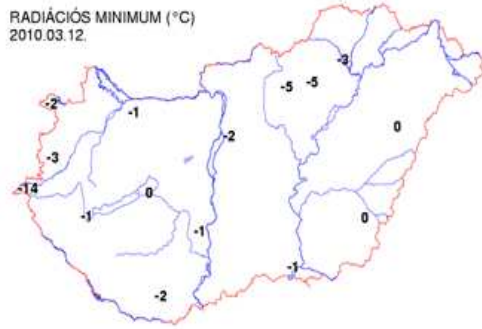
LEGALACSONYABB HŐMÉRSÉKLET (°C)  
2010.03.12.



NAPFÉNYTARTAM (óra)  
2010.03.11.



RADIÁCIÓS MINIMUM (°C)  
2010.03.12.



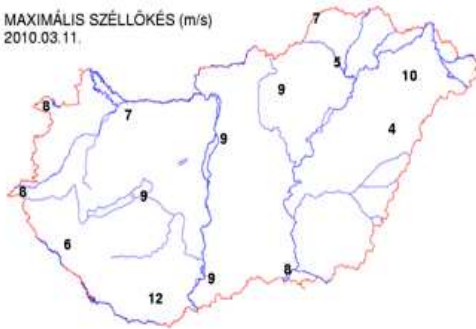
24 ÓRÁS CSAPADÉKÖSSZEG (mm)  
2010.03.11. 7h - 2010.03.12. 7h



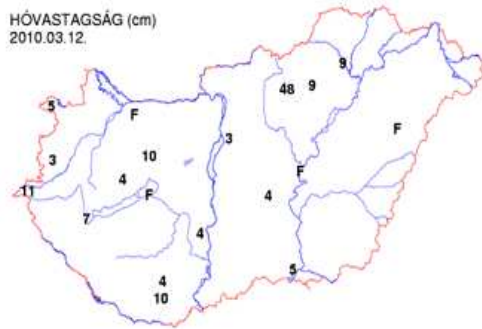
A CSAPADÉK FAJTÁJA  
2010.03.11. 7h - 2010.03.12. 7h



MAXIMÁLIS SZÉLLÖKÉS (m/s)  
2010.03.11.



HÓVASTAGSÁG (cm)  
2010.03.12.



### III. Függelék: WRF-ARW modell

A WRF modell (Weather Research and Forecasting Model) egy új, rendkívül hatékony, folyamatosan fejlődő univerzális eszköz, amely alkalmas a légköri folyamatok széles skálájának numerikus modellezésére.

Magasrendű diszkretizációs sémái, a modellegyenletekbe beépített nagyszámú kölcsönhatások, a széles skálán mozgó parametrizációs lehetőségek és a párhuzamosítási technikákat támogató szoftver struktúrája lehetőséget ad, hogy kutatási célokra is használható legyen, az operatív felhasználás mellett.

Az NCAR MMM<sup>1</sup>, NOAA NCEP<sup>2</sup>, NOAA FSL<sup>3</sup>, AFWA<sup>4</sup>, NRL<sup>5</sup>, CAPS<sup>6</sup>, FAA<sup>7</sup> és számos más egyetem bevonásával kifejlesztett univerzális modell. Méterestől az 1000 km-es karakterisztikus méretű folyamatok modellezésére alkalmas (Dudhia, 2001, 2006).

Két dinamikai alrendszerrel rendelkezik. Az első az NCAR által kifejlesztett Advanced Research WRF (ARW), amelyet elsősorban kutatási célokra használunk. Ennek magyarázata, hogy itt érhetőek el az idealizált esettanulmányok, regionális klímamodellezéshez szükséges kódkészletek és levegőkémiai kiegészítő rendszerek. (A dolgozat elkészítéséhez is ezt az alrendszert használtuk fel.) A másik megoldófelület a NCEP által kifejlesztett Nonhydrostatic Mesoscale Model ( WRF NMM ). Ezt főleg operatív célokra alkalmazzák (Skamarock et al., 2005).

#### III.1. Modell dinamika

A WRF modell két Euler-i és egy szemi-Lagrange-i megoldó-szegmenssel rendelkezik. A két Euleri között a különbség kizárólag a vertikális koordinátákban áll. Az egyik a geometriai magasságot veszi alapul, a másik pedig, tömeg/hidrosztatikus nyomást.

A modellben légköri folyamatokat leíró egyenletrendszer determinisztikus, ezért kezdeti feltétel szükséges ahhoz, hogy rendszer egy későbbi állapotát meghatározzuk. A kezdeti feltétel pontosságának nagy jelentősége van az előrejelzés pontosságánál, a

---

<sup>1</sup> Center for Atmospheric Research Mesoscale and Microscale Meteorology Division

<sup>2</sup> National Oceanic and Atmospheric Administration National Centers for Environmental Prediction

<sup>3</sup> Forecast System Laboratory

<sup>4</sup> Air Force Weather Agency

<sup>5</sup> Naval Research Laboratory

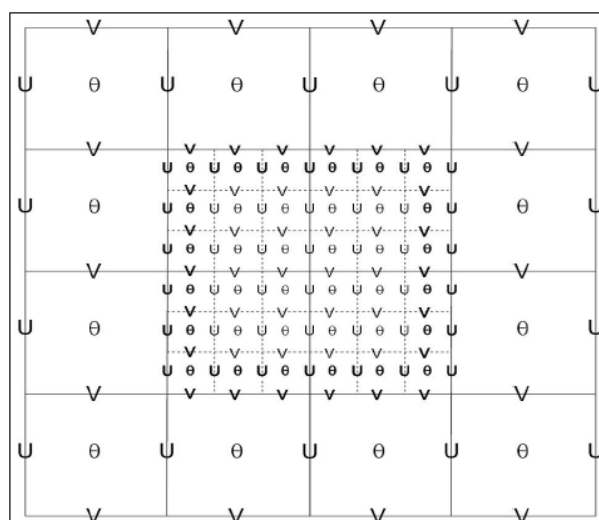
<sup>6</sup> Center for Analysis and Prediction of Storms

<sup>7</sup> Federal Aviation Administration

kezdeti állapotok pontosságán kívül fontos, hogy ezek konzisztensek legyenek. A first-guess mezők az adott rácpontokra szinoptikus meghajtó modellből állíthatók elő. Valós idejű előrejelzésnél mérési adatokat is figyelembe lehet venni. Ehhez a WRF- modell esetén a 4D variációs adatasszimilációt is alkalmazhatjuk.

A differenciálegyenlet megoldáshoz a kezdeti feltételek mellett peremfeltételeket is meg kell határozni. Mivel korlátos tartományú a modell így oldalsó határfeltételekre is szükség van az alsó és felső mellett. Így ezek meghatározása úgy történik, hogy minden pontban, minden állapotváltozóra létezik egy peremfeltétel. Így azonban túlhatározottá válik a feladat, aminek a megoldásában zajok keletkeznek, amiket ki kell szűrni. Ezt a kijelölt tartomány szélein található relaxációs zóna végzi el. A legszélső rácpontokba az adatok a meghajtó modellből (mint pl. GFS) egy egyszerű interpolációval kerülnek be. Alsó határ ott húzódik, ahol a szél horizontális komponensének függőleges gradiense zérus a legalsó szinten. A felső határfeltétel megadásához a szivacsréteg módszert alkalmazza a modell.

Az ARW modell lehetőséget ad horizontálisan beágyazott tartományok készítésére (42. ábra). A beágyazott tartománynak mindig párhuzamosnak kell lennie a 'mother-domain'-nel, és egy-egy beágyazott tartománynak csak egy 'mother-domain'-e lehet. A beágyazásoknak két fajtája van a tartományok közt lévő kölcsönhatások alapján: egyirányú és kétirányú (Michalakes et al., 2004). A 'mother-domain' és a beágyazott tartomány ráctávolságainak illetve időlépcsőinek hányadosa egész számot kell, hogy adjon. Így finomítható a felbontás (Wendl, 2009).



42. ábra. Beágyazott terület az Arakawa-C típusú eltolts rácsra  
 ( $\theta$  - egy tetszőleges skalármennyiség;  
 U,V - a szél zonális és meridionális komponense).

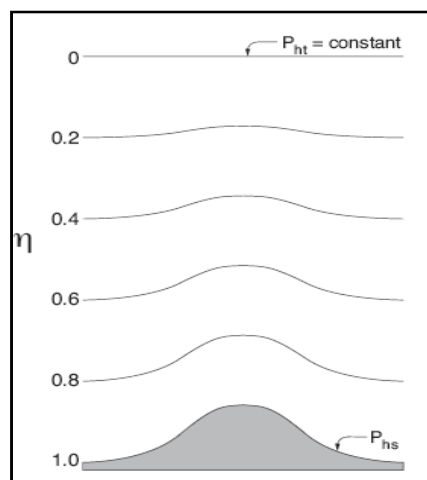
### III.2. Modell-egyenletek

Az ARW megoldó szegmens dinamikája a teljesen összenyomható légkörön, az Euleri nem-hidrosztatikus egyenleteken alapul, amelyek a hibrid  $\eta$ (éta)-koordináta rendszerbeli alakjukban szerepelnek. A modell hidrosztatikus opciókkal is rendelkezik. A  $\eta$  definíció szerint:

$$\eta = \frac{(p-p_t)}{(p_s-p_t)},$$

ahol  $p$  a nyomás hidrosztatikus rész,  $p_t$  és  $p_s$  pedig a modell tetején és a felszínen lévő nyomás.

A  $\eta$  értéke 0 (a felső határon) és 1 (a felszínen) között változhat. A  $\eta(x,y)$  mennyiség a modelltartomány  $(x,y)$  pontja fölött elhelyezkedő légoszlop egységnyi felületére eső tömeg. Felületei a talaj közelében felszínkövetőek, míg a felső légkörben párhuzamosok a nyomási felületekkel (43. ábra). A domborzatot egyszerű lépcsős függvényként veszi figyelembe, ami egyszerűsíti a számítást, viszont például hegyvidéki területeken csak sűrűbb térbeli rácsszerkezet alkalmazásával lehet megfelelően figyelembe venni a domborzatot. E koordináta-rendszer előnye, hogy a horizontális modell szintek közel párhuzamosak a nyomási szintekkel, ezáltal pontosabban kiszámítható a horizontális nyomási gradiens, az advekción, a sebességi mező és a horizontális divergencia. Így lehetőséget ad a modell a határrétegben zajló folyamatok és az inverziós szituációk pontosabb előrejelzésére.



43. ábra. A  $\eta$ -koordináta a WRF modellben.

A modell dinamikai leírásánál a hidro-termodinamikai-egyenletrendszer Euler-i fluxus alakjából indulunk ki.

$$\frac{\partial U}{\partial t} + (\nabla \cdot \bar{V}u) - \frac{\partial(p\phi_\eta)}{\partial x} + \frac{\partial(p\phi_x)}{\partial x} = F_U$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + (\nabla \cdot \bar{V}v) - \frac{\partial(p\phi_\eta)}{\partial y} + \frac{\partial(p\phi_y)}{\partial y} = F_V$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + (\nabla \cdot \bar{V}w) - g\left(\frac{\partial p}{\partial \eta} - \mu\right) = F_W$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + (\nabla \cdot \bar{V}\theta) = F_\theta$$

$$\frac{\partial \mu}{\partial t} + (\nabla \cdot \bar{V}) = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial t} + \frac{1}{\mu} [(\bar{V} \cdot \nabla \phi) - gW] = 0$$

$$\frac{\partial \phi}{\partial \eta} = -\alpha\mu$$

$$p = p_0 \left( \frac{R_d \theta}{p_0 \alpha} \right)^\gamma$$

ahol  $F_U, F_V, F_\theta$  a földforgásból, turbulens keveredésből, modellfizikából adódó kényszereket magába foglaló mennyiségek,  $\gamma=c_p/c_v=1,4$  a száraz levegő állandó nyomáson vett hőkapacitása és az állandó térfogaton vett hőkapacitásának aránya,  $R_d$  a száraz levegő gázállandója és  $p_0$  a referencia nyomás,  $U, V, W$  az x,y,z irányú sebességkomponensek,  $\theta$  potenciális hőmérséklet,  $\alpha$  specifikus térfogat,  $g$  a gravitációs gyorsulás és  $\phi$  geopotenciál. . Az itt alkalmazott változók alakja:

$$\bar{V} = \mu \bar{v} = (U, V, W) \quad \Omega = \mu \dot{\eta} \quad \Theta = \mu \theta$$

Eddig elhanyagoltuk a légköri nedvességtartalmát. A következő lépés, hogy ezt építsük bele az egyenletekbe. Ehhez szükséges, hogy definiáljuk a következő vertikális koordinátát:

$$\eta = \frac{(p_d - p_{at})}{\mu_d}$$



ahol  $\mu_d$  az adott légoszlopban lévő száraz levegő tömege,  $p_d$  a hidrosztatikus nyomás száraz légkörben és  $p_{dt}$  a hidrosztatikus nyomás a száraz légkör tetején. Ezen új vertikális koordináta bevezetésével a változók a következők alakot öltik:

$$\bar{V} = \mu_d \bar{v} \quad \Omega = \mu_d \dot{\eta} \quad \theta = \mu_d \theta$$

Ha ezen új változók alakját behelyettesítjük az előző alakjába az egyenletrendszerünknek, akkor megkapjuk a nedves levegőre vonatkozó Euleri-egyenletrendszert.

Az így felírt egyenletrendszerből azonban még hiányoznak a Coriolis-, görbületi hatások, valamint az alkalmazott térképvetület módosításai ( $m$ ) is, amely hatására a momentumváltozók alakja:

$$U = \frac{\mu_d u}{m} \quad V = \frac{\mu_d v}{m} \quad \Omega = \frac{\mu_d \dot{\eta}}{m},$$

ahol

$$m = \frac{(\Delta x, \Delta y)}{\text{földfelszíni távolság}}.$$

Ekkor ' $m$ ' a térképvetületi torzítás. Így ismét az egyenletek egy újabb alakjához jutunk, ahol a jobb oldalon álló mennyiségek már tartalmazzák a Coriolis- és görbületi-, valamint a keveredési kényszertagokat is.

Számításaink pontosítása érdekében a légköri hidro-termodinamikai egyenletrendszert a hullámmegoldások előállítására céljából a kis perturbációk módszerével linearizálni kell. Ehhez tegyük fel, hogy a légkörben zajló folyamatok az állapotváltozó mezőiben a mező átlagos eloszlásához viszonyítva csak kis eltéréseket eredményeznek. Ekkor a hidro-termodinamikai egyenletrendszer egyenleteiben szereplő állapotváltozó-mezőket felbonthatók az átlagos mezőkre, és az azokhoz viszonyítva kis perturbációk mezőinek az összegére (Práger, 1982).

$$p = \bar{p}(z) + p' \quad \phi = \bar{\phi}(z) + \phi' \quad \alpha = \bar{\alpha}(z) + \alpha' \quad \mu_d = \mu_d(x, y) + \mu_d'$$

Így olyan légköri hullámmozgásokat tudunk leírni, amelyek amplitúdója az állapotváltozó mezőiben lényegesen kisebb, mint ezen állapotváltozó mezők átlagos értékei a légkörben.

Ezeket felhasználva kapjuk a perturbált hidro-termodinamikai egyenletrendszert, ami a modell kormányzó egyenlete:

$$\frac{\partial U}{\partial t} + m \left[ \frac{\partial(Uu)}{\partial x} + \frac{\partial(Vu)}{\partial y} \right] + \frac{\partial(\Omega u)}{\partial \eta} + \left( \mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial x} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial x} \right) + \frac{\alpha}{\alpha_d} \left( \mu_d \frac{\partial \phi'}{\partial x} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial x} - \mu_d' \frac{\partial \phi}{\partial x} \right) = F_U$$

$$\frac{\partial V}{\partial t} + m \left[ \frac{\partial(Uv)}{\partial x} + \frac{\partial(Vv)}{\partial y} \right] + \frac{\partial(\Omega v)}{\partial \eta} + \left( \mu_d \alpha \frac{\partial p'}{\partial y} + \mu_d \alpha' \frac{\partial \bar{p}}{\partial y} \right) + \frac{\alpha}{\alpha_d} \left( \mu_d \frac{\partial \phi'}{\partial y} + \frac{\partial p'}{\partial \eta} \frac{\partial \phi}{\partial y} - \mu_d' \frac{\partial \phi}{\partial y} \right) = F_V$$

$$\frac{\partial W}{\partial t} + m \left[ \frac{\partial(Uw)}{\partial x} + \frac{\partial(Vw)}{\partial y} \right] + \frac{\partial(\Omega w)}{\partial \eta} - \frac{1}{m} g \frac{\alpha}{\alpha_d} \left[ \frac{\partial p'}{\partial \eta} - \bar{\mu}_d (q_v + q_c + q_r) \right] + \frac{1}{m} \mu_d' g = F_W$$

$$\frac{\partial \mu_d'}{\partial t} + m^2 \left[ \frac{\partial U}{\partial x} + \frac{\partial V}{\partial y} \right] + m \frac{\partial \Omega}{\partial \eta} = 0$$

$$\frac{\partial \phi'}{\partial t} + \frac{1}{\mu_d} \left[ m^2 (U \phi_x + V \phi_y) + m \Omega \phi_\eta - g W \right] = 0$$

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} + m^2 \left[ \frac{\partial(U\theta)}{\partial x} + \frac{\partial(V\theta)}{\partial y} \right] + m \frac{\partial(\Omega \theta)}{\partial \eta} = F_\theta$$

$$\frac{\partial Q_m}{\partial t} + m^2 \left[ \frac{\partial(Uq_m)}{\partial x} + \frac{\partial(Vq_m)}{\partial y} \right] + m \frac{\partial(\Omega q_m)}{\partial \eta} = F_{Q_m}$$

Most már a jobb oldalon található tagok tartalmazzák a Coriolis-, keverési- és fizikai parametrizációs hatást is (Skamarock et al., 2008).

A modellben vertikálisan egész és fél éta szintek is vannak definiálva. A fél szinteken a horizontális és vertikális szélkomponensek valamint a geopotenciál van definiálva, az egyéb skalármennyiségek, mint például a termodinamikai változók a rács középpontjában. A vertikális rácstávolság változik a magassággal. Nemcsak vertikálisan, de horizontálisan is eltolt ráccsal dolgozik a modell. Ez hasznos mivel csökkenti a véges differenciás numerikus séma hibáit, és javítja a diszperziós tulajdonságokat. Horizontális síkon a modell Arakawa-C típusú rácsot alkalmaz.

Az ARW megoldószegmens az adatok időbeli diszkretizációjára time-split sémát alkalmaz. Az alacsonyfrekvenciás módusokra 2-od vagy 3-ad rendű Runge-Kutta séma alkalmazható, míg a magas frekvenciájú akusztikus módusokra 2 séma lett alkalmazva. A horizontális irányú komponensek esetén forward-backward sémával, míg vertikálisan terjedő komponensére vertikális implicit sémával diszkretizál a modell. Látható tehát, hogy frekvencia szerint két nagy csoportba oszthatjuk a hullámokat. Ennek viszont az a következménye, hogy kétféle időlépcsőt kell definiálni a futtatáshoz. A  $\Delta t$  meghatározása az ún. Courant-szám és egy kiválasztott advekciós séma segítségével határozható meg. Az időbeli diszkretizáció során a modell 2-od és 6-od rendű sémát alkalmaz az advekcióra vonatkozóan (Wicker and Skamarock, 2002).

A futtatás esetén az időlépcsőt úgy választjuk meg, hogy az így kapott Courant-szám kisebb legyen az elméletileg kiszámoltnál. Gyakorlatban a pontos időlépcső

kiszámítását általában nem szokták végrehajtani, hanem a CFL-kritériumnak egy gyengített változatát alkalmazzák, ami kimondja, hogy az időlépcső kisebb vagy egyenlő legyen a kilométerben kifejezett rácstávolság hatszorosánál (emellett lehetőség van az ún. „adaptive time splitting” módszer alkalmazására is, mely esetén maga a modell állítja elő az adott feltételek melletti legnagyobb, még stabil időlépcső értékét és ezt használva végzi az integrálásokat).

Az akusztikus módusokra alkalmazott forward-backward séma esetében az akusztikus időlépcsőre azt kapjuk, hogy kisebbnek kell lennie, mint a rácstávolság kétszeresének és a hangsebességnek a hányadosa.

### **III.3. Modell parametrizációk**

A numerikus modellezés egyik sarkalatos elméleti problémája, hogy vannak olyan folyamatok, amelyek nem kapcsolhatók be közvetlenül a modellbe. Ennek az egyik oka, hogy azon folyamatok karakterisztikus mérete kisebb a modell térbeli rácsfelbontásánál, vagy nem ismerjük annyira, hogy pontosan le tudjuk írni. Az is előfordul, hogy ismert folyamatokat sem vezetünk be az egyenletrendszerbe, mert az annyira elbonyolítaná a modellt, hogy a számításigény megsokszorozódna. Így ezen folyamatok hatását parametrizációs eljárással vezethetjük be.

A parametrizáció lényege, hogy az adott meteorológiai folyamatnak és a légkör-felszín közti legfontosabb kölcsönhatásoknak a modell által expliciten leírt hidrodinamikai folyamatokra gyakorolt összegzett hatását írja le. A parametrizációs eljárások közé tartozik például egy hatás statisztikai átlagértékének figyelembe vétele, vagy valamilyen matematikai algoritmus használata is (*Práger, 1992*).

A WRF modellnek hat parametrizációs csoportja van: diffúzió, mikrofizikai, cumulus, planetáris határréteg, légköri sugárzás és felszín-légkör kölcsönhatás parametrizáció. Minden kategórián belül számos séma található a legegyszerűbbtől a nagyon bonyolultig és költségesig. Lehetőség van az egyes csoportok sémáinak kombinálására.

A mikrofizikai folyamatok parametrizációjánál meghatározott számú hidrometeorot különítenek el méret és halmazállapot alapján. Ezen méreteloszlások egy folytonos függvénnyel közelíthetők, amiben megjelenik a keverési aránytól függő paraméter is. A megmaradási egyenletben lévő forrástagok leírhatók a keverési arány függvényében (*Geresdi, 2004*). Az ARW aktuális 3.0 verziója az adott időlépcső után hívja meg a mikrofizikai parametrizációt, mivel a mikrofizikai folyamatok érzékenyek az időlépcsőn belüli változásokra. A különböző fázisban lévő hidrometeorok

figyelembevételének függvényében kilenc sémát dolgoztak ki. Ezek közé tartozik a Kessler-séma (*Kessler, 1969*), Purdue Lin séma (*Chen and Sun, 2002*), WRF Single-Moment mikrofizikai séma (WSM3, WSM5, WSM6) (*Hong et al., 2004*), 'Eta Grid-scale Cloud and Precipitation' séma (<http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/mmbp/eta12tpb/>), Thompson et al. séma (*Thompson et al., 2004; Hall et al., 2005*), Goddard-séma (*Tao et al., 1989*), 'Morrison double moment' séma.

A Kessler-séma kivételével, ami egy melegfelhő séma, azaz vízgőzt, felhővizet és esővizet tartalmaz, mindegyik tartalmazza a jég és/vagy graupel fázist is.

Ha a rácstávolság 10 km alatt van, akkor kevert fázisú sémákat is figyelembe vevő sémákat kell alkalmazni, mivel olykor erőteljes feláramlásra is lehet számítani.

A modellezés során gyakran szükség van a konvektív folyamatok figyelembevételére, mivel ezek felelősek a légkör vertikális hőmérsékleti rétegződésben a légköri folyamatok során kialakuló instabilitások lebontásáért. Ezen parametrizáció akkor jut a legnagyobb szerephez, ha a rácstávolság nagyobb mint 10 km. A WRF modellben négy séma van beépítve: Kain-Fritsch (régi) (*Kain and Fritsch, 1990*), Betts-Miller-Janjic séma (*Janjic, 1994, 2000; Betts, 1986; Betts and Miller, 1986*), Kain-Fritsch séma (*Kain and Fritsch, 1993*), Grell-Devenyi séma (*Grell and Devenyi, 2002*), Grell 3D ensemble séma.

Ezek megbízhatók a konvektív és sekély felhők sub-grid skálájú folyamatai esetében, jól visszaadják a vertikális fluxust és a kiegyenlítő hatásokat a felhőkön kívül. Néhány séma felhő és csapadék tendenciákat is ad a légoszlopban.

A planetáris határréteg megbízható a vertikális sub-grid skálájú fluxusok vizsgálatánál, ami az örvények transzportjának köszönhető a légoszlopban, nem csak a határrétegben.

A planetáris határréteg a légkör azon alsó rétege, amelyre a felszín közvetlen mechanikai és termikus kényszerként hat, ez megközelítőleg 1 km vastag (évszakosan változó). Ezen rétegben vannak a turbulens örvények, amelyek felelősek a hő, momentum és nedvesség szállításért a felszíntől a felsőbb légrétegekig. A PBL-parametrizáció feladata, hogy a talajséma és a felszíni közeli réteg séma által megadott hő-, momentum-, és nedvességáram felhasználásával áram-profilokat határozzon meg, ezzel előállítva hőmérséklet, légnedvesség és szélprofilokat. Ehhez többféle közelítés áll a rendelkezésünkre mint például a Medium Range Forecast Model (MRF) (*Hong and Pan, 1996*), a Yonsei University által kidolgozott séma (YSU)

(Rode *et al.*, 2003), a Mellor-Yamada-Janjic (MYJ) (Janjic, 1990, 1996, 2002; Mellor and Yamada, 1982) és az Aszimmetrikus Konvektív Keveredési Modell (ACM2) (Pleim *et al.*, 1992).

A sémák 1D-ek és azt feltételezik, hogy van egy skála szeparáció a sub-grid örvények és a légkörben fellelhető egyéb örvények között. Ez a feltételezés már nem korrekt a 100 m alatti gridtávolságok esetén. Ebben az esetben a sémák helyettesíthetők egy 3D lokális sub-grid turbulencia sémával mint például a TKE diffúziós séma (Mellor *et al.*, 1982).

A planetáris határreteg parametrizációjához szükség van arra, hogy adott legyen hő-, momentum-, és nedvességáram, amelyeket a szárazföldi felszín és a felszín-közeli réteg parametrizálásával állít elő a modell.

A felszín-közeli réteg vagy Prandtl-réteg, a planetáris határreteg felszín fölött elhelyezkedő 20-50 m vastag rétege, amelyben a hő-, nedvesség- és momentum-áramok állandók. Ebben a csoportban számítja ki a modell a súrlódási sebességet és a kicserélődési együtthatókat. A parametrizációk nagy része hasonlósági elméleteken alapul. Ezek közül a leggyakrabban alkalmazott a Monin-Obukhov-féle hasonlósági elmélet (Monin and Obukhov, 1954). Ehhez tartozik egy MM5 és egy Eta hasonlósági elmélet (Janjic, 1996, 2002). Az egyes sémákat csak megadott planetáris határreteg parametrizációs sémákkal lehet együtt alkalmazni.

A felszíni réteg parametrizáció mellett szükség van felszíni sémákra (land surface), amelyek a tényleges felszínt írják le, azaz a modell alsó határfeltételeit adják. Ezen sémák nagyon érzékenyek a modell többi parametrizációjára. Például bemenő adatként felhasználják a sugárzási adatokat, a felszíni réteg tulajdonságait, illetve az egyéb parametrizációkkal előállított csapadékot. Kezeli a vegetáció létét. A modellben rendelkezésre álló felszíni parametrizációk közé tartozik az 5 rétegű termikus diffúziós séma, a Noah LSM (Chen and Dudhia, 2001), a Rapid Update Cycle Model LSM (RUC) (Smirnova *et al.*, 1997, 2000) és a Pleim-Xiu séma.

A szomszédos pontok között nincs kapcsolat, így a modell 1D oszlopmodellként kezelhető. A futtatás során a hőmérsékleti és nedvességi értékek változnak. A modell alja a talajban található.

A sugárzás parametrizációjára mindig szükség van. A parametrizáció során itt is fluxust szeretnénk kapni, amit így más parametrizációk fel tudnak használni meghajtóként. A fluxusok a sugárzás átviteli egyenletből számíthatók ki. Azonban ebben az egyenletben szerepelnek forrás és nyelő tagok, amelyeket nem megfigyelési

adatokkal adunk meg, hanem parametrizáljuk őket. A forrás és nyelő tagok függenek a légköri gázok és aeroszolok mennyiségétől és térbeli eloszlásától, ezért végülis ezek parametrizációit használjuk.

A WRF modellben három hosszuhullámú (Rapid Radiative Transfer Modell (RRTM) (*Mlawer et al.*, 1997); Eta Geophysical Fluid Dynamics Laboratory-Longwave (GFDL LW) (*Fels and Schwarzkopf*, 1975; 1991); CAM ) és négy rövidhullámú sugárzásra vonatkozó séma (GFDL SW (*Lacis and Hansen*, 1974); MM5 (Dudhia) SW (*Dudhia*, 1989); Goddard SW (*Chou and Suarez*, 1994); CAM ) található. Minden sugárzási séma a WRF-ben 1D oszlop-séma. Így minden oszlop függetlenül van kezelve.

A WRF modell a planetáris határrétegben végbemenő diffúziót kétféle parametrizációs eljárással tudja leírni. Az egyik a diffúziós séma és a másik a K-séma. A K-val jelölt turbulens diffúziós együtthatók parametrizálására négy lehetőség van, attól függően, hogy a K konstans vagy nem. A turbulens diffúzió számításánál az is megadható a módszeren kívül, hogy milyen vertikális koordináták legyenek. A számítás elvégezhető a modell koordinátafelületein vagy a fizikai térben is. Ha a fizikai térben, azaz pl. Descartes-rendszerben értelmezzük a diffúziót, akkor rácspontokon dolgozunk. Ez a mód számításigényesebb, de pontosabb diffúziót állít elő.

## IV. Függelék: Repülőgép-szimulátor

### IV.1. A repülőgép-szimulátor térhódításának rövid történeti áttekintése

Már az I. világháború előtt elkezdődött a földbázisú repülőgép utánpótlás alkalmazása. 1909-ben az Antoinett monoplane pilótafülkéjét helyezték rá egy félbevágott hordóra, amelyhez fából készült rudak lettek rögzítve. Ezek segítségével két asszisztens tudta kívülről forgatni és dönteni az eszközt, annak függvényében, ahogy a pilóta irányította a két kormánykerékkel, amelyek a jobb illetve bal oldalán voltak elhelyezve az ülésnek. Az egyik a fordulást a másik a dőlést vezérelte. Ez a kiképző eszköz volt az ún. „Antoinette Barrel Trainer” (44. ábra).



44. ábra. Antoinette Barrel Trainer  
([http://en.wikipedia.org/wiki/Flight\\_simulator](http://en.wikipedia.org/wiki/Flight_simulator)).

Az I. világháború alatt számos az Antoinette Barrel Trainer-hez hasonló illetve attól már fejlettebb eszközt alkalmaztak. Ilyen volt például az 1915-ben használatos első mozgó/ringó pilótafülkével rendelkező kiképző modell, majd később a „Ruggles Orientator”. A háború alatt a kiképzés nagyon fontos része volt az modelleken való gyakorlás. Nemcsak a repülőgép irányításának illetve a manőverek elsajátítása miatt, hanem az ún. „Air Gunnery” képzés miatt is, ami a mozgó állapotból, mozgó célra történő tüzelést jelentette.

Az I. világháború után Edwin Albert Link megépítette az első elektromotorral meghajtott pneumatikus mozgó platformmal rendelkező szimulátort, a „Link Trainer”-t (45. ábra).



**45. ábra. Link Trainer (1929)**  
([http://en.wikipedia.org/wiki/Flight\\_simulator](http://en.wikipedia.org/wiki/Flight_simulator)).

Kinézete miatt „Blue Bokszt” néven vált ismertté. Alkalmas volt a műszerek, rádióhasználat és kormányzás megismertetésére. Itt még a meteorológiai körülmények beépítésére nem volt lehetőség. A II. világháború alatt pilóták tízezrei lettek a szimulátor segítségével kiképezve. A növekvő igény miatt, új tökéletesített szimulátorokat is kifejlesztettek. Ezek közé tartozott például a Halifax bombázó elülső repülőgép törzséből álló eszköz, amely egy analóg rendszeren keresztül mesterséges ellenállást biztosít, amikor a pilóta a botkormányt mozgatta. Ez volt a „Silloth Trainer”(Gabbai).

Az 1940-es években a navigációs legénység képzésének érdekében is jelentek meg szimulátorok, amelyek lehetőséget adtak az éjszakai égbolton való tájékozódás megismeréséhez. Ilyen volt például az 1941-ben kialakított 13,7 m magas „Celestial Navigacion Trainer”.

A világháború vége nem jelentette a szimulátorok fejlesztésének a végét. 1948-ban a Pan American World Airways légitársaságnál elsőként jelent meg a Boeing 377 Stratocruiser szállító repülőgép szimulátor. Nem volt mozgató rendszere, de a pilótafülkében található műszereken megjelentek a válaszok a pilóta által végrehajtott manőverre. 1957-ben megjelent az első DC-8-as szimulátor, amely már hidraulikus mozgató rendszerrel és televíziós-képernyővel rendelkezett.

Az 1970-es években a számítástechnika kialakulása révén, már számítógéppel generált képet felhasználó szimulátorokat alkalmaztak.

A '70-es évek óta tartó olajár-robbanás miatt, a szimulátorok napjainkban is a repülőképzés és ellenőrzés kiemelten fontos eszközei lettek (<http://gabbai.com/academic/the-art-of-flight-simulation>).



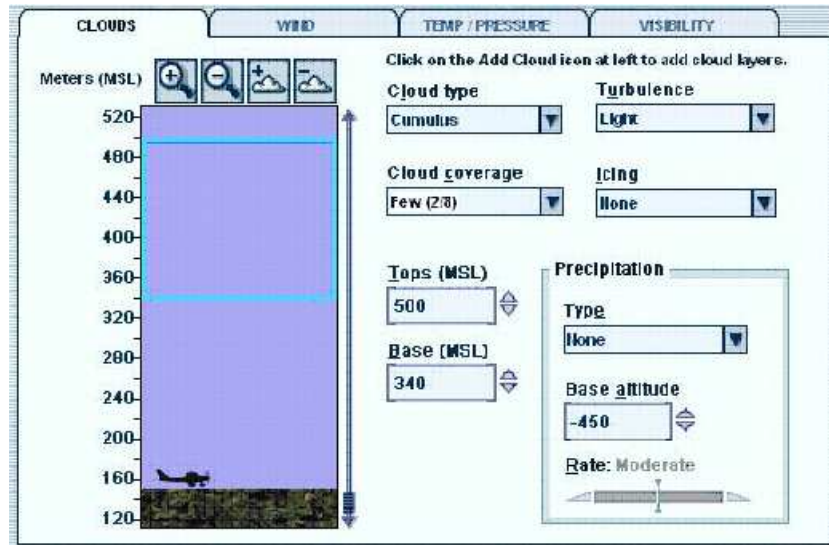
„Napjainkban a repülőgép-szimulátor alatt egy adott repülőgép pilótakabinjának olyan utánpótlását értjük, amely műszerezettség, az eredeti pilótakabinnal megegyező felszereltsége, hang-és képgeneráló rendszere és többdimenziós mozgásképesége alapján repülőgép-vezetők kiképzésére, valamint repüléstechnikai gyakorló feladatok végrehajtására alkalmazható. Felszereltsége lehetővé teszi minden repülési szakasz: felszállás, emelkedés, vízszintes repülés, süllyedés, leszállás, továbbá a meghibásodások reprodukálását is” (Szabadi, 2010).

A rendszer több hardverből áll, amik modellezik a valóságot minden részletével együtt. Vannak olyan szimulátorok, amelyek PC-n is futtathatók, és léteznek olyanok is, amelyekhez egy komplett pilótakabin is tartozik.

## **IV.2. A meteorológiai paraméterek bevitele**

### ***1. A felhőzet megadása***

A felhőzetet a meteorológiai adatbevitel első oldalán lehet megadni (46. ábra). Különböző rétegekre tudjuk betáplálni az adatokat. Az adott rétegre vonatkozóan megszabhatjuk a felhőzet típusát (Cloud type), amely lehet Cu, Ci, St és Cb (thunderstorm). Ezután következik az adott rétegre vonatkozó borultság megadása oktában. Lehet gyengén felhős (1-2okta-few), szórványos (3-4 okta-scattered), szakadozott (5-7 okta-broken) és teljes borultság (8 okta-overcast). Ha nem viszünk fel felhőréteget, akkor itt ki lehet választani a tiszta égbolt típust (0 okta-sky clear). A következő karakterisztika a numerikusan megadott felhőalap magassága és a felhőtető magassága. Meghatározható ezen túlmenően, a felhőzetben fellépő turbulencia erőssége, amely lehet gyenge (light), közepes (moderate), intenzív (heavy) és erős (severe), de azt is jelezhetjük, hogy nem lép fel turbulencia (none). A felhőzetbe való berepülés jellemző veszélye a jegesedés (icing), amelyre beállítható, a nincs (none), nyomokban (trace), gyenge (light), közepes (moderate) és erős (severe) intenzitás. Az utolsó módosítható opció a csapadék (precipitation). Itt megadható a csapadék típusa (hó-(snow) vagy eső-(rain)), a csapadékvastagsága a legkisebb magasságának a megadásával és az intenzitásával (nagyon gyenge- (very light), gyenge- (light), közepes- (moderate), erős- (heavy) és nagyon erős- (very heavy)).



46. ábra. Felhőzetre vonatkozó adatbeviteli panel (Szabadi, 2010).

## 2. A szél megadása

A szél jellemzőit a második adatbeviteli oldalon adhatjuk meg diszkrét vertikális profil formában, a talajmenti szélről egészen a magas légköri áramlatokig (47. ábra). Az első paraméter, amit megadhatunk a szélréteg magassága (altitude), ez alatt bevihető a szélsébség csomóban. Mivel a szélsébség átlagértékénél jelentősebb, ún. széllökés is előfordulhat, így ezt is megjeleníthetjük (gusting). A szél irányát is meg tudjuk adni 1°-os pontossággal egy fő égtájakat jelölő szélrózsa-ábrán.

Ezen a panelen is meg kell adni a turbulencia erősségét, amely lehet zéró (none), gyenge (light), közepes (moderate), erős (heavy) és nagyon erős (severe). Még egy fontos szélkarakterisztikát lehet beállítani, ami a szélnyírás. A beállítható értékek az enyhe (gradual), közepes (moderate), erős (steep) és a nagyon erős (sharp).



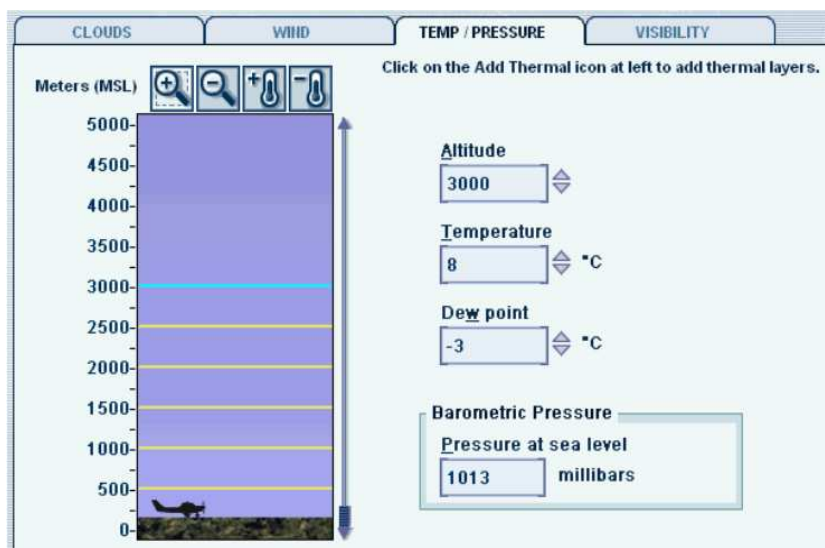
47. ábra. Szél karakterisztikák beviteli panelje (Szabadi, 2010).

### 3. Hőmérsékleti és légnyomás értékek bevitele

A harmadik oldalon a hőmérsékleti értékeket 20 méteres vertikális pontossággal meg lehet adni (48. ábra). Így lehetőség van egy elég valóságos vertikális hőmérsékleti profil előállítására. Ennek nagy jelentősége van a repülés során, mivel ha a nyomást is ismerjük, akkor meg lehet határozni a levegő sűrűségét, ami pl. az áramló levegő dinamikus nyomását befolyásolja és a nyomásmérésen alapuló magasságmeghatározásban is fontos szerepe van.

A felszíntől elindulva meg kell adni az adott hőmérsékleti réteg magasságát (altitude), amellyel megadtuk az izoterm réteg vastagságát. Ezután a hőmérsékleti és a harmatpont értékét adhatjuk meg, 1 °C-os pontossággal.

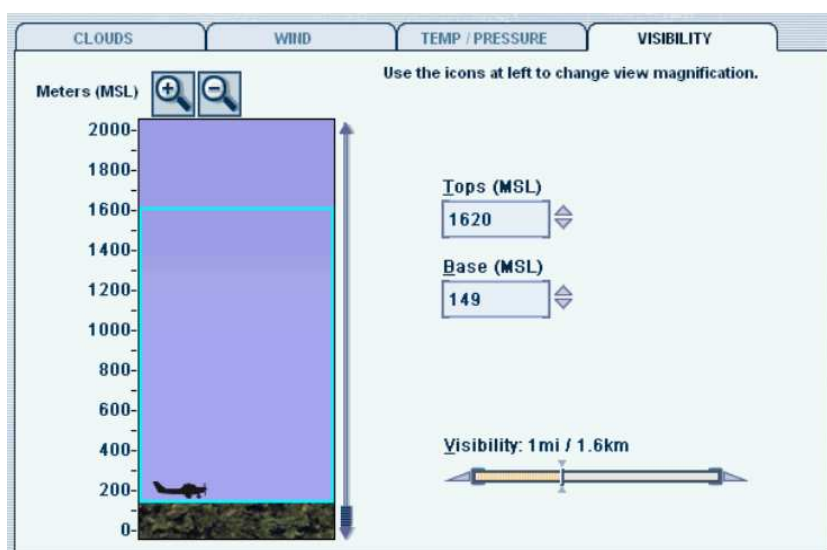
A korrekt magasságméréshez szükséges tengerszintre korrigált légnyomás értékét (QNH) is meg kell adnunk, mely értéket szintén ezen a panelen állíthatunk be.



48. ábra. Hőmérsékleti és nyomási adatok beviteli felülete (Szabadi, 2010).

#### 4. Látástávolság bevitele

Az utolsó oldal lehetőséget ad a horizontális (meteorológiai) látástávolság beállításához (49. ábra). Elsőként meg kell adni a réteg tetejének (top) és aljának (base) a tengerszint feletti magasságát (MSL), amely rétegben azonos látástávolsággal dolgozik a rendszer. Ezután beállítható a látástávolság értéke, ami a következő értékeket veheti fel: 100 m, 200 m, 400 m, 800 m, 1200 m, 1600 m, 3200 m, 4800 m, 8 km, 16 km, 32 km, 48 km, 64 km, 80 km és korlátlan (unlimited). Itt is lehetőségünk van több szintben megadni a látástávolság értékeket.



49. ábra. Látástávolság beviteli panelje (Bottyán és Szabadi, 2010).

## 7. Irodalomjegyzék

- Achenbach, F., 1977: The effect of surface roughness on the heat transfer from circular cylinders to the cross flow of air. *Int. J. Heat Mass Transfer*, **20**, 359-369.
- Anderson, J. D.: Fundamentals of Aerodynamics, McGraw-Hill, New York, 2001.
- Bottyán, Zs., 2009: Gondolatok a Repülőgépszimulátorok meteorológiai alrendszerének szerepéről, *Repüléstudományi közlemények*, XXI. Évf. I. Szám.
- Bottyán, Zs., 2011: Estimation of structural icing intensity and geometry of aircrafts during different conditions - a fixed-wing approach, *Időjárás*, **115**, (accepted).
- Bottyán, Zs. és Hadobács, K., 2011: A repülőgépek felületi jegesedésének termodinamikai folyamatairól, *Repüléstudományi Közlemény*, XXIII.Évf., Különszám
- Bottyán, Zs. és Palik, M., 2010: The accident of AF-447 flight – analysis and reconstruction of weather situation along the flight path, *AARMS*, **9**, 217-227.
- Bottyán, Zs. és Szabadi, V., 2010: A meteorológiai látástávolság értékének megbízhatósági vizsgálata a Magyar Honvédség Összhaderőnemi Parancsnokság helikopter-szimulátorában, *Hadmérnök*, **5**, 286-297.
- Bragg, M.B., Broeren, A.P. and Blumenthal, L.A., 2005: Iced-airfoil aerodynamics, *Progress in Aerospace Sciences*, **41**, 323-362.
- Bragg, M.B., Hutchison, T., Merret, J., Oltman, R. and Pokhariyal, D., 2000: Effect of Ice Accretion on Aircraft Flight Dynamics, *38th AIAA Aerospace Sciences Meeting & Exhibit January 10-13, 2000/Reno, USA*, AIAA 2000-0360
- Betts, A. K., and Miller, M. J., 1986: A new convective adjustment scheme. Part II: Single column tests using, GATE wave, BOMEX, and arctic air-mass data sets. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, **112**, 693-709.
- Cansdale, J. T. and Gent, R. W., 1983: Ice accretion on airfoils in two-dimensional compressible flow: a theoretical model. *Royal Aircraft Establishment Technical Report 82128*.
- Chen, F., and Dudhia, J., 2001: Coupling an advanced land-surface/Hydrology model with the Penn State/NCAR MM5 modeling system. Part I: Model description and implementation. *Monthl Weather Review*, **129**, 569-585.
- Chen, S.-H., and Sun, W.-Y., 2002: A one-dimensional time dependent cloud model. *Journal of the Meteorological Society of Japan*, **80**, 99-118.

- Chou, M.-D., and Suarez, M. J., 1994: An efficient thermal infrared radiation parametrization for use in general circulation models. *NASA Technical Memorandum. 104606*, Technical Report Series on Global Modelling and Data Assimilation, **3**, 85pp.
- Cober, S.G., Isacc, G.A. and Strapp, J.W., 2001: Characterizations of Aircraft Icing Environments that Include Supercooled Large Drops, *Journal of Applied Meteorology*, **40**, 1984-2002.
- Dudhia, J., 1989: Numerical study of convection observed during the winter monsoon experiment using a mesoscale two-dimensional model, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **46**, 3077-3107.
- Fels, S. B., and Schwarzkopf, M. D., 1975: The Simplified Exchange Approximation: A New Method for Radiative Transfer Calculations, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **32**, 1475-1488.
- Finstad, K. J., Lozowski, E. P., Makkonen, L., 1988: On the median volume diameter approximation for droplet collision efficiency. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **45**, 4008-4012.
- Fuchs, W., 2003: Forecast of Aircraft Icing by Use of Boundary Layer Model Products: First Experiences, *Proceedings of The Thirteenth (2003) International Offshore and Polar Engineering Conference*, Honolulu, 423-428.
- Gabbai, J., 2001: The Art of Flight Simulation  
*Internetes elérhetőség:*  
<http://gabbai.com/academic/the-art-of-flight-simulation>
- Gent, R. W., 1995: A computer program for the detailed design and assessment of electrothermal rotor ice protection systems. Defence *Research Agency Technical Report DRA/AS/STD/TR95027/1*.
- Gent, R. W., and Beauchamp, A. R., 1987: Measurement of drag increase due to ice accretion on aerfoils of NACA0012 and RAE9645 section. *REA Technical Report 87013*.
- Gent, R.W., Dart, N. P., and Cansdale, J. T., 2000: Aircraft icing, *The Royal Society*, **358**, 2873-2911.
- Geresdi, I., 2004: Felhőfizika, Dialog Campus Kiadó
- Grell, G. A. and Devenyi, D., 2002: A generalized approach to parameterizing convection combining ensemble and data assimilation techniques. *Geophysical Research Letters*, **29(14)**, Article 1693.

- Hall, W.D., Rasmussen, R.M. and Thompson, G., 2005: The New Thompson Microphysical Scheme in WRF, *WRF/MM5 Users' Workshop-June 2005*.
- Hong, S.-Y., and Pan, H.-L., 1996: Nonlocal boundary layer vertical diffusion in a medium-range forecast model, *Monthly Weather Review*, **124**, 2322-2339.
- Hong, S.-Y., Dudhia, J., and Chen, S.-H., 2004: A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parametrization of Clouds and Precipitation, *Monthly Weather Review*, **132**, 103-120.
- ICAO, 2007: Meteorological Service for International Air Navigation, Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation  
*Internetes elérhetőség:*  
<http://www.icao.int/>
- Ikeda, K., Rasmussen, R., Liu, C., Thompson, G. and Xue, L., 2008: Investigation of the Dependence of Squell Line Structure and Dynamics on Microphysical Parametrization. *15th International. Conference on Clouds and Precipitation, Cancun, MX, International Association of Meteorology an Atmospheric Science*
- Janjic, Z. I., 1990: The step-mountain coordinate: physical package, *Monthly Weather Review*, **118**, 1429-1443.
- Janjic, Z. I., 1994: The step-mountain eta coordinate model: further developments of the convection, viscous sublayer and turbulence closure schemes, *Monthly Weather Review*, **122**, 927-945.
- Janjic, Z. I., 1996: The surface layer in the NCEP Eta Model, Eleventh Conference on Numerical Weather Prediction, Norfolk, VA, 19-23 August; *American Meteorological Society*, 354-355.
- Janjic, Z. I., 2000: Coments on „Development and Evaluation of a Convection Scheme for Use in Climate Models”, *Journal of the Atmospheric Sciences.*, **57**, p. 3686.
- Janjic, Z. I., 2002: Nonsingular Implementation of the Mellor-Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model, *NCEP Office Note*, **437**.
- Jeck, R., 1998: A workable, aircraft-specific icing severity scheme. Appendix A. *Preprints of AIAA-98-0094. 36th Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Reno, USA*, 1-12.
- Kain J. S., and Fritsch J. M., 1990: A one-dimensional entraining/detraining plume model and its application in convective parametrization, *Journal of the Atmospheric Sciences*, **47**, 2784-2802.

- Kain, J. S., and Fritsch, J. M., 1993: Convective parametrization for mesoscale models: The Kain-Fritsch scheme, The representation of cumulus convection in numerical models, K. A. Emanuel and D. J. Raymond, Eds., *American Meteorological Society*, 246 pp.
- Kessler, E., 1969: On the distribution and continuity of water substance in atmospheric circulation, *Meteor. Monogr.*, 32, *American Meteorological Society*, 84 pp.
- Lacis, A. A., and Hansen, J. E., 1974: A parametrization for the absorption of solar radiation in the earth's atmosphere. *Journal of the Atmospheric Sciences*, **31**, 118-133.
- Lankford, T., T., 2001: Aviation Weather Handbook. McGraw-Hill. New York. USA.
- Launiainen, J. and Lyyra, M., 1986a: Icing On a Non-rotating Cylinder Under Conditions of High Liquid Water Content In The Air : I. Form and Size of Ice Deposits, *Journal of Glaciology*, **32**, 6-11.
- Launiainen, J. and Lyyra, M., 1986b: Icing on a non-rotating cylinder under conditions of high liquid water content in the air: II. Heat transfer and rate of ice growth, *Journal of Glaciology*, **32**, 12-19.
- List, R., 1977: Ice Accretions On Structures, *Journal of Glaciology*, **19**, 451-465.
- Lozowski, E. P. and d'Amours, 1980: A time-dependent numerical model for spherically symmetric hailstone growth thermodynamics under constant ambient conditions., *Journal of the Atmospheric Sciences*, **37**, 1808-1820.
- Lozowski, E.P., Stallabrass, J.R. and Hearty, P.F., 1983a: The Icing of an Unheated, Nonrotating Cylinder. Part I: A Simulation Model, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **22**, 2053-2062.
- Lozowski, E.P., Stallabrass, J.R. and Hearty, P.F., 1983b: The Icing of an Unheated, Nonrotating Cylinder. Part I: Icing Wind Tunnel Experiments, *Journal of Climate and Applied Meteorology*, **22**, 2053-2062.
- Ludlam, F.H., 1951: The heat economy of a rimed cylinder, 663-666.
- Makkonen, L., 1981: Estimating Intensity of Atmospheric Ice Accretion on Stationary Structures, *Journal of Applied Meteorology*, **20**, 595-600.
- Makkonen, L. and Stallabrass, J.R., 1987: Experiments on the Cloud Droplet Collision Efficiency of Cylinders, *Journal of Climate and Applied Meteorology* , **26**, 1406-1411.
- Mazin, I.P., Korolev, A.V., Heymsfield, A., Isaac, G.A. and Cober, S.G., 2001: Thermodynamics of Icing Cylinder for Measurements of Liquid Water Content



- in Supercooled Clouds, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, **18**, 543-558.
- Mellor, G. L. and Yamada, T., 1982: Development of a turbulence closure model for geophysical fluid problems, *Reviews of Geophysics and Space Physics*, **20**, 851-875.
- Messinger, B. L., 1953: Equilibrium temperature on an unheated icing surface as a function of airspeed, *Journal of the Aeronautical Sciences*, **20**, 29-41.
- Michalakes, J., Dudhia, J., Gill, D., Henderson, T., Klemp, J., Skamarock, W. and Wang, W., 2004: The Weather Research and Forecast Model: Software Architecture and Performance. To appear in proceeding of *the Eleventh ECMWF Workshop on the Use of High Performance Computing in Meteorology*. 25-29 October 2004, Reading, U.K., Ed. George Mozdzynski.
- Mlawer, E. J., Taubman, S. J., Brown, P. D., Iacono, M. J. and Clough, S. A., 1997: Radiative transfer for inhomogeneous atmosphere: RRTM, a validated correlated-k model for the long-wave. *Journal of Geophysical Research*, **102**, 16663-16682.
- Monin, A. S. and Obukhov, A. M., 1954: Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere. *Contributions of the Geophysical Institute of the Slovak Academy of Sciences, USSR*, **151**, 163-187.
- Myers, T. G. and Hamond, D. W., 1999: Ice and water film growth from incoming supercooled droplets. *International Journal of Heat Mass Transfer*, **42**, 2233-2242.
- Práger, T., 1982: Numerikus prognosztika I. A hidrodinamikai előrejelzés elmélete. *Tankönyvkiadó*, Budapest
- Rajeevan, M., Kesarkar, A., Thampi, S.B., Rao, T.N., Radhakrishna, B. and Rajasekhar, M., 2010: Sensitivity of WRF cloud microphysics to simulations of a severe thunderstorm event over Southeast India, *Annales Geophysicae*, **28**, 603-619.
- Rasmussen, R.M., Geresdi, I., Thompson, G., Manning, K. and Karplus, E., 2002: Freezing Drizzle Formation in Stably Stratified Layer Clouds: The Role of Radiative Cooling of Cloud Droplets, Cloud Condensation Nuclei, and Ice Initiation, *Journal of The Atmospheric Sciences*, **59**, 837-860.
- Roach, W. T., Forrester, D. A., Crewe, M. E. and Watt, K. F., 1984: An icing climatology for helicopters. *Meteorological Office Special Investigations Memorandum* 112.

- Rolfe, J. M. and Staples, K. J., 1988: Flight Simulation. Cambridge University Press.
- Sándor, V. és Wantuch, F., 2004: Repülésmeteorológia. OMSZ kiadványa. Budapest.
- Schwarzkopf, M. D. and Fels, S. B., 1991: The simplified exchange method revisited – An accurate, rapid method for computation of infrared cooling rates and fluxes. *Journal of Geophysical Research*, **96**, 9075-9096.
- Skamarock, W. C., 2005: Timesplitting techniques for multidimensional transport. *Internetes elérhetőség:*  
[http://www.mmm.ucar.edu/individual/skamarock/advect3d\\_2005.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/individual/skamarock/advect3d_2005.pdf)
- Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., Gill D. O., Barker D. M., Wang W., Powers J. G., 2005: A Description of the Advanced Research WRF Version 2., NCAR Mesoscale and Microscale Meteorology Division, NCAR Technical Note  
*Internetes elérhetőség:*  
[http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw\\_v2.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf)
- Skamarock W. C., Klemp J. B., Dudhia J., 2001: Prototypes for the WRF (Weather Research and Forecasting) model.  
*Internetes elérhetőség:*  
[http://www.mmm.ucar.edu/individual/skamarock/meso2001pp\\_wcs.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/individual/skamarock/meso2001pp_wcs.pdf)
- Smirnova, T. G., Brown, J. M. and Benjamin, S. G., 1997: Performance of different soil model configurations in simulating ground surface temperature and surface fluxes. *Monthly Weather Review*, **125**, 1870-1884.
- Smirnova, T. G., Brown, J. M., Benjamin, S. G. and Kim, D., 2000: Parametrization of cold-season processes in the MAPS land-surface scheme. *Journal of Geophysical Research*, **105**, 4077-4086.
- Szabadi, V., 2010: ROBINSON 2244/IR FNTP I. (Repülő és navigációs eljárás kiképző) rendszer meteorológiai alrendszerének vizsgálata a látástávolság vizualizáció tükrében, ZMNE szakdolgozat, Szolnok
- Tao, W.-K., Simpson, J. and McCumber, M., 1989: An ice-water saturation adjustment, *Monthly Weather Review*, **117**, 231-235.
- Tsao, J.-C. and Anderson, D.N., 2005: Additional Study of Water Droplet Median Volume Diameter (MVD) Effects on Ice Shapes
- Thompson, G., Rasmussen, R. M. and Manning, K., 2004: Explicit forecasts of winter precipitation using an improved bulk microphysics scheme. Part I: Description and sensitivity analysis. *Monthly Weather Review*, **132**, 519-542.

- Valentini, A., 2011: Valós meteorológiai szituációk előállítása és implementálása az MH. ÖHP.RFO repülőgép-szimulátorához. *ZMNE* szakdolgozat, Szolnok
- VanWest, J. and Lane-Cummings, K., 2007: Microsoft Flight Simulator X for Pilots: Chapter 13: Weather  
*Internetes elérhetőség:*  
[http://www.avweb.com/news/avtraining/flight\\_simulator\\_x\\_for\\_pilots-chapter\\_13-weather\\_196384-1.html](http://www.avweb.com/news/avtraining/flight_simulator_x_for_pilots-chapter_13-weather_196384-1.html)
- Wang, W., Bruyère, C., Duda, M., Dudhia J., Gill, D., Lin, H.-C., Michalakes, J., Rizvi, S., Zhang, X., 2009: ARW Version 3 Modeling Systems User's Guide. Mesoscale and Microscale Meteorology Division, National Center for Atmospheric Research  
*Internetes elérhetőség:*  
[http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user\\_guide\\_V3/ARWUsersGuideV3.pdf](http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/user_guide_V3/ARWUsersGuideV3.pdf)
- Wendl, B., 2009: A WRF modell segítségével készült szélenergia becslése vizsgálata Mosonmagyaróvár térségében. ELTE-TTK szakdolgozat, Budapest
- Williams, B., 2006; Microsoft Flight Simulator as a Training Aid, Aviation Supplies & Academics Inc. Newcastle, Washington
- Wolf, C.A. and McDonough, F.: A Comparison of WRF-RR and RUC Forecasts of Aircraft Icing Conditions, *National Center for Atmospheric Research*

Internetes hivatkozások:

- [http://en.wikipedia.org/wiki/Flight\\_simulator](http://en.wikipedia.org/wiki/Flight_simulator)
- [http://www.alaska-in-pictures.com/data/media/13/puff\\_1035.jpg](http://www.alaska-in-pictures.com/data/media/13/puff_1035.jpg)
- <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/mmbp/eta12tpb/>
- <http://www.met.hu/omsz.php>
- <http://www.wetterzentrale.de>
- <http://www.satreponline.org/index.php?width=1280&height=800>
- <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>
- <http://www.emc.ncep.noaa.gov/mmb/mmbp/eta12tpb>
- <http://www.janes.com/products/janes/index.aspx>
- [http://www.thefullwiki.org/Icing\\_conditions](http://www.thefullwiki.org/Icing_conditions)
- <http://www.ehfc.net/>

## Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom témavezetőmnek, Dr. Bottyán Zsoltnak, hogy időt és energiát nem kímélve segítséget nyújtott mind a témaválasztásban, mind az elméleti és gyakorlati alapok elsajátításában, szakmai fejlődésemben.

Köszönöm tanszéki konzulenseimnek, Dr. Weidinger Tamásnak és Gyöngyösi András Zénónak, hogy észrevételeikkel, szakmai tanácsaikkal támogatták a munkámat.

Szintén köszönet illeti Prof. Dr. Geresdi Istvánt, a felhőfizikai konzultációkért és az alkalmazott numerikus modell parametrizációjának kiválasztására vonatkozó tanácsaiért.

Valamint köszönetemet szeretném kifejezni mindazoknak, akik valamilyen formában hozzájárultak dolgozatom elkészítéséhez.