

Dr. Bottyán Zsolt¹

A PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐESZKÖZÖK (UAV-K) FELÜLETI JEGESÉDÉSÉNEK ASPEKTUSAI ÉS A JÉGLERAKÓDÁS BECSLÉSÉNEK LEHETŐSÉGEI²

A UAV-k felületén kialakuló jégbevonat növeli a gép tömegét, csökkenti az emelőerőt és a kritikus állásszöget, jelentősen növelheti a homlokellenállást, blokkolhatja az impakt és a statikus nyomásszenzorok működését, akadályozza a kommunikációt és a feladat végrehajtását (pl. felderítés). A jégbevonat kialakulását meteorológiai, aerodinamikai és geometriai tulajdonságok befolyásolják, így a jegesedés intenzitásának becslése komplex feladat. Munkánkban statisztikus és dinamikus megközelítési módokat mutatunk be a felületi jégakkréció becslésére majd egy jegesedési szituációt magában foglaló időjárási helyzet környezeti feltételeit figyelembe véve, becslést adunk a Global Hawk HALE UARS repülőeszköz szárnyán képződő jégbevonat geometriájára és intenzitására.

SOME ASPECTS OF STRUCTURAL ICING OF UAVS AND THE POSSIBILITIES OF ICE ACCRETION PREDICTION

The ice accretion which is evolved on the wings of UAVs increases the weight and drag, decreases the lift force and critical angle of attack. This phenomenon can block the proper working of pitot-static system, the radio communication and the completion of the mission tasks. The development of ice accretion depends on some meteorological, aerodynamical and geometrical attributes thus the prediction of icing is a very complex procedure. In our work we show statistical and dynamical approaches to forecast the ice accretion and finally we give a prediction of icing of the Global Hawk HALE UARS during its hypothetical flight under a known icing meteorological environment.

BEVEZETÉS

A pilóta nélküli repülőeszközök (UAV-k) mozgása során tapasztalható felületi jegesedés számos problémát jelent a repülési feladat végrehajtása során melyek a következőkben összegezhetők:

- az aerodinamika emelőerő és a kritikus állásszög együttes csökkenése;
- a repülőeszköz súlyának növekedése;
- kommunikációs rendszerek működésének korlátozott vagy teljes megszűnése;
- fedélzeti szenzorok hibás működése (pl. pitot-static rendszer, fedélzeti felderítő rendszerek stb.);
- kormányfelületek nem megfelelő működése;
- kiegyensúlyozatlanságból adódó vibrációk megjelenése stb.[1]

¹ százados, egyetemi docens, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, bottyan.zsolt@uni-nke.hu.

² Lektorálta: Prof. Dr. Makkay Imre ny. okl. mk. ezds; egyetemi tanár, Nemzeti Közszerológiai Egyetem Katonai Repülő és Légvédelmi Tanszék, makkay.imre@uni-nke.hu

Nyilvánvaló tehát, hogy alapvető fontosságú a jegesedést magában hordozó időjárási szituációk ismerete valamint ezek előrejelzésének megvalósítása. Egy megfelelő meteorológiai támogatásnak lehetővé kell tennie, hogy az időjárás oldaláról felelős döntést lehessen hozni az adott UAV repülésének megkezdéséről vagy elhalasztásáról valamint – amennyiben megkezdődött a repülés – az esetleges útvonal/feladat módosításról. Természetesen a felületi jegesedés csak egy fontos szempont a komplex meteorológiai állapotterben, aminek a figyelembe vétele alapján esetleg be kell avatkozni a repülés menetébe. Munkánkban ennek a veszélyes időjárási jelenségnek az előrejelzési lehetőségeit vesszük számba.

A UAV-k felületén megjelenő jégbevonat kialakulásának időjárási, aerodinamikai és geometriai feltételei vannak. A jégakkréció mennyisége és intenzitása az alábbi paraméterek meglehetősen komplex függvénye:

- áramló levegő környezeti hőmérséklete;
- a levegő repülési szinthez tartozó sztatikus légnyomása;
- a levegőben előforduló folyékony (túlhűlt) vízcseppek koncentrációja és ezek cseppméret-eloszlása;
- a repülőeszköz levegőhöz viszonyított sebessége;
- a repülőeszköz geometriai kialakítása, különös tekintettel a szárnyakra. [2]

Jelen tanulmányban megvizsgáljuk a UAV-k felületi jegesedésének becslési lehetőségeit és egy esettanulmányban be is mutatunk egy 2D jégakkréciós becslési módszert egy adott repülőeszközre vonatkozóan.

ALAPVETÉSEK

A felületi jegesedés becslése alapvetően a jegesedést magában hordozó időjárási helyzetek előrejelzésén alapul. A meteorológiai szolgálatok által kiadott szignifikáns repülésmeteorológiai térképeken a jegesedést általánosan, az ICAO vagy az FAA által definiált jegesedési intenzitások alapján adják meg és jelölik (1. ábra).

jelenhetnek. Ez utóbbi esetben beszélhetünk felhőn kívüli felületi jegesedésről.[3]

Ha azt vizsgáljuk, hogy milyen időjárási szituációkban találkozhatunk ilyen feltételekkel, akkor a közepes földrajzi szélességeken három meteorológiai helyzet érdemel említést:

- a zivatarfelhő Cb,
- a melegfronti esőréteg felhőzet Ns,
- az alacsony szintű rétegfelhő St.

A kérdés tehát az, hogy ezeket a felsorolt időjárási jelenségeket, hogyan tudjuk előre jelezni a UAV kezelők számára. Egy repülésmeteorológiai előrejelzésnek magában kell foglalnia számos, a repülésre veszélyes jelenség predikcióját is (komplexnek kell lennie). Ilyen értelemben szükséges becslést adni a felületi jegesedés várható előfordulására és annak intenzitására is. Alapvetően két módszerrel dolgozhatunk: a statisztikus és a numerikus modellezési elvet egyaránt követhetjük.

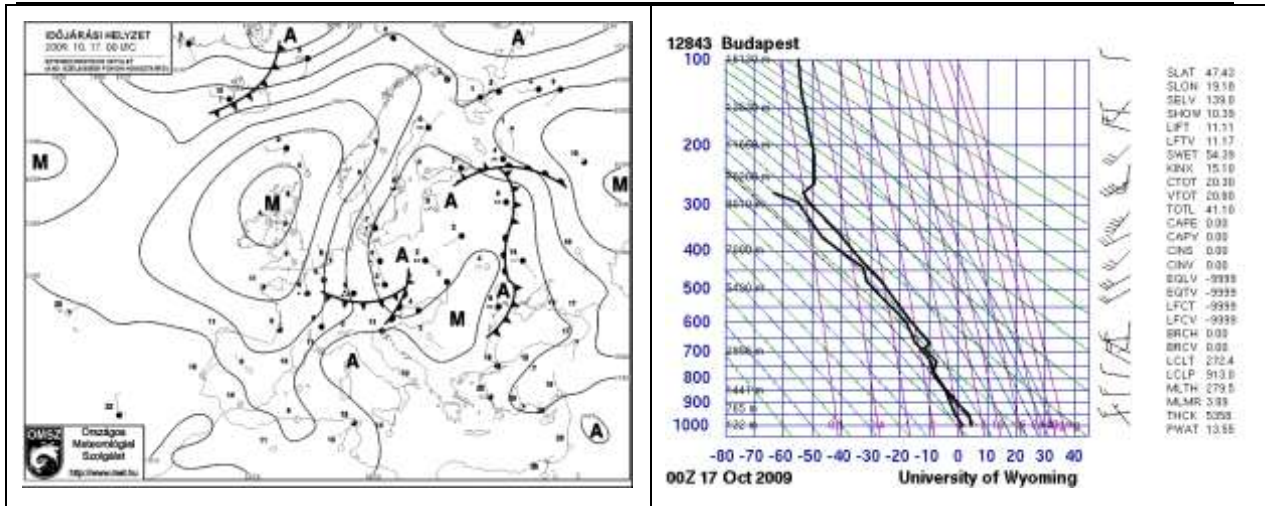
A STATISZTIKUS MEGKÖZELÍTÉS LEHETŐSÉGE

A statisztikus prognosztika arra az elvre alapul, hogy a légkörben korábban előfordult és észlelt/mért állapotok ismeretéből (mérési adatokból) különböző módszerekkel az atmoszféra viselkedésére vonatkozó törvényszerűségek, összefüggések határozhatók meg, melyek lehetővé teszik – bizonyos korlátok között – az időben előre történő becslést, előrejelzést. Az elv implicit módon feltételezi, hogy a szakszerűen elvégzett mérések (reprezentatív minták) tulajdonságai – adott, meghatározható bizonytalanság mellett – érvényesek az egész sokaságra (a légkörre). Természetesen nincs lehetőségünk jelen tanulmányban a mélyebb diszkusszióra, de fontos megjegyezni, hogy a statisztikus alapon történő becslési mód – a jellegéből fakadóan – gyakran statikus megközelítést ad, hiszen a légköri dinamikát nem tudja követni.

Időpont	Távirat szövege
2009. 10.17. 06:28:59	ATR 72 REPORTED SEVERE ICING BETWEEN 5000 AND 8000 FEET OVER TPS

I. táblázat Példa AIREP táviratra, melyben a személyzet erős jegesedést jelentett 5000 és 8000 láb között Tápiószáp felett repülve

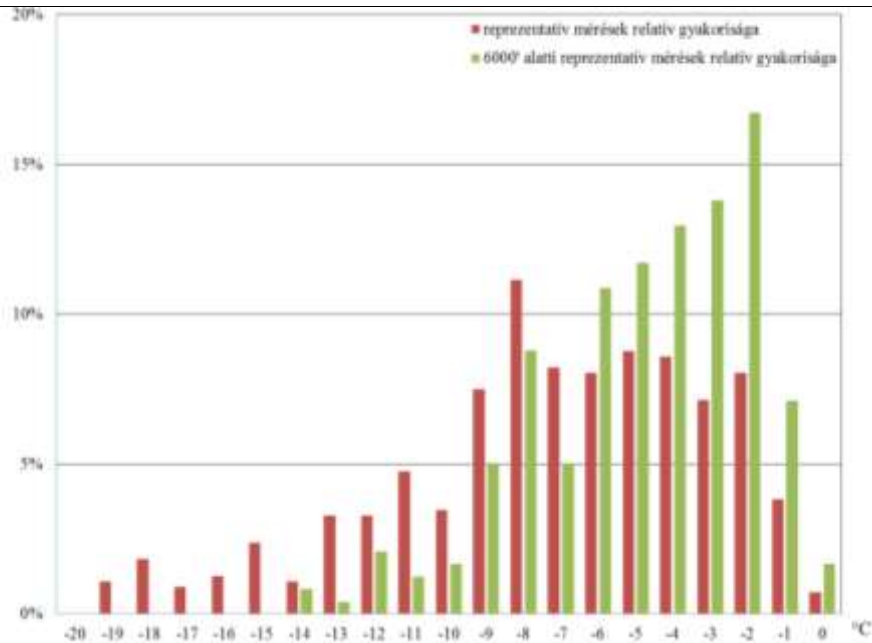
A felületi jegesedés kialakulása repülés közben történik, ezért nehéz megbízható, ugyanakkor nagy mennyiségű adatokhoz hozzájutni. A felhasználható információk leginkább a repülőgépek ún. AIREP jelentései, melyek tartalmazhatnak jegesedésre utaló adatokat (I. táblázat). Feldolgozva ezeket, összekapcsolhatjuk őket archív meteorológiai adatokkal, különböző statisztikai módszerekkel történő feldolgozás céljából (2. ábra).



2. ábra Az európai időjárási helyzet és a légkör vertikális állapota 2009. október 17-én 00 UTC-kor. Forrás: <http://www.met.hu> és <http://weather.uwyo.edu/upperair/europe.html>

A jegesedési szituációkhoz kapcsolódó archív meteorológiai adatok segítségével a jelenség bekövetkezését össze tudjuk kapcsolni pl. a környezeti hőmérséklet, a harmatpont, a nedvességtartalom vagy éppen az adott napra meghatározható makroszinoptikus helyzettel egyaránt (3. ábra).

A lineáris és nemlineáris többváltozós regresszió módszerével kvantitatíve lehet becsülni pl. a különböző intenzitású jegesedést az adatbázisból kinyert regressziós függvények segítségével.[4][5] Azonban, a jegesedéssel kapcsolatos megfigyelések magát a jégakkumulációt általában (AIREP táviratban is) annak intenzitásával adják meg, egy elég szűk skálán (gyenge, gyenge-közepes, közepes, közepes-erős, erős). Ez a skála elegendő információt hordoz ahhoz, hogy a UAV kezelők dönthessenek a repüléssel kapcsolatban, de a klasszikus regressziós becsüléshez szűk a skála, nem tud a módszer jól osztályozni a meteorológiai változók segítségével. A probléma egyik megoldása a neurális hálózatok bevonása a predikcióba. A neurális hálózatokat számos alkalommal alkalmazták meteorológiai jelenségek (köd, zivatar, felhőzet előrejelzése) vizsgálatához.[6][7][8][9] A neurális hálózatok – melyek működése lényegében többváltozós nemlineáris regresszió alapul – igen jól teljesítenek azokban az esetekben, amikor sok bemenő adatból (prediktor) kell néhány osztályt (prediktandusz) megkülönböztetni. A felületi jegesedés is ebbe a problémaosztályba tartozik, hiszen számos meteorológiai paraméter segítségével kell kiválasztani a valóságnak megfelelő, adott jegesedési osztályt.



3. ábra A jegesedés alatt előfordult környezeti hőmérsékletek relatív gyakorisága az összes és a 6000' alatti AIREP jelentéseket figyelembe véve

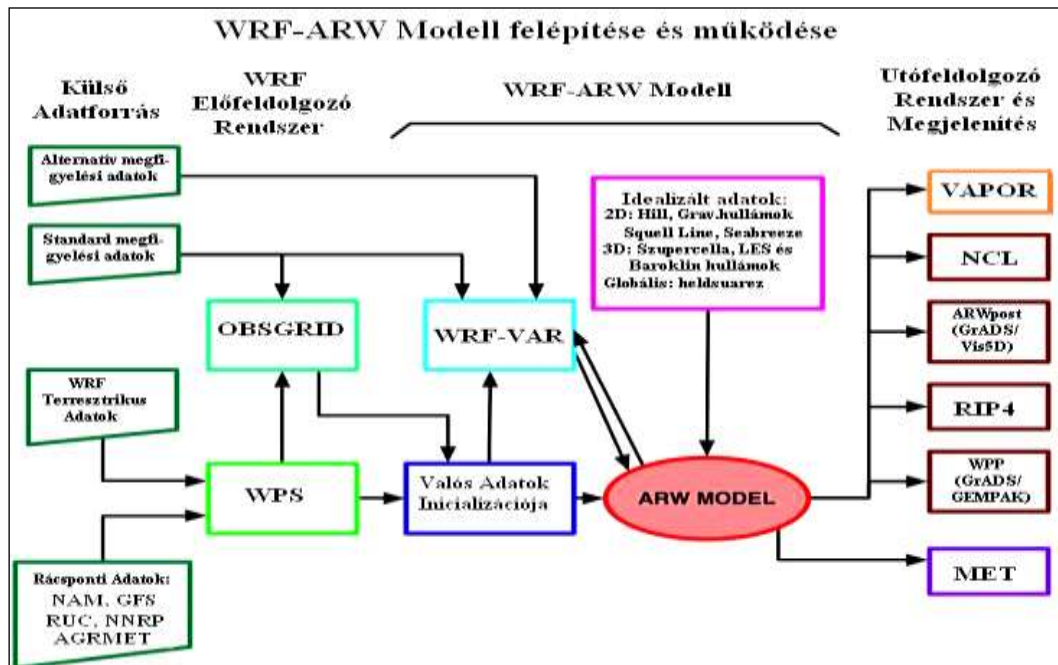
A másik lehetséges út a UAV-k jegesedésének előrejelzésére, ha a rendelkezésre álló archív meteorológiai adatok és a jegesedési információk összevetéséből megismert összefüggéseket alkalmazzuk az ún. analóg időjárási helyzetek kiválogatásával kombinálva. [10] Ebben az esetben a feladat az, hogy egy adott pillanatban mért/észlelt időjárási szituációhoz keressük meg a korábban előfordult leginkább hasonló meteorológiai helyzeteket és ezek vizsgálatából, időbeli fejlődéséből adjunk becslést a jelenlegi helyzet várható alakulására vonatkozóan. A jegesedés szempontjából vizsgálva a kérdést, azt kell meghatározni az analóg szituációk kiválogatása után - a korábbi statisztikai vizsgálatok eredményei alapján - az analóg helyzetek hordoznak-e magukban potenciálisan jegesedési potenciált az adott UAV-re vonatkozóan? Meg kell azonban jegyeznünk, hogy az analóg meteorológiai helyzetek helyes definiálása kulcsfontosságú a módszer használhatóságát illetően és gyakran szakemberek szubjektív véleményét is magában kell, hogy foglalja. [11]

A NUMERIKUS (DINAMIKUS) MEGKÖZELÍTÉS LEHETŐSÉGEI

A légköri rendszer pillanatnyi állapotának ismeretében lehetőség van az időbeli fejlődés közelítő számítására, amennyiben megoldjuk a légköri hidrodinamikusan egyenletrendszer (HTER). A módszer a numerikus prognosztika tárgykörébe tartozik és a HTER megoldásának számos problémája mellett az utóbbi 2-3 évtized során az első számú előrejelzési módszerré fejlődött. [12]

A felületi jegesedés folyamata azonban gyakran mikro-léptékű skálán zajlik, de a mezo skálán nem mutat túl, emiatt a numerikus megközelítés során nagy térbeli és időbeli felbontású modellre van szükség, ami jelentősen nehezíti az említett folyamat előrejelzését. [14] Ráadásul a felhőfizikai folyamatok parametrizációs lehetősége is igen szerteágazó a különböző modellek esetén. Ugyanakkor a mai korszerű modellek (pl. WRF) lehetővé teszik olyan felhőfizikai parametrizációk alkalmazását, amelyek modellváltozóként előállítják a jegesedési folyamat

alakításában fontos szerepet játszó állapotváltozók értékeit. [13] Fontos azonban tudnunk, hogy pl. a felhőelemek cseppméret-eloszlása, ezek koncentrációja vagy a folyékony víztartalom (LWC) numerikus becslése - még a legújabb parametrizációs eljárásokban is – csak közelítő pontosságúnak tekinthető. Növeli a bizonytalanságot a modell által alkalmazandó nagy térbeli és időbeli felbontás is (4. ábra).



4. ábra A WRF numerikus előrejelző rendszer működésének folyamatábrája. [14]

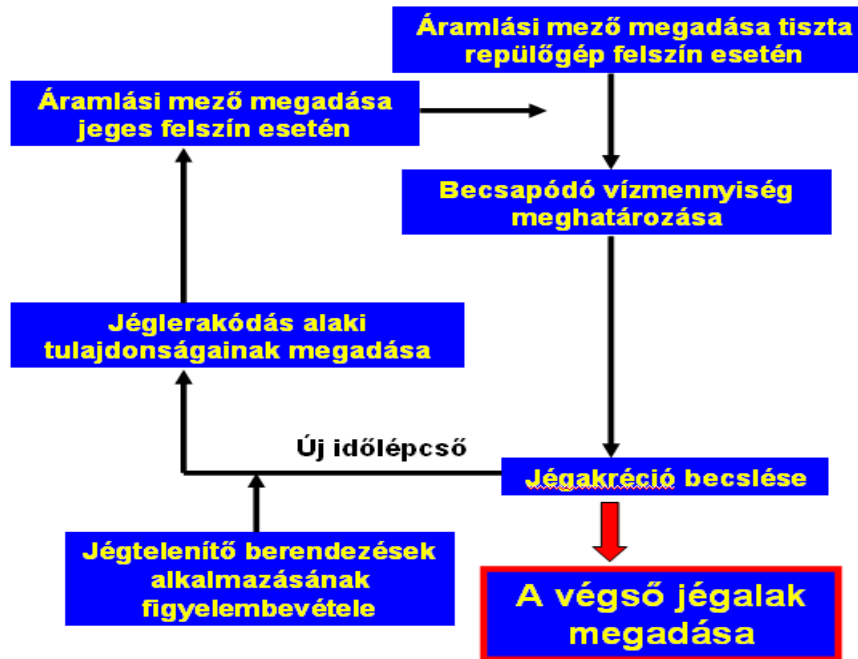
Mindazonáltal, a numerikus modellek által szolgáltatott közvetlen output adatok önmagukban nem használhatók a jegesedés becslésére, hiszen ez a folyamat csak akkor zajlik, ha a jégakumuláció meteorológiai, aerodinamikai és az adott UAV geometriai feltételei egyidejűleg adottak ehhez. Maga a modell csak a környezet időjárási körülményeinek becslését végzi, ezért a jéglerakódás feltétel-rendszerének ismerete tehát elengedhetetlen ahhoz, hogy a modell adatainak a jegesedési feltétel-rendszerrel történő összevetése után eldönthessük, hogy milyen intenzitással várható a folyamat bekövetkezése.

A JEGESEDEST ALAKÍTÓ FOLYAMATOK FIZIKAI MEGKÖZELÍTÉSE

A jegesedési folyamat feltétel-rendszerét mind statisztikus (matematikai), mind pedig dinamikus (fizikai) úton meghatározhatjuk. A statisztikus megközelítéseket korábban már áttekintettük. A fizikai megközelítés során magát a felületi jéglerakódás folyamatát kell modelleznünk, vagyis a ható folyamatokat és megmaradási törvényeket alkalmazva kell leírni a szituációt. Erre számos megfelelő modell létezik, melyek közül munkánkban egy egyszerű, de ugyanakkor jól használható módszert alkalmazunk.[15] Ez a modell egy nem forgó hengeren kialakuló jégfelszínre vonatkozóan felírt ún. energia-egyensúlyi egyenlet megoldásán alapul, mely valójában a különböző termodinamikai folyamatokra vonatkoztatott egyenlet [16]

Az említett fizikai modell meghajtásához szükséges ismerni a környezeti változók értékeit, úgymint: hőmérséklet, statikus nyomás, folyékony víztartalom, cseppméret-eloszlás. Másfelől

tudnunk kell az adott UAV repülési sebességét a levegőhöz viszonyítva (TAS) valamint ismernünk kell a belépő él közelítő görbületi sugarát is. Amennyiben rendelkezünk ezekkel az adatokkal, az említett fizikai jégakkumulációs modell képes 2D-ban becslést adni a jégakkréció intenzitására a belépő él felülete mentén és így a jegesedés alaki tulajdonságai is modellezhetővé válnak. Az ismert környezeti változók alapján a jéglerakódás becslésének lépéseit egy folyamatábra segítségével foglalhatjuk össze (5. ábra).



5. ábra A jéglerakódás becslésének folyamata a dinamikus jégakkréciós modellben. Forrás: <http://extice.cira.it/project/proposal-summary>

ESETTANULMÁNY

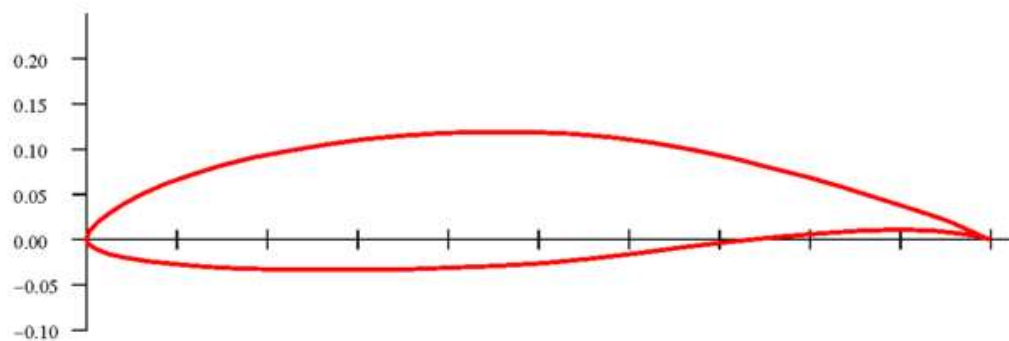
Munkánkban egy konkrét jegesedést előidéző meteorológiai szituáció környezeti feltételeit felhasználva, becslést adunk a fentebb említett akkréciós modell segítségével egy nagy hatótávolságú UAV jegesedési intenzitására. A választott repülőeszköz a Northrop Grumman cég RQ-4B Global Hawk Block 30 (továbbiakban GH) típusa, mely az egyik legkorszerűbb nagy hatótávolságú pilóta nélküli repülőeszköz (HALE UARS), mely rendszerben áll (6. ábra). A GH tesztrepülései utáni kiértékelésben külön kiemelték, hogy a bármely időjárási helyzetben történő alkalmazási lehetőségei korlátozottak, alapvetően a felületi jegesedési problémák miatt, hiszen a repülőgép nem rendelkezik repülés közbeni jégtelenítő rendszerrel! Külön említi a tanulmány a fel- és leszállás közben előforduló jegesedést. [17] Ráadásul a GH szárnygeometriájából fakadóan, jegesítő időjárási közegben repülve a szárny igen nagy ütközési hatékonyságot produkál a túlhűlt felhőelemekkel kapcsolatban, ami azt jelenti, hogy nagy hatékonysággal gyűjti az útjába kerülő cseppeket. [18]



6. ábra Az RQ-4B Global Hawk HALE UARS repülőeszköz repülés közben.

A GH szárnyának kialakítását a NASA LRN 1015 kódú szárnyprofil alapján végezték. Tekintve, hogy az adott szárnyprofil geometriai adatait nem tudtuk fellelni, így a hozzá nagyon hasonló NASA NLF 1015-ös szárnyprofil alaki tulajdonságaiból indulunk ki, melyet szintén jól jellemez, a karcsú kialakítás (7. ábra). A GH szárnyának húrhossza változó, munkánkban 1,6 m-es értékkel dolgoztunk, ami a szárnytőtől elegendő távolságban mérhető ahhoz, hogy a repülőeszköz testének határreége ne befolyásolja jelentősen az áramlási mezőt. Az adott geometriai tulajdonságok és a húrhossz alapján a belépő él görbületi sugarára 0,0704 m adódott. [19]

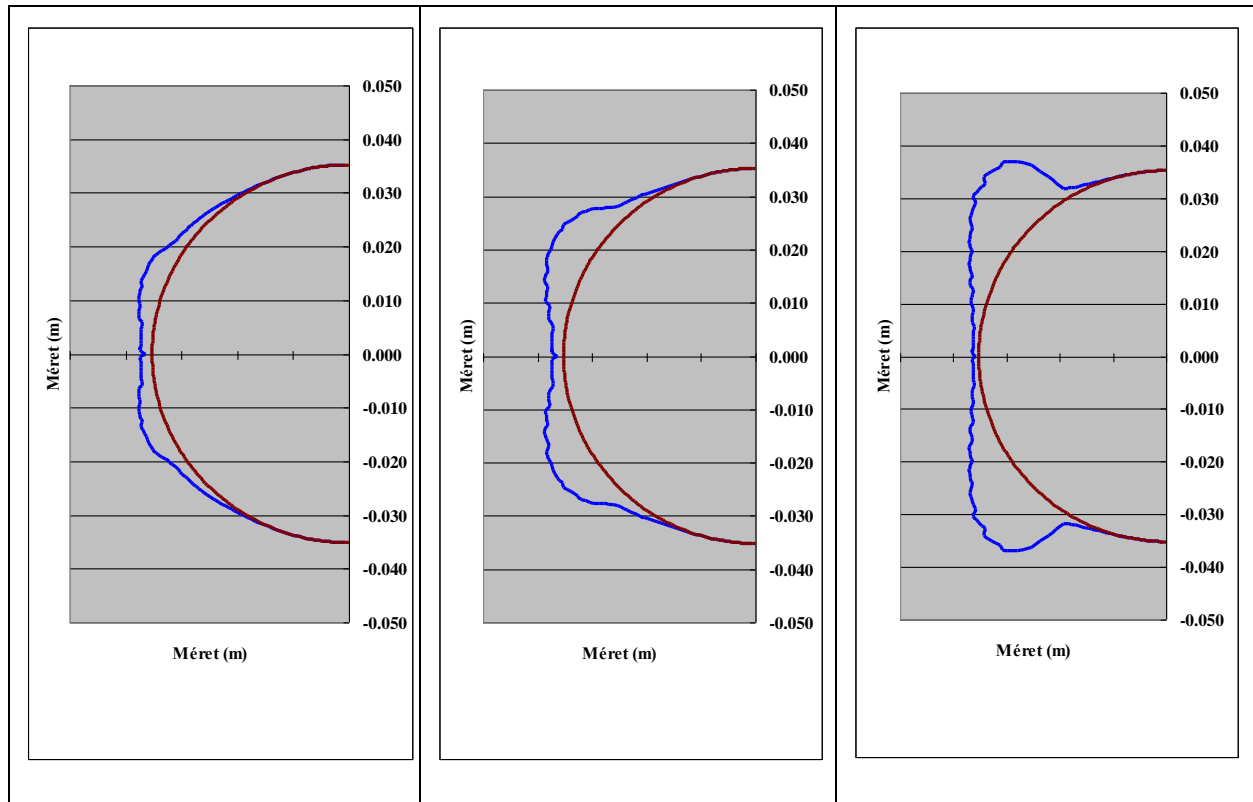
NASA NLF1015



7. ábra A NASA NLF 1015 szárnyprofil geometriai kialakítása, mely jól közelíti a GH szárnyprofilját.

Az esettanulmányhoz a korábban említett, 2009.10.17-én előfordult és felületi jegesedést magában hordozó időjárási szituációt választottuk (I. táblázat). Az adott felhőzet Ns jellegű felhőzetre vonatkozóan feltételeztünk egy 20 μm -es átlagos felhőcsepp-méret átmérőt, az ilyen felhőkben előforduló Γ -eloszlás mellett. A folyékony víztartalom értékét 0,0005 g/kg értékkel

adtuk meg, ami szintén jó közelítés az adott felhőkre jellemzően. [20] A repülési magasságot 5000 lábnak (a hőmérséklet $-3,9\text{ }^{\circ}\text{C}$, statikus nyomás 847 hPa), míg a sebességet 50, 80 és 110 m/s-nak választva, 5 perces hipotetikus repülési időt feltételezve, (állandó környezeti és aerodinamikai paraméterek mellett) az alábbi akkréciókat becsli a modell (7. ábra).



8. ábra A GH UARS belépő élén kialakuló jégakkréció alakja különböző repülési sebességek és változatlan környezeti feltételek mellett, a vizsgált időjárási helyzetben. Bal oldali ábra: 50 m/s TAS, középső ábra: 80 m/s TAS, jobb oldali ábra: 110 m/s TAS.

A 8. ábrán látható mindhárom becslés esetén nedves jellegű jegesedéssel találkozunk, melynek fontos tulajdonsága, hogy a legintenzívebb jégfelhalmozódás nem a belépő élénél tapasztalható, hanem attól távolabb. A repülési sebesség növekedésével egyre inkább várható az áramlást leginkább rontó, ún. szarv alakú jégbevonat (horn ice) kialakulása (7. ábra jobb oldali kép).

Másfelől a fizikai modell segítségével kaphatunk becslést az érték a jégfelhalmozódás intenzitására vonatkozóan is. Különböző jegesedés-intenzitási standard-ok léteznek, melyek közül most az FAA által alkalmazott osztályozást választva, megállapíthatjuk a szárnyfelületen számolt jéglerakódás sebességéből (mm/perc mértékegységben számolva) az adott jégfelhalmozódás intenzitását.[16] Amikor a repülési sebesség 50 m/s TAS, a maximális akkréciós sebesség 0,86 mm/perc (21 fokra a belépő éltől), ami közepes intenzitásnak felel meg. 80 m/s TAS-nál ugyanez az érték 1,56 mm/perc (30 fokra a belépő éltől), míg 110 m/s TAS esetén 2,48 mm/perc (45 fokra a belépő éltől). Mindkét utóbbi érték már az erős FAA jegesedés-intenzitás kategóriába tartozik!

A modell által szolgáltatott eredmények azt támasztják alá, hogy az adott időjárási helyzetben a GH UARS repülőeszköz is közepes vagy erős jegesedési szituációban repült volna és az ehhez hasonló időjárási helyzet komolyan veszélyeztetheti a missziót és magát a repülőeszközt egyaránt. Alapvető fontosságú tehát, hogy az UAV-k repülését támogató meteorológiai

rendszer a felületi jegesedés predikcióját is hatékonyan végezze el a munkánkban említett módszerek kombinált alkalmazásával. Amennyiben ez megvalósul, a támogató rendszer jelentősen segíti a döntéshozók és az eszközt vezetőik munkáját és egyben hozzájárul a repülések biztonságának magas szinten tartásához.

ÖSSZEFOGLALÁS

A munkánkban bemutattuk, hogy az UAV-k szárnyfelületén képződő jégakkréció becslésére statisztikus és dinamikus (numerikus) módszereket egyaránt alkalmazhatunk. A vizsgálatok eredményeképpen a következőkben foglalhatjuk össze az eredményeinket:

- a UAV-k felületén kialakuló jégbevonat veszélyezteti a misszió végrehajtását és magát a repülőeszközt is. A kirakódó jég növeli a gép tömegét, csökkenti az emelőerőt és a kritikus állásszöget, jelentősen növelheti a homlokellenállást, blokkolhatja az impakt és a statikus nyomá szenzorok működését, akadályozza a kommunikációt és a feladat végrehajtását (pl. felderítés). A jégbevonat kialakulását meteorológiai, aerodinamikai és geometriai tulajdonságok befolyásolják;
- a jegesedést magában hordozó időjárási helyzetekben mért meteorológiai archív adatok alapján megállapítható, hogy milyen időjárási helyzetekhez kapcsolódik leginkább a jégbevonat képződése. Ezek a nyári félév zivatarjaihoz, az átmeneti évszakok melegfronti Ns és a téli félév alacsony St felhőzetéhez kapcsolódnak. Fontos ezek klimatológiai feldolgozása egy adott UAV-k által használt térségben;
- ismert jegesedési esetekhez kapcsolódó meteorológiai adatok statisztikus módszerekkel történő vizsgálatával prognosztikai szempontból hasznos információ nyerhető, melyek a klimatikus információkkal együtt alapját képezi (első közelítésben) a UAV-k számára készülő prognózisnak. Az alkalmazható matematikai (statisztikai) módszerek: lineáris és nem-lineáris regresszió, neurális hálózatok és az analógián alapuló osztályozás;
- a légkörben zajló folyamatok előrejelzésének dinamikus megközelítése a numerikus modellek alkalmazását feltételezi. Ekkor nagy tér és időbeli felbontású modellek alkalmazásával az atmoszféra állapotváltozásait tudjuk becsülni egy adott prognosztikai tartományra. Az állapotváltozók értékei alapján, pl. egy alkalmazott jégakkréciós fizikai modell segítségével lehet meghatározni az adott UAV-re érvényes jegesedési intenzitásokat és típusokat;
- egy esettanulmányban bemutattuk, hogy egy egyszerű fizikai jégakkréciós modell segítségével hogyan lehet becsülni a GH UARS esetében a szárnyon kialakuló jégbevonat mennyiségét, alakját és intenzitását. Egy konkrét időjárási helyzethez készített modellszámítás segítségével bemutattuk, hogy a GH szárnyán széles repülési sebesség-tartományban közepes/erős jegesedést tapasztalhatnánk, amennyiben a repülőgép ilyen körülmények között repülne.

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

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] GENT, R. W., DART, N. P., CANSDALE, J. T.,: Aircraft Icing. Philosophical Transactions of The Royal Society. Lond. A., 358, 2000. 2873-2911.
- [2] LIST, R.: Ice accretions of structures. Journal of Glaciology, Vol. 19. , No. 81, 1977, 451-465.
- [3] FUCSH, W. and SCHICKEL, K. P.: Aircraft icing in visual meteorological conditions below low stratus. Atmospheric Research, 36, 1995. 339-345.
- [4] EZEKIEL, M. és FOX, K. A.: Korreláció és regresszióanalízis. Közgazdasági és Jogi Könyvkiadó. Budapest. 1970.
- [5] DÉVÉNYI, D. és GULYÁS, O.: Matematikai statisztikai módszerek a meteorológiában. Tankönyvkiadó. Budapest. 1988.
- [6] GARDNER, M., W. and DORLING, S. R.: Artificial neural networks – A review of applications in the atmospheric sciences. Atmospheric Environment, Vol. 32., No. 14/15., 1998., 2627-2636.
- [7] McCANN, D., W.: NNICE – A neural network aircraft icing algorithm. Environmental Modelling & Software. Vol. 20., 2005, 1335-1342.
- [8] McCANN, D., W.: A neural network short-term forecast of significant thunderstorms. Forecasting Techniques. Vol. 7., 1992, 525-534.
- [9] FABBIAN, D. and DE DEAR, R.: Application of artificial neural network forecast to predict fog at Canberra International Airport. Weather and Forecasting. Vol. 22., 2007., 372-381.
- [10] HALL, T. J., THESSIN, R. N., BLOY, G. J. and MUTCHLER, C. N.: Analog sky condition forecasting method based on a k-nn algorithm. Weather and Forecasting, Vol. 25., 2010., 1463-1478.
- [11] HANSEN, B.: A fuzzy-logic based analog forecasting system for ceiling and visibility. Weather and Forecasting, Vol. 22., 2007., 1319-1330.
- [12] BOTTYÁN, Z.: A repülésre veszélyes mezo-skálájú meteorológiai jelenségek modellezésének aspektusai - numerikus prognosztikai megközelítés. Repüléstudományi Közlemények, Vol. 21. No.2.
- [13] SKAMAROCK W. C., KLEMP J. B., DUDHIA J., GILL D. O., BARKER D. M., WANG W., POWERS J. G.: A Description of the Advanced Research WRF Version 2., NCAR Mesoscale and Microscale Meteorology Division, NCAR Technical Note. 2005., http://www.mmm.ucar.edu/wrf/users/docs/arw_v2.pdf
- [14] WENDL, B.: A WRF modell segítségével készült szélenergia becslése vizsgálata Mosonmagyaróvár térségében. ELTE-TTK szakdolgozat, Budapest. 2009.
- [15] LOZOWSKI, E. P., STALLABRASS, J. R., HEARTY, P. F.: The Icing of an Unheated, Nonrotating Cylinder. Part I: A Simulation Model, Journal of Climate and Applied Meteorology, Vol. 22., 1983, 2053-2062.
- [16] BOTTYÁN, Z.: Estimation of structural icing intensity and geometry of aircrafts during different conditions - a fixed-wing approach. Időjárás, Vol. 115., No. 4., 2011., 275-288.
- [17] RQ-4B Global Hawk Block 30.: Operational Test and Evaluation Report. 2011.
- [18] BOTTYÁN, Z.: A szárnyprofil-geometria és az ütközési hatékonyság kapcsolata a repülőgépek felületi jegesedésének folyamata során. Repüléstudományi Közlemények, Vol. 24. No.1., 43-50.
- [19] ABBOTT, I. A., von DOENHOFF, A., E.: Theory of wing sections. Dover, New York, 1959.
- [20] GERESDI, I.: Felhőfizika. Dialóg Campus Kiadó. Budapest-Pécs. 2004.