



PHOTO: TOPIDOC



REPÜLÉSTUDOMÁNYI SZEMELVÉNYEK

Dr. Bottyán Zsolt

A közfeladatot ellátó repülések meteorológiai
biztosításának kérdései



REPÜLÉSTUDOMÁNYI SZEMELVÉNYEK

Dr. Bottyán Zsolt

**A közfeladatot ellátó repülések meteorológiai
biztosításának kérdései**

**NEMZETI KÖZSZOLGÁLATI EGYETEM
KATONAI REPÜLŐ INTÉZET
TUDOMÁNYOS KIADVÁNYA**

ISBN 978-615-5845-26-0



© A Szerző 2017

© Nemzeti Közzolgálati Egyetem Katonai Repülő Intézet

Szerkesztő:

dr. Szilvássy László, PhD

Nemzeti Közzolgálati Egyetem/National University of Public Service

Lektorok:

Bíróné dr. Kircsi Andrea, PhD

Országos Meteorológiai Szolgálat/Hungarian Metrological Service

dr. Dudás Zoltán, PhD

Nemzeti Közzolgálati Egyetem/National University of Public Service

prof. dr. Padányi József, DSc

Nemzeti Közzolgálati Egyetem/National University of Public Service

dr. Wantuch Ferenc, PhD

Nemzeti Közlekedési Hatóság/National Transport Authority

A REPÜLÉSTUDOMÁNYI SZEMELVÉNYEK 2017 című könyv a Nemzeti Közzolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézet, által évente legalább egy alkalommal kiadott, repüléstudományi tematikus kiadványa.

MEGJELENÉS

A kiadvány évente legalább egy alkalommal jelenik meg, a megjelenő írások lektoráltak. A közlésre szánt tanulmányokat a Repüléstudomány Közlemények honlapján kell regisztrálni és feltölteni <http://www.repulestudomany.hu> További részletekért látogasson el honlapunkra.

Kiadó: Nemzeti Közzolgálati Egyetem Katonai Repülő Intézet

Kiadásért felelős: dr. Palik Mátyás ezredes, PhD

Szerkesztőség címe: 5008 Szolnok, Kilián út 1.

Levelezési cím: NKE Repüléstudományi Közlemények 5008 Szolnok, Pf.: 1.

Telefon: +36-56-510-535

e-mail: RepTudKozl@uni-nke.hu

HU ISBN 978-615-5845-26-0

Borítón található fényképet Dr. Toperczer István készítette

TARTALOM

Előszó	5
A közszolgálati célú repülések meteorológiai támogatásáról I. Légkörünk struktúrája, alapfolyamatai repülésmeteorológiai megközelítésben	7
A közszolgálati célú repülések meteorológiai támogatásáról II. Légkörünk jelenségei repülésmeteorológiai megközelítésben	27
International and Hungarian Applications of Unmanned Aircraft Systems in the Meteorological Researches	51
Az UAS eszközök időjárás megfigyelésre történő alkalmazásának fontossága és hazai lehetőségei	75
On the Theoretical Questions of the UAS-Based Airborne Weather Reconnaissance	97
Ajánlások a hazai közfeladatot ellátó repülések meteorológiai biztosításához	119

SZERZŐ

Bottyán Zsolt (PhD)
tanszékvezető, egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774

Bottyán Zsolt (PhD)
Head of Department, associate professor
National University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Institute of Military Aviation
Department of Aerospace Controller and Pilot Training
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774

ELŐSZÓ

A hazai felsőoktatásban nem egyedülálló az, hogy tanszékek, intézetek, kutató műhelyek az általuk művelt tudomány- vagy kutatási terület további népszerűsítése céljából időszaki kiadványokat jelentetnek meg. Ezzel lehetőséget biztosítanak az adott szakterületen folyó oktatási és kutatás-fejlesztési tevékenységek eredményeinek mind szélesebb megismertetéséhez, a publikációs lehetőségek kiterjesztéséhez.

Intézetünk, a Nemzeti Közzolgálati Egyetem Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar Katonai Repülő Intézete felsőfokú repülőszakember képzést és a repüléstudományhoz kapcsolódó szakmai területeken tudományos-kutatást folytató szervezet.

Fontos küldetésünknek tartjuk, hogy lehetőségeink szerint növeljük a repüléstudományi terület elismertségét, megismertessük a szakterületen egyéni-, vagy csoportos kutatásokat folytató szakemberek eredményeit, tovább népszerűsítve ezzel a tudományterületet.

A Repüléstudományi Szemelvények címmel 2016-ban elindított sorozatunkkal elsődleges célunk az, hogy hírt adjunk az adott évben a repülés- és a hozzá szorosan kapcsolódó területeken folyó tudományos-kutatások irányairól, eredményeiről. E mellett teret kívánunk adni tehetséges fiatal oktatóknak, kutatóknak, hallgatóknak publikációs lehetőségeik kiterjesztéséhez, a tudományos tevékenység népszerűsítéséhez és mind szélesebb olvasóközönség figyelmének felkeltéséhez.

Jelenlegi kiadványunkban – kiváló meteorológus munkatársunk – dr. Bottyán Zsolt, a Repülés-irányító és Repülő-hajózó Tanszék, tanszékvezetője, egyetemi docens elmúlt időszakban a **KÖFOP-2.1.2.-VEKOP-15-2016-00001 „A jó kormányzást megalapozó közszolgálat-fejlesztés”** című projekt keretében készült kutatásainak eredményeit tartalmazzák. Az írásművek a repülésmeteorológia széles spektrumát fogják át. A hat különálló, de témájukban egymáshoz szorosan kapcsolódó, tudományos igényű és alapossággal elkészített írásművekben olvashatunk a légkör struktúrájáról, alapfolyamatairól, jelenségeiről, a pilóta nélküli légi járművek időjárás megfigyelésre történő alkalmazásának lehetőségeiről, e területen folyó nemzetközi és magyar kutatási eredményekről, a hazai közfeladatot ellátó repülések meteorológiai biztosításának kérdéseiről.

Abban a reményben ajánlom kötetünket az érdeklődő olvasó figyelmébe, hogy nem csupán a szakterület művelői, de mindazok számára is hasznos és tartalmas időtöltést nyújtunk, akik szívesen gondolkodnak együtt a repülés és a légiközlekedés modern világának izgalmas, egyes területeken a jövőbe mutató kérdéseiről.

Ez úton megköszönöm a kiadvány szerzőjének és annak szerkesztésében részt vállaló kollégáim munkáját, mellyel hozzájárultak a sorozat 2017. évi II. kötetének összeállításához.

Szolnok, 2017. december 14.

Dr. Palik Mátyás
igazgató

A KÖZSZOLGÁLATI CÉLÚ REPÜLÉSEK METEOROLÓGIAI TÁMOGATÁSÁRÓL I. LÉGKÖRÜNK STRUKTÚRÁJA, ALAPFOLYAMATAI REPÜLÉSMETEOROLÓGIAI MEGKÖZELÍTÉSBEN

A közszolgálati célú repülések meteorológiai biztosításához részletesen ismernünk kell a légkör szerkezetét, alapvető folyamatait, jelenségeit. Munkánkban elsőként bemutatjuk az atmoszféra hidrosztatikus szerkezetét, különös tekintettel a légnyomás, a sűrűség és a hőmérséklet profiljaira. Ezt követően, láttatjuk a légkörben kialakuló dinamikus horizontális és vertikális áramlásokat. Külön kiemelten mutatjuk be a konvektív folyamatokat és a csapadékképződés mozzanatait. Természetesen mindezt tesszük a repüléshez szorosan kapcsolódó kontextusban.

Kulcsszavak: légkör, meteorológiai támogatás, hidrosztatika, konvekció, légköri mozgásrendszerek

BEVEZETÉS

A repülési feladatok biztonságos végrehajtásának alapvető feltétele, hogy a repülés komplex folyamatrendszerének és a légkörnek – annak a közegnek melyben maga a repülés történik – a kölcsönhatásait jól ismerjük. Másként fogalmazva ez azt is jelenti, hogy a repülések biztonsága nem kis részben azon múlik, hogy a földi atmoszféra milyen mértékben és módon tárul fel előttünk.

A tudományok fejlődésével az idők során igen sok ismeretanyag gyűlt össze légkörünkről, melynek egyik fő oka, hogy az ember életére talán leginkább hatást gyakorló szféráról van szó. Az atmoszféránkban lezajló változásokat külön szóval is illetjük, melynek neve az időjárás. A légkörrel kapcsolatos tudás gyarapodását nem kis mértékben az ember egyik ősi vágya segítette elő, hogy valamilyen módon olyan tudás birtokába jusson, melynek segítségével időben előre meg tudja határozni az időjárás alakulását.

Ennek a szerteágazó tudásnak – némileg paradox módon – a legfontosabb eleme az elmúlt néhány évtized kutatásainak eredményeképp az a tény, hogy a légköri változásokat tetszőleges pontossággal és időtartamra nem lehetséges előre meghatározni. Vagyis a légköri természet gátat szab az ember kíváncsiságának... Ha tehát a természet felől közelítjük meg a repülésbiztonság kérdését, azt kell mondjuk, hogy csakis korlátozott mértékben (matematikai értelemben egynél kisebb valószínűséggel) szavatolható ennek magas szinten tartása.

Az atmoszféra a merev- és forgószárnyas repüléshez nélkülözhetetlen közeg, mely lehetővé teszi a mozgáshoz szükséges emelőerő komponens létrejöttét, vagyis magát a repülést. Ebből fakadóan a repülő eszközök és a légkör között folyamatos kölcsönhatás áll fenn, ami dinamikai értelemben lehetővé teszi a levegőben történő 3D-s mozgást. Világos tehát, hogy az atmoszféra mindenkor fizikai állapota alapvetően befolyásolja a repülés dinamikáját, így ennek ismerete nélkülözhetetlen a repülésbiztonság oldaláról is.

Ugyanakkor, a repülési feladat maga mindig egy összetett folyamat, melynek csak egyik feltétele, hogy dinamikai értelemben garantáljuk a levegőben történő mozgáshoz szükséges erőhatásokat. Emellett a személyzetnek folyamatosan navigációs, kommunikációs feladata is van, nem is beszélve annak a munkának a végrehajtásáról, amiért magát a repülést végzi (pl. felderítés, légi kutatás-mentés, légi fényképezés, légi szállítási feladatok ellátása stb.).

Légkörünkben, mint komplex rendszerben számos olyan – a repülésre igen komoly veszélyt jelentő – folyamat, jelenség lép fel, mely képes a repülés dinamikai feltételét és/vagy a repüléshez járulékosan kapcsolódó – előbb említett – feladatok végrehajtását meggátolni.

Éppen ezért nagyon élesen jelentkezik a repülések biztonságát növelő meteorológiai támogatással kapcsolatos kérdések tárgyalásának fontossága. Különösen lényeges kiemelnünk a közfeladatokat ellátó repülések meteorológiai támogatásának problematikáját, hiszen ezek a repülések (katonai és civil légi kutatás-mentés, katasztrófákkal, vészhelyzetekkel kapcsolatos felderítések, azok elhárításához kötődő repülési feladatok, határvédelemhez kötődő repülések végrehajtása stb.) igen gyakran váratlanul, előre nem kalkulálható időpontban és helyen kell, hogy megvalósuljanak. Ezért akkor és ott az időjárási helyzetről és annak alakulásáról a lehető legpontosabb információra van szükség, hiszen az ilyen feladatú repülések csak indokolt esetben halaszthatók el időjárási okok miatt, hiszen annak indokolatlan elhalasztása emberéletben és vagyonban egyaránt felbecsülhetetlen károkat okozhat. Tehát fundamentális kérdés, hogy a meteorológiai támogatása ezeknek a feladatoknak kiemelten magas minőségű legyen.

A repülések magas szintű biztonságának fenntartásához a repülésmeteorológia, mint önálló diszciplína járul hozzá. Az elméleti repülésmeteorológia feladata az atmoszféra állapotának, az abban lezajló korábban említett veszélyes jelenségek leírása, fenomenológiai vizsgálata, valamint ezek időben és térben történő prognosztikájához és az előrejelzések verifikációjához szükséges módszerek kidolgozása. A gyakorlati repülésmeteorológia lényegében a repülések meteorológiai támogatásának megvalósulását garantálja, melynek keretében a repülések tervezéséhez, a repülések előtti felkészüléshez és a repülések végrehajtásához szükséges meteorológiai információ előállításáért és annak hozzáférhetővé tételéért felel. Ez utóbbi esetben tehát egy folyamatos szolgáltatásról van szó, melyet a repülés teljes vertikuma felhasznál (repülésirányítás, hajózó személyzet, repülő-műszaki szolgálatok stb.).

Munkánk során az elméleti és a gyakorlati repülésmeteorológia áttekintését kívánjuk röviden elvégezni. Ebben a cikkben a repülésmeteorológiai támogatást lehetővé tevő alapvető elméleti légkörtani összefüggéseket és alapfolyamatokat tekintjük át.

AZ ATMOSZFÉRA SZERKEZETÉNEK LEGFONTOSABB VONÁSAI

A Föld rendszerének globális megközelítésekor szembe tűnő tulajdonságként azt vehetjük észre, hogy bolygónk alapvetően egy megközelítően gömbszimmetrikus struktúrát alkot. Mélyebben vizsgálva ezt a szerkezetet megállapíthatjuk, hogy a földi rendszerben elhelyezkedő szubsztrátum elrendeződése további finomabb szisztémát követ, melynek alapja a rendszert alkotó anyag sűrűség szerinti gömböves formációja. A Föld belsejéből kiindulva a felszín felé haladva a sűrűség folyamatos csökkenését tapasztalhatjuk (a gömbövek határán a sűrűség értékek ugranak), de nagyságrendileg ez a változás nem jelentős.

Azonnal megváltozik a helyzet, amikor elérjük a felszínt és egyben a legkülső szférát, amit légkörnek nevezünk (természetesen az atmoszféra további részekre osztható), hiszen a felszín-légkör határon a sűrűség megváltozása hirtelen közelítőleg három nagyságrendnyi. Ez a hatalmas ugrás a sűrűségben természetesen halmazállapotban történő változást is jelent, ami azt jelenti, hogy a légkör – már nem szilárd vagy folyékony, hanem - gáznemű szubsztrátumként tárul fel előttünk.

A nyugalomban lévő tiszta légkör, mint ideális gázkeverék

Tekintsük most atmoszféránk alsó, mintegy 60 km-es tartományát tehát gáznemű közegnek, melyet különböző elemek molekulái és atomjai alkotnak (elsősorban N_2 , O_2 , Ar , Ne stb.). Legegyen továbbá ez a légkör teljesen tiszta és vízmentes. Ez a gázkeverék jó közelítéssel ideálisnak nevezhető, hiszen molekulák, illetve atomok alkotják. Az ilyen gázok fizikai jellemzésére a sűrűség, a statikus nyomás és az abszolút hőmérséklet szolgál, mint állapotjelző. Ezek között érvényes az általános gázegyenlet, mely rögzíti a kapcsolatukat:

$$p = \rho RT \quad (1)$$

ahol p a statikus nyomást, ρ a sűrűséget, T az abszolút hőmérsékletet és R a gázállandót jelenti. Az ideális gázban lévő alkotórészek a gáz által kitöltött térben a Maxwell-eloszlásnak megfelelő sebességgel, valamint tömegüknek és sebességüknek megfelelően, mozgási energiával is rendelkeznek [1].

Fontos azonban megjegyeznünk, hogy ez a gáznemű anyag a Föld gömbszimmetrikus gravitációs erőterében létezik, mely egy kulcsfontosságú elrendeződést kényszerít a légkörünkre, ami a sűrűség és a statikus légnyomás vertikális eloszlását érinti. A gravitációs erőhatás a légkört oly módon rendezi el függőlegesen, hogy e két állapotjelző értéke a magassággal exponenciálisan csökken. Ezt az egyetemes összefüggést a jól ismert barometrikus magasságformulával jellemezhetjük:

$$p(h) = p_0 e^{-\frac{\rho_0 g h}{p_0}} \quad (2)$$

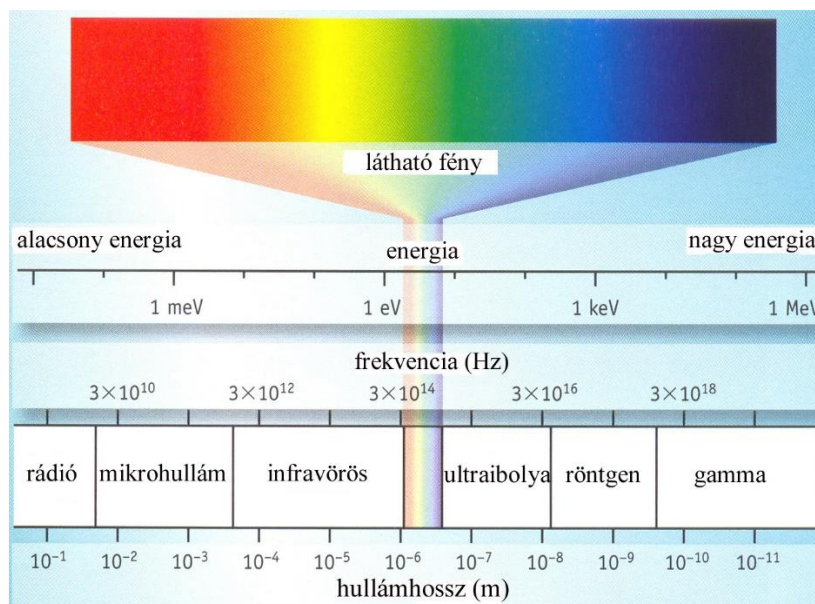
ahol h a felszín feletti magasságot, p_0 a felszíni, $p(h)$ a h magasságban mérhető statikus nyomást, ρ_0 a felszíni sűrűséget és g a gravitációs gyorsulást reprezentálja. Ez azt jelenti, hogy a statikus légnyomás két adott magassági szinten mérhető értéke között különbség van, vagyis függőlegesen megjelenik egy nyomási gradiens, ami felfelé irányuló erőt generál (bárikus gradiens erő). Newton törvénye alapján e légréseknek folyamatosan gyorsulva el kellene mozdulniuk felfelé, de ez ellentmond a tapasztalatnak, hiszen pontosan a fordítottját észleljük: a légkörben csak ritkán vannak jelentős függőleges irányú mozgások. Ennek oka az, hogy a felfelé mutató bárikus gradiens erőt a Föld vertikálisan lefelé mutató gravitációs ereje kiegyensúlyozza, így légkörünk alapjában véve statikus tulajdonságú, melyet a sztatika alapegyenlete fejez ki:

$$\frac{\Delta p}{\Delta z} = -\rho g \quad (3)$$

ahol p a statikus légnyomást, z a vertikális elmozdulást, ρ a levegő sűrűségét, g pedig a gravitációs gyorsulást jelenti [2].

Láttuk tehát, hogy a sűrűség és a statikus légnyomás függőleges szerkezetét gömbszimmetrikus gravitációs erőterben egy markáns, exponenciális csökkenés jellemzi és a légkör alaphelyzetben vertikálisan statikusnak mutatkozik.

De mi a helyzet az atmoszférikus hőmérsékleti profillal? Ehhez meg kell vizsgálnunk azt az energiaforrást, mely átjárja ez egész Föld-légkör rendszert, ami pedig nem más, mint a Naptól érkező elektromágneses sugárzás a sajátos spektrumával (1. ábra).



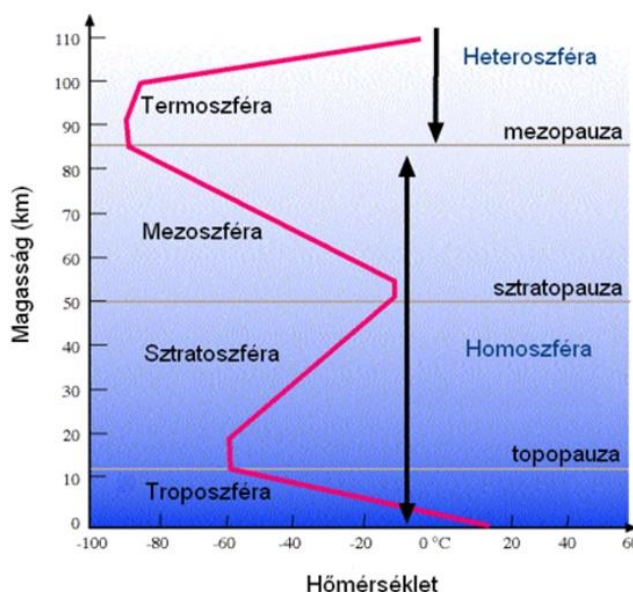
1. ábra Az elektromágneses sugárzás spektruma [3]

Ez a sugárzás a bolygóközi térben is terjed és amennyiben kölcsönhatásba kerül valamely anyaggal, annak termikus tulajdonságait képes megváltoztatni. A gázok is képesek abszorbeálni a sugárzást, melynek során a Naptól érkező sugárzás legnagyobb energiát hordozó komponensei (gamma és röntgen sugárzási-komponensek) „esnek áldozatul” először ennek. Ez a nagy-energiájú elnyelődés azzal jár, hogy az atomi szerkezet felbomlik, azaz ionok képződnek, melynek során kialakul az ionosféra, mely a légkör már korábban említett mintegy 60 km-es magasság feletti részét uralja. Ezzel együtt a nagy energiájú sugárzás mintegy kivonásra kerül a teljes spektrumból, ezáltal az ionizációval fűti is ezt a zónát. Mivel itt ionok az anyag alapvető összetevői, nem beszélhetünk ideális gázzal: plazmával van dolgunk, melyben alapvető fontosságúak lesznek a töltéssel rendelkező részecskék elektromos kölcsönhatásai (szemben az ideális gázzal). Az ionoszférát tovább nem vizsgáljuk, hiszen a hagyományos értelemben vett merev- és forgószárnyas repülés ezt a légrést nem érinti.

Az így már csonkult sugárzási spektrum UV tartományú része tovább lefelé haladva még elegendő energiával rendelkezik, hogy a molekuláris kötések felbontsa (az atomokat már nem tudja ionizálni) az O_2 és N_2 gázok esetében, így a légkör 20–50 km-es tartományában egy újabb jelentős abszorpcióval állunk szemben: itt képződik az ózon (O_3). Ennek eredményeképpen a felszínre lejutó sugárzás spektrumában már lényegében csak a látható fény és az annál kisebb hullámhosszú sugárzások találhatók meg.

A fentebb leírt elnyelődési folyamatok eredményezik azt a speciális függőleges hőmérsékleti profilt, melyet bemutatunk (2. ábra) [4].

Ennek a profilnak számunkra legfontosabb tulajdonsága az, hogy a felszíntől vertikálisan elmozdulva az egész bolygón egy lényegében lineáris hőmérséklet csökkenést tapasztalunk, melynek átlagos értéke $0,6\text{--}0,7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 100 méterenként (vertikális környezeti hőmérsékleti gradiens). Ez a csökkenés azonban – a földrajzi szélesség függvényében – kb. 7 és 16 km-es magasságban megáll (hazánk esetében ez a magasság 10–12 km). A légkörnek ezt az alsó zónáját troposzférának nevezzük. Innen egy kis magasságú izotermikus réteg következik (tropopauza), majd – a korábban leírt ózon-képződés miatti UV tartományú elnyelődés miatt – a magassággal nőni, majd ismét csökkenni kezd a hőmérséklet (sztratoszféra).



2. ábra A légkör vertikális szerkezete és a hőmérsékleti profil

Forrás: Levegőkörnyezet és az emberi tevékenység [4]

Bár a repülések egy kisebb hányada érinti a sztratoszférát, nekünk alapvetően a troposzférára (és kisebb mértékben a tropopauzára) kell koncentrálnunk. Ha így teszünk, akkor összegzésképpen elmondhatjuk, hogy olyan vertikálisan statikus ideális gázzal van dolgunk, melynek sűrűsége és statikus nyomása a magassággal exponenciálisan, míg a hőmérséklete lineárisan csökken.

A nyugalomban lévő tiszta légkör és a repülés dinamikai kapcsolatáról röviden

Most meg kell mutatnunk, hogy az atmoszféra állapota milyen módon van kapcsolatban a repülést lehetővé tevő erők kialakulásával. Az előző fejezetben már beszéltünk a levegő statikus nyomásáról, mely lényegében az adott szintben statikusan elhelyezkedő légréteg felett elhelyezkedő levegőoszlop súlya. Ebben az esetben ez a mérhető statikus légnyomás a levegő teljes (összes) nyomása is ekkor ($p_{\text{össz}}$). Bernoulli vette észre azt az összefüggést, hogy amennyiben a gáz áramlik (mozog), rá is érvényes az energia megmaradásának törvénye (eltekintve a viszkózitástól, stacionárius és összenyomhatatlan közeg esetén):

$$m \frac{v^2}{2} + mgh + pV = \text{konst.} \quad (4)$$

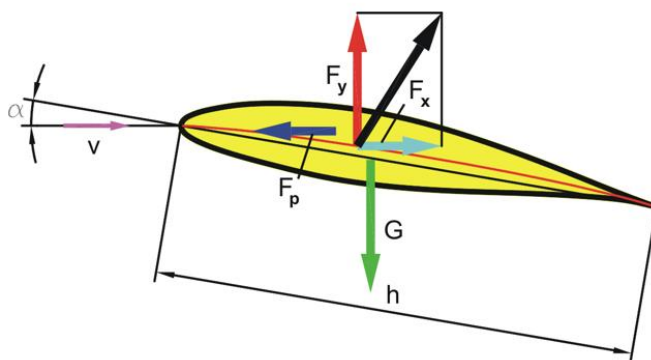
ahol v az áramlás sebessége, h a magasság, m az áramló közeg tömege, p a gáz statikus nyomása, V a gáz térfogata, g pedig a gravitációs gyorsulás. A fenti összefüggés azt mutatja, hogy az áramló gáz esetében a mozgási és a helyzeti energia összege állandó (hiszen a pV szorzat a Gay-Lussac

törvény értelmében szintén konstans, tehát össze is vonható a jobb oldallal). Ha most egységnyi térfogatú gázra vonatkoztatjuk Bernoulli összefüggését, akkor azt kapjuk, hogy:

$$\rho \frac{v^2}{2} + \rho gh = konst. \quad (5)$$

Az (5) egyenlet bal oldalán megjelenő mindkét tag nyomás dimenziójú (Pa) fizikai mennyiség, melyek közül balról az első az ún. dinamikus nyomás (q), a második pedig a hidrosztatikus (statikus) nyomás (p). Tehát az összefüggés azt mutatja meg, hogy a nyugalomban lévő levegő statikus nyomása, mint teljes nyomás az áramlás során két részre tagolható: egy a sebesség növekedésével növekvő dinamikus és egy azzal csökkenő statikus nyomásra. E két nyomás mindenkor összege – a korábban említett feltételek mellett – a nyugalomban lévő levegő statikus nyomásával egyezik meg.

A szárnyon ébredő aerodinamikai erő és annak komponensei



3. ábra A szárnyon ébredő aerodinamikai erő és annak komponensei [5]

Ha most az áramló levegőbe bele helyezünk egy testet és a levegő aszimmetrikus módon körül áramolja azt, úgy hogy a felső felület felett nagyobb sebességgel halad, mint az alsó alatt, akkor a test felső felülete felett kialakuló kisebb statikus nyomás miatt alulról felfelé nagyobb integrált nyomóerő hat a felületre. Mivel ez a nagyobb nyomóerő a súllyal szemben jelentkezik, ha elég nagyvá válik, képes a súlyerőt kiegyenlíteni: ekkor a test lebeg az áramló levegőben. Sőt, még emelkedni is képes a test, ha az áramlás sebessége tovább nő. Az áramlásba helyezett testen ébredő aerodinamikai erő mindig felbontható két komponensre: az áramlásra merőleges emelőerőre és az áramlás irányával megegyező ellenállás erőre (3. ábra). Az ellenállás erő a repülés számára nehezítő tényező (amit le kell győzni), míg az emelőerő teszi lehetővé a repülést magát (a merev- és forgószárnyas repülésnek egyaránt ez az alapja, így aerodinamikai értelemben a két különböző műszaki megvalósítás ugyanazon fizikai alapon nyugszik).

Egy repülőgép esetén az adott szárnyon képződő emelőerő nagysága a következőképpen írható le:

$$F_y = c_y \frac{\rho v^2}{2} A \quad (6)$$

ahol F_y az emelőerő nagysága, c_y az emelőerő tényező, ρ az áramló levegő sűrűsége, v az áramlás sebességének nagysága és A a repülőgép szárnyának felülete. Ha most megnézzük, hogy a jobb oldali összefüggésben két olyan faktor is szerepel (a levegő sűrűsége és annak – igaz ugyan, hogy burkoltan, de az áramlási sebessége), amely közvetlenül a légköri tulajdonságokhoz köthető, akkor világos lesz máris a repülőgép és az atmoszféra kapcsolatának egy fontos

mozzanata. Az emelőerő nagysága lineárisan függ a levegő sűrűségétől, tehát nyilvánvaló, hogy a sűrűség megváltozása azonnal visszahat az emelőerő nagyságára (hasonlóképpen az ellenállás erő esetén is ugyanez a helyzet) [6].

Azt már korábban láttuk, hogy a légkörben a sűrűség a magassággal egy rendkívül markáns csökkenést mutat. Így pl. 5500 m magasban a tengerszinten adott sűrűségnek csak a felét tapasztalhatjuk, ami azt jelenti, hogy – amennyiben változatlan a (6) egyenletben szereplő minden más tényező – az emelőerő a felére csökken. Másként fogalmazva ez azt is jelenti, hogy a legkisebb vízszintes repülési sebesség (átelési sebesség) ebben a magasságban a tengerszinten számított értékhez képest $\sqrt{2}$ -szörösére, azaz több mint 41%-kal megnő. (Most azt a kérdést nem vizsgáljuk, hogy a hajtómű számára szükséges oxigén mennyiség csökkenése milyen problémát okoz, és ezt hogyan lehet ellensúlyozni a megfelelő teljesítmény fenntartása érdekében.) Ebből adódóan, elsősorban a gyors magasság-változtatások esetén, különösen figyelni kell a repülő eszköz mozgásához szükséges emelőerő sűrűségváltozásból eredő megváltozására.

A horizontális irányú sűrűségváltozások a légkörben kevésbé szignifikánsak, mint vertikálisan. Ha a mintegy 10 km-es horizontális nagyságrendű távolságokra eső sűrűség-változásokat vizsgáljuk egy adott légköri szinten, azt tapasztalhatjuk, hogy azok elenyészőek, ritkán érik el ezen a távolságon az 5%-os értéket. Ebből levonhatjuk azt a következtetést, hogy adott szintben történő repülés esetében nem kell tartani a hirtelen sűrűség-változásból adódó emelőerő módosulástól. Ez nem jelenti azt, hogy egy adott hosszabb repülési útvonal esetén pl. a kiindulási és érkezési repülőtérén nem tapasztalhatunk jelentősen eltérő levegő sűrűséget, ami kihat az emelőerő mértékére, hiszen az időjárásban és a tengerszint feletti magasságban is szignifikáns lehet a különbség a két helyen (de ezek a különbségek gyakran órák elteltével lépnek fel, amire fel lehet időben készülni).

Az előző fejezetben említett troposzférikus hőmérséklet-csökkenésnek van egy további vetülete is, mely viszonylag ritkán kerül elemzésre, de repülésdinamika oldaláról fontos hozadéka van. A légkör szélesebb értelemben vett mozgásai között meg kell említenünk a nyomási perturbációk térben és időben történő tovahaladásának a jelenségét, amit hanghullámnak nevezünk. Jóllehet ezeknek a repülési dinamikára történő közvetlen hatása gyakran elhanyagolható, mégis ezeknek a longitudinális hanghullámoknak a terjedési sebessége rendkívül fontos, karakterisztikus paraméter az atmoszférában. A hang terjedésének sebességét a következő összefüggésben adjuk meg:

$$a = \sqrt{\frac{\kappa R T}{M_t}} \quad (7)$$

ahol a a hang terjedésének sebessége, κ az adiabatikus tényező, R az egyetemes gázállandó, T az abszolút hőmérséklet és M_t a száraz levegő moláris tömege. Ha figyelembe vesszük, hogy a légkörben az összetétel az alsó kb. 60 km-es magasságig állandó, akkor jó közelítéssel mondhatjuk, hogy $a = a(T)$ kapcsolat fennáll, tehát írhatjuk, hogy:

$$a = \sqrt{kT} \quad (8)$$

ahol a a hang terjedésének sebessége, k egy konstans és T továbbra is az abszolút hőmérséklet. A fenti összefüggésből adódik, hogy amennyiben a tengerszinten a hőmérséklet +20 °C (283,15 K), a tropopauzánál pedig –60 °C (213,15 K), a megfelelő hangsebességek értékei közelítően 343 m/s, illetve 293 m/s lesznek. De miért is fontos ez repülésdinamikai oldalról tekintve?

Tudjuk, hogy az aerodinamika egyik (ha nem a legfontosabb) dimenzió nélküli számértéke a Mach-szám (M), mely a lokális áramlási sebesség és a helyi hangsebesség hányadosa:

$$M = \frac{v}{a} \quad (9)$$

Ez a nagyon fontos hányados lényegében minden áramlást fizikailag leíró összefüggésben szerepel, sőt ennek alapján osztályozzuk az áramlási tartományokat is. Tekintve, hogy a troposzférában a hőmérséklet a magassággal lineárisan csökken, a fenti összefüggések alapján elmondhatjuk, hogy ugyanahhoz az áramlási sebességhez más-más Mach-szám tartozik a különböző magasságokban. A nagy magasságban történő hosszú távú repülésekhez (pl óceáni légtérben) generált repülési tervekben általában nem valamely sebesség értékének tartását írják elő, hanem a repülés Mach-számának az adott értéken történő tartását. Ha az adott szinten repülő repülőgépek mindegyik az arra a szintre érvényes Mach-számot tartja, akkor garantálható a biztonságos horizontális elkülönítés, ami alapvető repülésbiztonsági érdek.

Van azonban egy másik fontos momentum is, ami miatt a mindenkori Mach-szám ismerete esszenciálisan fontos a személyzet számára (természetesen ez alapvetően a nagyobb repülési sebességek esetén igaz, de sokszor ilyen esetekről van szó). Minden repülőgépre ismert az ún. kritikus Mach-szám értéke, ami azt a Mach-számot jelenti, amelynél a repülőgép egy bizonyos részén az áramlás lokálisan már eléri a hangsebességet. Itt most nem kívánjuk részletezni ezt a szituációt, de azt el kell mondanunk, hogy a kritikus Mach-szám vagy annál nagyobb érték esetén a repülésben olyan, nem kívánatos jelenségek lépnek fel, amelyek a repülést dinamikai oldalról rendkívül megnehezíthetik, illetve – erre a repülési tartományra fel nem készített repülőgép esetén – lehetetlenné is tehetik. Így a biztonságos repülést (az esetek nagy többségében) a kritikus Mach-szám alatt kell végrehajtani. Hogy a kritikus Mach-számhoz mekkora valós áramlási sebesség tartozik, az a mindenkori légkör hőmérsékletétől függ [6].

A víz a légkörben

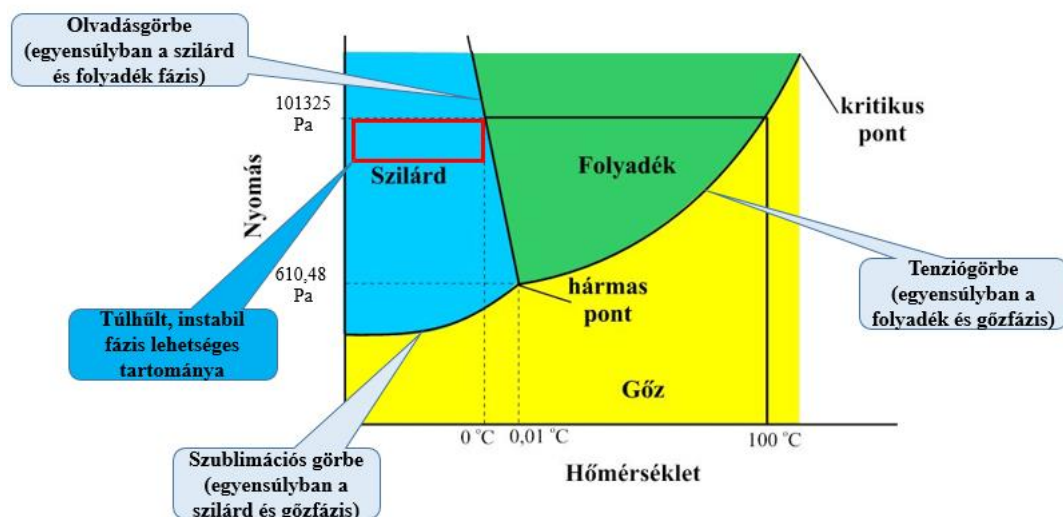
Légkörünk megjelenése, viselkedése szempontjából kiemelkedően fontos szerepe van a benne mindenkor jelenlevő víznek. Habár a víz légköri koncentrációja szinte minden esetben 4 tf% alatt van (sőt nagyrészt 1 tf% alatt), tehát első közelítésben szinte elhanyagolható mennyiségben található az atmoszférában, a megfigyeléseink azt mutatják, hogy ez a vegyület alakítja döntően az időjárást. Hogy ezt a nagyon fontos kijelentést igazoljuk, az alábbiakban megvizsgáljuk a víz tulajdonságait és a légköri állapotok alakításában játszott szerepét.

Az egyik legfontosabb momentum a légköri vízkészlet vonatkozásában az a tény, miszerint ez a vegyület mindhárom stabil halmazállapotban előfordul az atmoszférában. Köszönhető ez a légkörben kialakuló nyomási és hőmérsékleti viszonyoknak, melyek hozzávetőlegesen 1000–100 hPa és (–60)–(+40) °C értékek között változnak az atmoszféra azon rétegében, ahol a légköri vízkészlet található (4. ábra).

Az ábráról jól látszik, hogy az említett nyomási és hőmérséklet tartományban a víz 0 °C alatt szilárd, e felett pedig folyékony és légnemű állapotban egyaránt előfordul. Mivel a légkör egy adott tartományában a légnyomás, de még inkább a hőmérséklet jelentősen megváltozhat, az atmoszférában jelen levő H₂O esetében gyakori halmazállapot-változás figyelhető meg. Ezeknek a fázisátmeneteknek rendkívül fontos szerepük van az alábbiak szerint:

- ➔ a halmazállapot megváltozásakor az anyagra jellemző mértékben energia (ún. latens hő) szabadul fel vagy nyelődik el, a fázisváltozás irányától függően. Ez a fajlagos halmazállapot-változási hő a víz esetén igen magas, így a nagy mennyiségben fázist váltó H_2O szignifikánsan befolyásolja a légköri energetikai folyamatokat. A latens hőnek kiemelkedő szerepe van a függőleges irányú mozgások kialakításában, amelyek a konvektív légköri folyamatokban öltenek testet és a vertikális szerkezetű felhőzet kialakításáért felelősek;
- ➔ a folyékony és/vagy szilárd halmazállapotú víz a légkörben felhőként és/vagy csapadékként jelenik meg. A felhőképződés és a hozzá kapcsolódó csapadékképződés az időjárás alapvető folyamatai közé tartoznak, melyek a repülésre is számos hatást fejtenek ki;
- ➔ a gáznemű állapotban lévő víz gyakorlatilag teljesen átlátszó (hasonlóan a többi gázhoz), tehát a légkör optikai tulajdonságait kevésbé befolyásolja. Ugyanakkor, abban az esetben, amikor folyékony vagy szilárd halmazállapotban van jelen az atmoszférában, a rövidhullámú sugárzás szempontjából jelentős veszteség mutatkozik, így a látástávolság komoly csökkenésével kell számolnunk, ami repülés közben lehetetlenné teheti a vizuális alapú navigációs folyamatot;
- ➔ beszélünk kell a H_2O esetében egy olyan, instabil, átmeneti állapotról is, melyet túlhűlésnek nevezünk. Akkor tapasztalható ez a fázis, ha a víz lassan, jórészt nyugalmas környezetben, a pozitív hőmérsékletű tartományból lehűl a fagyáspontja alá. Ekkor a vízcseppek ugyan még folyékonyak maradhatnak (akár egészen -30 °C hőmérsékletig is), de ez az állapot instabil módon áll fenn. Ez azt jelenti, hogy amennyiben külső hatás éri azonnal, szinte robbanásszerűen megfagy a korábban cseppfolyós halmazállapotú vízcsepp. Ennek a folyamatnak a repülőgépek felületi jegesedésének kialakulásában van nagy szerepe, amit szintén későbbi munkánkban tárgyalunk részletesen.

A víz fázisdiagramja



4. ábra Általános fázisdiagram és a víz állapotdiagramja (a szerző által készített ábra)

Meg kell említenünk egy további, igen fontos tényt a nedves levegővel kapcsolatban, aminek repülésmeteorológiai vonzata fundamentális. Egyrészt, az (1) összefüggésből világosan adódik, hogy az egyenlő légnyomású levegőtestek közül a melegebb, kisebb sűrűséggel rendelkezik. Másrészt, a száraz levegő sűrűségét ismertnek véve, felmerül a kérdés, hogy a nedves levegő sűrűsége hogyan viszonyul a száraz levegő sűrűségéhez ugyanazon a nyomáson? Felhasználva

az ideális gázok állapotegyenletét és a levegő vízgőz tartalmának jellemzésére használt mérőszámokat, a nedves levegő sűrűségét az alábbi formulával számíthatjuk:

$$\rho_{nedves} = \frac{p}{RT} \left(1 - 0,377 \frac{e}{p} \right) \quad (11)$$

ahol ρ_{nedves} a nedves levegő sűrűsége, T az abszolút hőmérséklet, p a levegő légnyomása, R a gázállandó és e a gőznyomás. Ha a levegő száraz, akkor $e=0$, így a (11) összefüggés a jól ismert formulára (1) egyszerűsödik. Rendkívül fontos megjegyezni, hogy amennyiben a levegő tartalmaz vízgőzt, a nedves levegő sűrűsége kisebb lesz, mint az ugyanolyan nyomású és hőmérsékletű száraz levegőé. Ez egyébként abból a megfontolásból is jól látszik, hogy a víz molekulatömege (18,02 kg/kmol) kisebb, mint a száraz levegőt (mint gázkeveréket) döntően alkotó gázok (N_2 és O_2) molekulatömege (28,01 kg/kmol és 32,00 kg/kmol) [2].

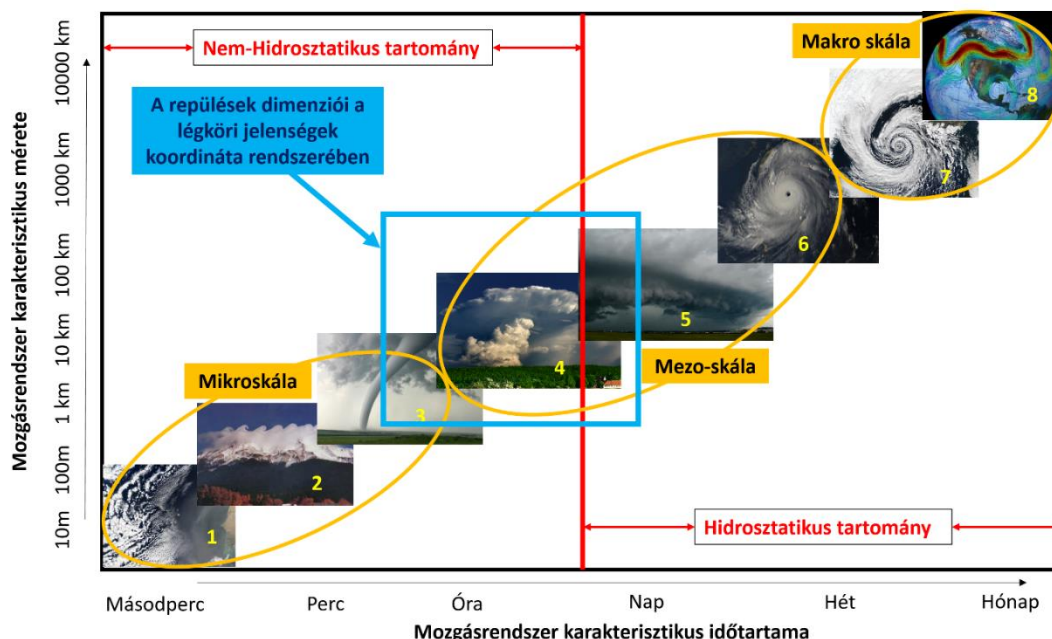
A mozgásban levő légkör és a repülés dinamikai kapcsolatáról röviden

Ahhoz, hogy a sűrűség horizontális megváltozásáról és a légkörben kialakuló mozgásokról, azok sebességének nagyságáról képet kapjunk meg kell vizsgálnunk a légköri nyomás és hőmérséklet megváltozásának okait. Az ideális gázban kialakuló nyomási inhomogenitások mentén bárikus gradiensek jelennek meg és ezek olyan áramlást indukálnak, melyek ezeket a nyomáskülönbségeket ki akarják egyenlíteni (egyensúlyra törekvés). A Föld esetében a Napból érkező energia (több ok miatt) egyenlőtlen időbeli és térbeli eloszlása a felszínen, termikus inhomogenitást okoz. Az eltérő hőmérsékletű felszínek felett eltérő légnyomású és sűrűségű levegőtestek alakulnak ki, melyek – a rendszer egyensúlyra való törekvéséből adódóan 3 dimenziós – de alapvetően mégis jellemzően horizontális irányú légmozgásokat gerjesztenek (szél).

Az így kialakuló légköri mozgások azonban – az atmoszféra kaotikus viselkedése mellett – a földi légkörre jellemző tér és időskála mentén rendeződnek el [7]. Ennek a mozgásrendszereket jellemző „rendnek” a legfontosabb tulajdonsága, hogy térben és időben csak „arányos módon” alakulnak ki a mozgások. Másképpen szólva, egy légköri mozgásformának minél nagyobb a térbeli kiterjedése, annál hosszabb ideig állhat fenn és fordítva (5. ábra).

Ennek a ténynek óriási jelentősége van prognosztikai szempontból, amit majd későbbi munkánkban vizsgálunk. Az ábráról az is világosan leolvasható, hogy a legnagyobb kiterjedésű, markáns tulajdonságokkal rendelkező mozgásrendszerek a planetáris hullámok, a ciklonok és az anticiklonok, melyek az ezer km-es mérettartományba és a 10 napos nagyságrendű élettartam intervallumba esnek. Ezek a rendszerek alkotják a makro skálát. A legkisebb méretű és élettartamú mozgások a skála másik végén találhatók a legfeljebb 1000 méteres méret- és perces élettartam skálával. Ide tartoznak a turbulens rendszerek, a légköri hullámfelhők és a tornádók, melyek alkotják a légköri mozgásrendszerek mikro skáláját. Az említett két skála között helyezkednek el az ún. mezo-skálájú rendszerek (zivatar, zivatarlánc, trópusi ciklon), melyek a repülés szempontjából kiemelkedően veszélyesek lehetnek [8].

A kialakuló mozgásrendszereket még egy másik, nagyon fontos szempont szerint is osztályozhatjuk: nevezetesen a bennük kialakuló mozgások sebességének horizontális és vertikális komponenseinek viszonya alapján. A nagyobb mérettartományhoz tartozó jelenségeket hidrosztatikus, míg a kisebbeket nem-hidrosztatikus skálájú mozgásrendszereknek nevezzük (4. ábra).



5. ábra A légkörben megfigyelhető mozgásrendszerek az élettartam és karakterisztikus méret függvényében (1.:turbulencia; 2.:hullámok; 3.:tornádó; 4.:zivatar; 5.:zivatarlánc; 6.:trópusi ciklon; 7.:mérsékelt övi ciklon; 8.:planetáris hullámok.) (a szerző által készített ábra)

A hidrosztatikus skálán feltáruló mozgások alapvető jellegzetessége, hogy a bennük kialakuló mozgás esetében a horizontális sebességkomponens nagysága mintegy egy nagyságrenddel nagyobb a vertikálisnál. Az így kialakuló nagy térségű mozgást a szabad légkörben a nyomási gradiens erő és az eltérítő erő (Coriolis-erő) alakítja ki, melyet geosztrófikus szélnek nevezünk. A geosztrófikus szél iránya mindig olyan, hogy áramlás irányából nézve az alacsonyabb légnyomás bal kéz felé esik. A geosztrófikus szél nagyságára vonatkozóan igaz az alábbi összefüggés:

$$v_g = \frac{1}{\rho f} \frac{\partial p}{\partial n} \quad (10)$$

ahol v_g a geosztrófikus szél sebességének nagysága, ρ a levegő sűrűsége, f a Coriolis-paraméter és dp/dn a horizontális bárikus gradiens értéke. Amit a fenti összefüggésből meg kell állapítanunk az a következő:

- ➔ a geosztrófikus szél sebessége a magassággal nő, amennyiben a horizontális bárikus gradiens értéke ugyanaz marad függőlegesen, hiszen a sűrűség vertikálisan erősen csökken a légkörben;
- ➔ elhanyagolva a horizontális sűrűségváltozást, a geosztrófikus szél sebessége a horizontális bárikus gradiens nagyságával (térképen az izobársűrűséggel) arányos [8].

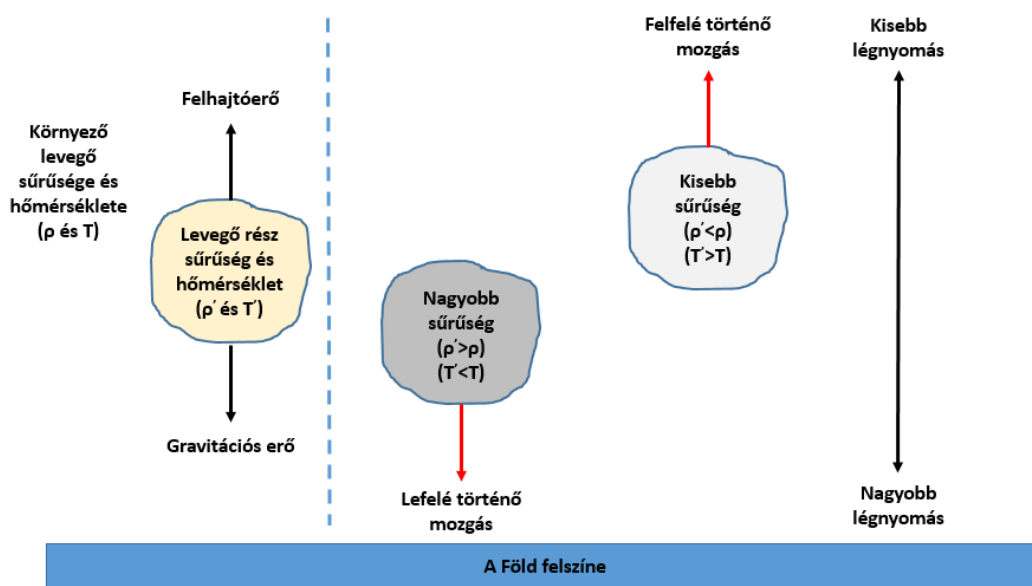
Ez az egyensúlyi áramlási mód uralkodóan a horizontálisan 100 km-es és annál nagyobb nagyságrendű mérettel rendelkező mozgásformákra jellemző. A legjellemzőbb, ebbe a csoportba tartozó mozgásrendszerek a mérsékelt övi ciklon és az anticiklon, melyekben a zárt izobárok mentén fújó egyensúlyi horizontális áramlás, a gradiens szél és vertikálisan egy nagytérségű fel- illetve leáramlás tapasztalható. A szóban forgó horizontális áramlás az északi félgömbön ciklonban az óramutató járásával ellentétes, míg anticiklonban azzal megegyező irányú.

Talaj közeli áramlás esetén azonban számolnunk kell egy harmadik erőhatással is, a súrlódási erővel. Ez az erő egyrészt csökkenti a szél sebességét, másrészt irányát is megváltoztatja. Az a

réteget, amelyben a sűrűlődni figyelembe kell vennünk sűrűlődni rétegnek nevezzük. Ennek magassága térben és időben változó, hazánk felett 600–1300 m között tapasztalható a magassága (ciklonális szituációk esetén vastagabb, míg anticiklonok esetén vékonyabb ez a réteg).

Más a helyzet a nem-hidrosztatikus skálán kialakuló mozgások esetén, ahol a függőleges irányú sebességkomponens összemérhetővé válik a horizontálissal. Ennek a ténynek fontos dinamikai hozadéka van, nevezetesen az, hogy a horizontális mozgásokat itt már alapvetően a bárikus gradiens kormányozza, hiszen itt a Coriolis-erő már két nagyságrenddel kisebb nagyságú. Ebbe a csoportba tartoznak a 10 km-es nagyságrendű és az ennél kisebb méretű mozgásrendszerek (pl. zivatarok, a konvektív áramlások és a turbulencia). Tekintve, hogy ezek élettartama már csak legfeljebb órás nagyságrendbe esik, hirtelen alakulnak ki, prognosztikai szempontból nehezen kezelhetők, ezért rendkívül veszélyesek a repülésre. Jellemző ezekre e rendszerekre, hogy a hozzájuk kapcsolódó mozgások rendezettsége jóval kisebb mértékű, mint a hidrosztatikus skálán megjelenő jelenségek esetén. Más szóval ez azt is jelenti, hogy az ezekben megjelenő mozgások sokkal kaotikusabbak, gyakorlatilag egy adott helyre és időpontra vonatkozóan az előrejelzésük csak nagy bizonytalansággal végezhető el [9].

Az intenzív függőleges mozgások kialakulásának lehetősége a légkör – korábban már említett, alapjában véve – hidrosztatikus állapotának megváltozásával magyarázható.



6. ábra A felhajtóerő kialakulása a légkörben (a szerző által készített ábra)

Egy adott légréz vertikális mozgását, a rá ható gravitációs és a hidrosztatikai felhajtóerő eredőjeként kialakuló erő határozza meg (6. ábra). Amennyiben a légréz sűrűsége valamely okból kisebb, mint a környező levegőé, abban az esetben függőlegesen felfelé indul el, hiszen a felhajtóerő nagyobb lesz, mint a gravitációs erőhatás. Fordított esetben természetesen vertikális süllyedést figyelhetünk meg. A légréz gyorsulásának nagysága az alábbi egyszerű összefüggésből adódik számunkra:

$$a = \frac{\rho' - \rho}{\rho} g \quad (11)$$

ahol a a légréz gyorsulása, ρ' a légréz sűrűsége, ρ a környező levegő sűrűsége és g a gravitációs gyorsulás nagysága. Minél nagyobb a fennálló sűrűségek közötti különbség, annál nagyobb

a vertikális gyorsulás mértéke. Jó közelítéssel mondhatjuk, hogy a két közeg (a légrész és a környező levegő) nyomása megegyezik. Az (1) egyenletet felhasználva a szóban forgó közegek hőmérsékleteit felhasználva is megfogalmazhatjuk a gyorsulás nagyságát:

$$a = \frac{T - T'}{T'} g \quad (12)$$

Ebben az esetben T' a légrész, T pedig a környező levegő abszolút hőmérséklete. Világosan látszik tehát, hogy a melegebb légrész felfelé, a hidegebb pedig lefelé gyorsul. A korábban tárgyalt hidrosztatikus helyzet akkor áll fenn, ha a sűrűségek és hőmérsékletek megegyeznek a légrész és a környezete esetében [2].

A repülés dinamikai szempontjából a horizontális és a vertikális légmozgás egyaránt fontos momentum. Az előző fejezetben tárgyalt (6) összefüggésben szereplő v áramlási sebesség a másik olyan repülésdinamikai tényező, amelyre a légkör közvetlen hatással van. Jelen esetben itt a v áramlási sebesség a repülő eszköz és a levegő egymáshoz viszonyított értékét reprezentálja (a repülésben definiált számos sebességfogalom közül a True Airspeed (TAS) felel meg ennek). Amennyiben a légkör abszolút „szélmentes”, akkor a v értéke megegyezik a repülőgép földhöz képest mért sebességével (Ground Speed, GS), ám ha a légkörben mozgás tapasztalható, abban az esetben ez már nem lesz igaz.

Ez a tény különösen a talaj közeli fel- és leszállási szituációkban válik létfontosságúvá, hiszen a tapasztalható szél iránya és a repülőgép helyzetének viszonyából vizsgálva a dolgot, a következőt mondhatjuk:

- ➔ amennyiben a szél szemből fúj (headwind), ennek sebessége mintegy hozzáadódik a repülőgép felszínhez mért sebességéhez, tehát segíti repülést biztosító emelőerő kialakulását. Ez a tény azt eredményezi, hogy rövidebb úton lesz képes felszállni a repülőgép (a szélmentes helyzethez képest);
- ➔ ha hátulról éri a szél a repülőgépet (tailwind), akkor pontosan az ellenkező szituáció alakul ki, azaz a szélesebbesség levonódik a repülőgép felszínhez mért sebességéből, tehát hátráltatja a biztonságos repüléshez szükséges emelőerő képződését. Ez hosszabb felszállási úthoz vezet, hiszen nagyobb felszínhez viszonyított sebesség esetén lesz meg az elegendő emelőerő a felszálláshoz (a mozgásmentes atmoszférához viszonyítva);
- ➔ abban a helyzetben, amikor a szél a repülőgép haladási irányára merőlegesen fúj (crosswind), a levegő áramlásából származó dinamikus nyomóerő oldalról történő megjelenése veszélyezteti a repülőgép hossz tengely körüli stabilitását, ami balesethez vezethet.

Természetesen nagyobb magasságban haladó repülőgépek esetén is jelentős a légköri mozgás hatása. A nagyobb magasságban fújó szelek szemből támadva – ha nincsenek is alapvető hatással a repülés dinamikai feltételeire – csökkentik a földhöz képest mért sebességet, ami azt jelenti, hogy a célrepülőtér eléréséhez több idő szükséges, míg hátszél esetén fordított a helyzet. A fentiek alapján elmondható, hogy míg le- és felszállás esetén a szembeszél, addig a nagyobb magasságú repülések vonatkozásában a hátszél a kedvezőbb.

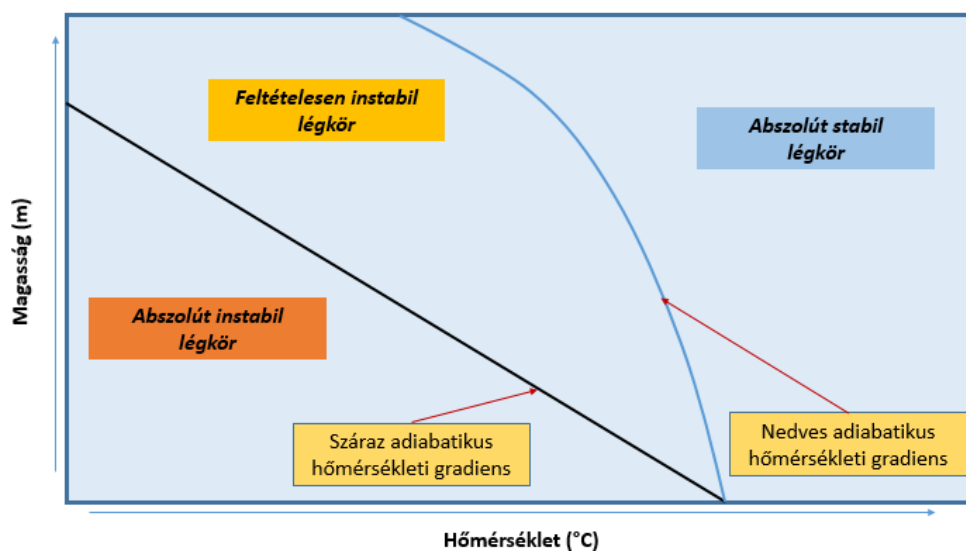
LÉGKÖRÜNK ALAPFOLYAMATAIRÓL

Instabilitás, konvekció és felhőképződés az atmoszférában

Az eddigi megfontolások alapján meg kell vizsgálnunk, hogy mikor adóttak a légkörben azok a feltételek, amikor a vertikális áramlások kialakulhatnak. Korábban láttuk, hogy amennyiben a légréteg hőmérséklete magasabb, mint a környezetéé, akkor felfelé mozdul el és fordítva (6. ábra). Ha a légkörben felfelé irányuló gyorsulás jelentkezik, akkor azt mondjuk, hogy instabil egyensúlyi helyzet áll fenn, míg ellenkező esetben stabilisnak nevezzük az atmoszféra állapotát. Repülés-meteorológiai szempontból az instabil légköri állapot rendkívül fontos, hiszen ilyenkor alakulnak ki a nagy függőleges kiterjedéssel rendelkező tornyos gomolyfelhők és a zivatarfelhők.

Az egyensúlyi állapot a légkörben a különböző típusú függőleges hőmérsékleti gradiensek vizsgálatával jellemezhető:

- ➔ a száraz levegőre vonatkozó adiabatikus (hőcserementes) hőmérsékleti gradiens, melynek értéke állandó ($-0,975\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$). Az adiabatikusan felfelé emelkedő száraz levegő ennyit hűl;
- ➔ a nedves levegőre vonatkozó adiabatikus (hőcserementes) hőmérsékleti gradiens, melynek értéke nem állandó (kb. $-0,45\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ a felszín közelében, a magasban tart a száraz levegő hőmérsékleti gradiensének értékéhez). Az adiabatikusan felfelé emelkedő nedves levegő ennyit hűl. Ez 100%-os telítettség melletti emelkedésnél jellemző érték (kondenzáció után, latens hő felszabadulásával kialakult gradiens);
- ➔ a száraz levegőre vonatkoztatott harmatpont hőmérsékleti gradiens, amely jó közelítéssel $-0,18\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$ értéket képvisel és állandónak tekinthető;
- ➔ a troposzféra – korábban már említett – vertikális környezeti hőmérsékleti gradiense, melynek átlagos értéke $-0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$.



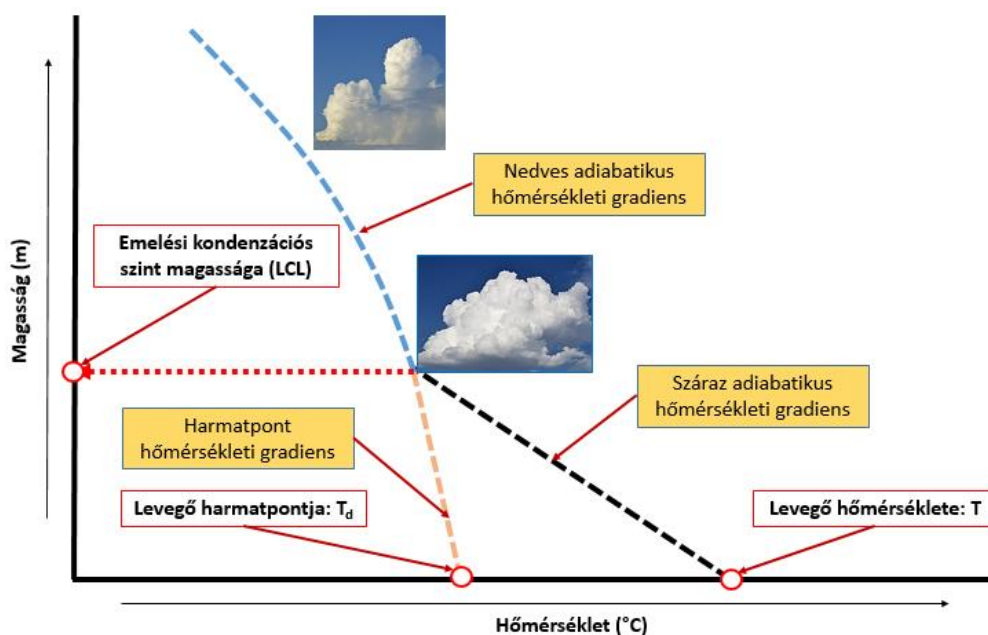
7. ábra Adott légoszlop stabilitásának meghatározása a száraz és a nedves adiabatikus hőmérsékleti gradiensek segítségével (a szerző által készített ábra)

Egy tetszőlegesen tekintett légoszlop stabilitása úgy adható meg, ha a tényleges függőleges menti hőmérsékleti gradienst összehasonlítjuk a száraz és/vagy a nedves hőmérsékleti gradienssel. A következő három alapesetet különböztethetjük meg (7. ábra):

- abszolút instabil légkör esetén a felszíntől felfelé haladva a hőmérsékletnek nagyobb mértékben kell csökkennie, mint a száraz adiabatikus gradiens esetében;
- abszolút stabil atmoszférában a levegőnek felfelé haladva kisebb mértékben kell csökkennie a hőmérsékletének, mint ami nedves adiabatikus hőmérsékleti gradiens esetén tapasztalható vagy izotermiának, esetleg inverzióknak kell lennie;
- ha a fentebb meghatározott feltételek egyike sem áll fenn, akkor feltételes instabilitású légkörrel van dolgunk. Ebben az esetben akkor lesz instabil a levegő állapota, ha megindul a kondenzáció, ellenkező esetben stabil marad az egyensúlyi helyzet [2].

A megfigyelések azt mutatják, hogy a legtöbb esetben a légkörben előforduló tényleges függőleges hőmérsékleti gradiens értéke a száraz és a nedves hőmérsékleti gradiens között mozog, hiszen átlagos értéke $-0,65\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, ahogy már említettük. Elmondhatjuk tehát, hogy az atmoszféra igen gyakran a feltételesen instabil egyensúlyi állapotban van.

A feltételesen instabil egyensúlyi állapot egyértelműen akkor válik instabillá, ha valamilyen okból a nedves levegőben kondenzációs folyamat indul be, vagyis a levegő telítetté válik (relatív nedvesség a 100%-ot megközelíti). A kondenzáció az esetek döntő többségében a levegőrész emelkedése során bekövetkező hűlésnek az eredménye, amikor a felszínről indulva a hőmérséklete csökken és egy adott magasságon eléri a harmatpontot (telített állapot). Innentől már a légrész emelkedése során kisebb mértékben hűl, hiszen a kondenzációból származó latens hő a légrész hőmérsékletét emeli. A folyamatot az alábbi ábrán szemléltetjük (8. ábra).



8. ábra Az emelkedő levegő és a benne zajló kondenzációs folyamat (a szerző által készített ábra)

A felszín feletti T hőmérsékletű és T_d harmatpontú emelkedő levegő hőmérséklete kezdetben a száraz adiabatikus hőmérsékleti gradiens értékével (fekete szaggatott vonal), harmatpontja a harmatponti hőmérsékleti gradiens (narancsszínű szaggatott vonal) értékével csökken mindaddig, míg a $T=T_d$ helyzet előáll (telített levegő, kondenzáció indul). Ebben a kitüntetett magasságban, amit emelési kondenzációs szintnek nevezünk (Lifted Condensation Level, LCL) megkezdődik a felhőképződés folyamata. A további emelkedés – megfelelő mennyiségű vízgőz tartalom esetén – egyre magasabbra építi a felhőzetet, de már a nedves adiabatikus hőmérsékleti

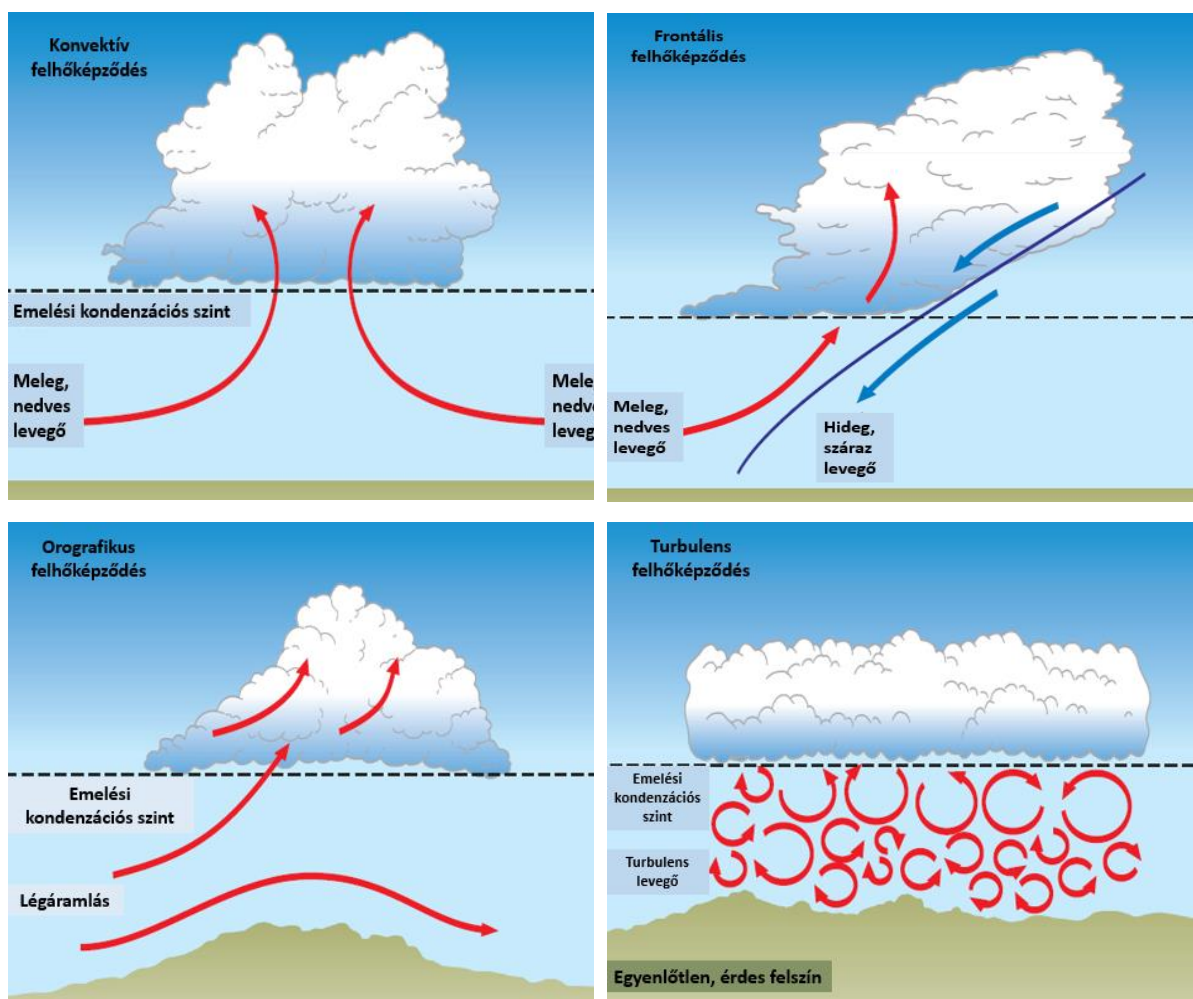
gradiens értékével csökkenő hőmérséklet mellett. Az így kialakuló felhőzet alapjának magasságát a jól ismert alábbi formulából kaphatjuk meg:

$$LCL = 120(T - T_d) \quad (12)$$

ahol LCL a kialakuló konvektív felhőzet alapjának magassága méterben, T a levegő hőmérséklete, T_d pedig a harmatpontja (°C-ban vagy K-ben mérve).

Láttuk tehát, hogy ahhoz, hogy a levegőben lévő víz kondenzálódjon (és egyben láthatóvá is váljon), hűlnie kell. Ez döntően a felszín közeli légrések felemelkedésével valósul meg. Ám a felhőzet kialakulásához szükséges emelés megvalósulása alapvetően az alább bemutatott módokon történhet meg (9. ábra). A leggyakoribb felhőképződési mód a konvektív áramlások által felfelé szállított levegőből történő kondenzáció. Ez szinte nap, mint nap megfigyelhető a nyári félévben.

A frontfelületek mentén történő feláramlás és az ezzel egyidőben zajló hűlési folyamat a mérsékelt övi ciklonban kialakuló meleg- és hidegfrontjánál egyaránt megfigyelhető.



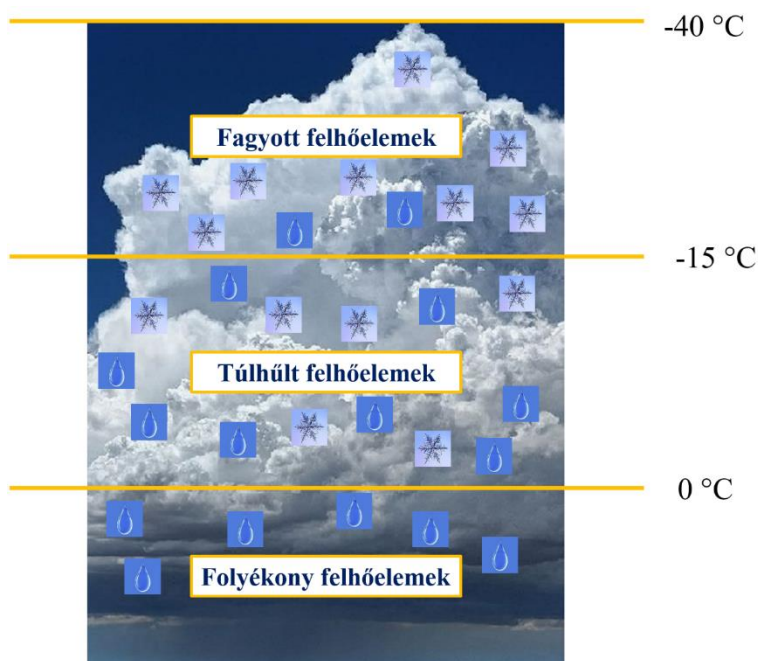
9. ábra A felhőképződés alapvető mechanizmusai (a szerző által készített ábra)

A jelentős domborzattal rendelkező terep felett a horizontális áramlás szignifikáns vertikális komponenssel rendelkezhet, ha a szél útjába orografikus akadály kerül. Ekkor a mozgás felfelé tartó emelőhatást fejt ki és az így vertikálisan áramló levegő – elérve az emelési kondenzációs szintet – telítetté válik, azaz megindul a felhőképződés folyamata. Intenzív áramlás mellett ez az emelő

hatás igen erős lehet, így a domborzat áramlásnak kitett oldalán, vastag felhőzet képződhet. Ez a felhőzet a domborzat tengelyével párhuzamosan akár 100 km-es hosszan is megfigyelhető.

Elsősorban a nyári félév során találkozunk a turbulens felhőképződéssel. Az így megjelenő gomolyos szerkezetű felhőzet kialakulásáért a planetáris határrétegben megjelenő kaotikus, turbulens áramlások okozta emelő hatás a felelős. Az intenzív felmelegedés hatására és a felszín szignifikáns érdekessége miatt kialakuló örvénylő légmozgás, a kondenzációs szint felett alakít ki felhőzetet.

A kialakult felhőzetet minden esetben folyékony, túlhűlt, szilárd halmazállapotú (fagyott) vagy ezek keverékéből álló ún. felhőelemek alkotják. Ezek a cseppek vagy kristályok kisméretűek, könnyűek, ezért a felhőzetben mindig jelen lévő függőleges mozgás segítségével a levegőben maradnak. Jellemző méretük a réteges felhőzet esetén 5–30 μm között mozog, legtöbbször Γ -eloszlás szerinti elrendeződéssel. A konvektív felhőzet felhőelemei majdnem egy nagyságrenddel nagyobb mérettartományba tartoznak (50–100 μm), melyeknek a levegőben tartásához már legalább 1–10 m/s sebességű vertikális áramlás szükséges [10].



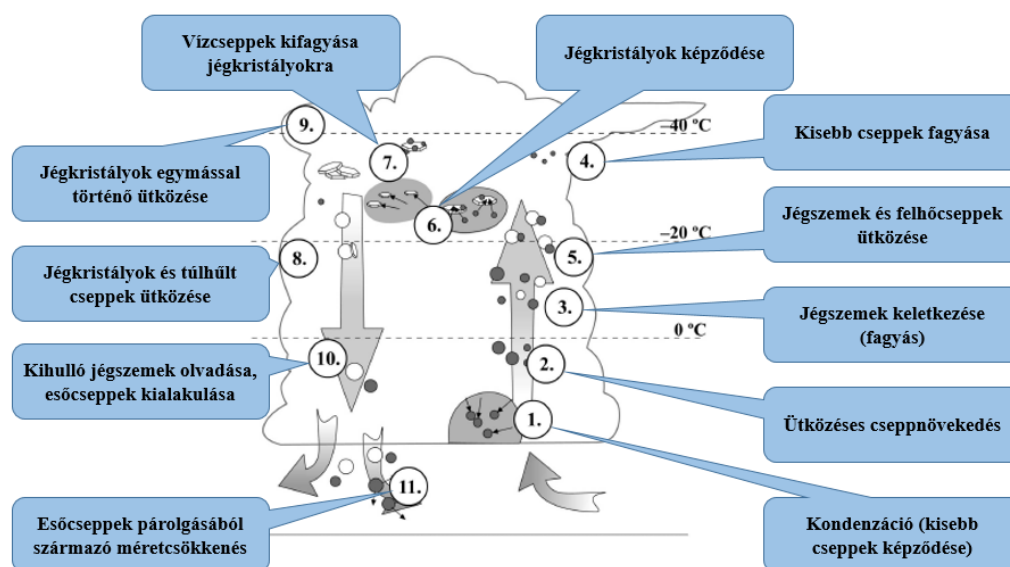
10. ábra Felhőelemek magasság szerinti eloszlása, tekintettel a hőmérsékletre (a szerző által készített ábra)

A felhőzet függőleges kiterjedésétől és a termikus viszonyok alakulásától - elsősorban a 0 °C-os izoterma magasságától – függően a felhőben megtalálható felhőelemek halmazállapota eltérően alakul. Ahogy korábban láttuk a víz fázisdiagramján, 0 °C hőmérséklet felett a víz folyékony és gáznemű állapotban fordul elő. Ebből adódóan, a 0 °C-os izoterma magassága alatt vízfelhőről beszélünk (folyékony felhőelemek), e felett azonban már vegyes halmazállapotú a felhő kb. a –40 °C-os hőmérsékleti határig. Ebben a zónában – repülésmeteorológiai szempontból – a legfontosabb felhőalkotók a túlhűlt, instabil állapotú cseppek, melyeknek a repülőgépek felületi jegesedésében van fontos szerepük. Természetesen a túlhűlt felhőelemek mellett a hőmérséklet csökkenésével (a magasság növekedésével) a szilárd halmazállapotú jégkristályok is megjelennek, sőt ezek koncentrációja növekszik. Elérve a kb. –40 °C-os hőmérsékleti határt, az összes felhőelem megfagy, így ettől a szinttől felfelé jégfelhőről beszélünk (10. ábra).

Csapadékképződés

Az eddigi megfontolások alapján láttuk, hogy a légkörben kialakuló felhőzet folyékony és szilárd cseppeket tartalmaz, melyek folyamatosan mozognak. Mozgásuk során kölcsönhatásba kerülnek egymással, rugalmasan és rugalmatlanul ütköznek, halmazállapotot váltanak. Ezeknek a komplex folyamatoknak eredményeképpen cseppméret növekedést tapasztalunk a felhőben, ami azt jelenti, hogy kialakulnak 100 μm -nél nagyobb cseppek is, melyeket már esőcseppeknek nevezünk. Ez a méretnövekedés tömegnövekedéssel is együtt jár és egy idő után az aktuális feláramlási sebesség már nem lesz elég a csepp felhőben tartásához, így elindul a felszín irányába: megkezdődik a csapadék kihullása.

A legfontosabb csapadékképződési módokat, a leginkább összetett mikrofizikai folyamatokat magában foglaló zivatarfelhő példáján mutatjuk be, Geresdi 2004 nyomán (11. ábra) [10].



11. ábra Komplex csapadékképződési mechanizmusok zivatarfelhőben [10]

Jól látható, hogy a csapadékelemek képződése számos módon valósulhat meg, melyekben dinamikus és termikus hatások egyaránt szerepet játszanak. A felhőben uralkodó függőleges irányú nagy sebességű – ezért erősen turbulens és örvényes – áramlás hatására a kialakult és kialakuló cseppek és csepp-kezdemenyek gyakran ütköznek egymással. Ezek lehetnek ugyanazon vagy különböző halmazállapotban, mely attól függ, a felhőzet mely magassági régiójából származnak. Az rugalmatlan ütközések során fragmentálódnak (szétdarabolódnak) mások rugalmatlanul ütköznek, vagyis összetapadnak, így méretük változik térben és időben (ábra 2., 5., 8., 9. folyamatok). Az alapvetően halmazállapotváltozásból származó cseppméret növekedés (vagy éppen csökkenés) során kondenzációs, párolgási, kifagyási, olvadási és túlhűlési termodinamikai folyamatok mentén történik a méretváltozás (ábra 1., 3., 4., 6., 7., 10., 11. folyamatok) [10]. A felhőt elhagyó, kihulló csapadék jellege persze ezeknek a dinamikai és termikus hatásoknak köszönhetően többféle lehet, de az így kialakuló csapadékfajták repülésre veszélyes hatása igen eltérő.

ÖSSZEFOGLALÁS

Munkánkban áttekintettük az atmoszféra szerkezetét, a benne megfigyelhető alapfolyamatokat, melyek fontos és egyben veszélyes jelenségeket is kialakíthatnak. A légkör alapszerkezetét a hidrosztatika jellemzi, mely esetben a függőleges gyorsulások elhanyagolhatók a horizontális irányúakhoz képest. Ez a nagyléptékű légköri mozgásrendszerek talán legfontosabb tulajdonsága.

Azonban légkörünk esetében sem mindig áll fenn ez az egyensúlyi helyzet, mert időnként ún. nem-hidrosztatikus állapotba kerül, amikor is a vertikális mozgások döntően befolyásolják az atmoszféra viselkedését. Ilyenkor hatalmas felhőtornyok képződnek és kialakulnak a zivatarok. Ez az állapot azonban inkább a kisebb léptékű jelenségek mozgatórugója, viszont dinamikájuk és rövid élettartamuk miatt a repülésre a legnagyobb veszélyt pontosan ezek hordozzák.

A légköri alapfolyamatok áttekintésekor pedig a szél, felhőzet és csapadék kialakulásának folyamatát vizsgáltuk meg, azokkal a mozgásokkal, fizikai folyamatokkal együtt, amelyek előidézik ezeket.

Ahhoz, hogy a közszolgálati feladatokat ellátó repülések meteorológiai biztosításának korszerű lehetőségeit a későbbiekben megtárgyaljuk, szükséges volt áttekinteni ezeket a fontos légköri alapvonásokat, mert ezek ismerete egyben ki is jelöli majd számunkra az említett támogatás megvalósításához szükséges ösvényt, de – ha diszkréten is – ennek az ösvénynek a lehetséges határait is jelzi egyben.

A mű a KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 azonosítószámú, „A jó kormányzást megalapozó közszolgálat-fejlesztés” elnevezésű kiemelt projekt keretében működtetett Zrínyi Miklós Habilitációs Program keretében, a Nemzeti Közszolgálati Egyetem felkérésére készült.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Budó Ágoston: Kísérleti fizika I. Tankönyvkiadó, Budapest, 1986.
- [2] Götz Gusztáv és Rákóczi Ferenc: A dinamikus meteorológia alapjai. Tankönyvkiadó, Budapest, 1981.
- [3] http://astro.u-szeged.hu/ismeret/urtavcsovek/03abra_spectrum_hun.jpg
- [4] Gelencsér András, Molnár Ágnes, Imre Kornélia: Levegőkörnyezet és az emberi tevékenység. Pannon Egyetem, Veszprém, 2012. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2010-0012_levegokornyezet/index.html
- [5] <https://upload.wikimedia.org/wikipedia/hu/thumb/e/e8/Lift.png/300px-Lift.png>
- [6] Charles E. Dole and James E. Lewis: Flight Theory and Aerodynamics. Wiley-Interscience, New York, 2000.
- [7] Orlanski I.: A Rational Subdivision of Scales for Atmospheric Processes. Bull. Am. Meteorol. Soc. 1975. Vol. 56. pp. 527–530
- [8] Sándor Valéria és Wantuch Ferenc: Repülésmeteorológia. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 2005.
- [9] Roger A. Pielke: Mesoscale Meteorological Modeling. Academic Press, San Diego, 2002.
- [10] Geresdi István: Felhőfizika. Dialóg Campus Kiadó, 2004.

ON THE METEOROLOGICAL SUPPORT FOR THE PUBLIC SERVICE AVIATION I. ATMOSPHERIC STRUCTURES AND PROCESSES IN AVIATION METEOROLOGY CONTEXT.

In order to develop a special meteorological support for public service purpose aviation we have to deep know about atmospheric structures, fundamental processes and phenomena. In our work we show the hydrostatic structure of the atmosphere with the special regard to the pressure, density and temperature profiles. After that we demonstrate the horizontal and vertical flows in the air and show their dynamic backgrounds, too. Special priority is shown in convective and precipitation processes with their special moments. Of course, we do this things in closely context related to the flight itself.

Keywords: *atmosphere, meteorological support, hydrostatic state, convection, atmospheric motion systems.*

Bottyán Zsolt (PhD)
tanszékvezető, egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774

Bottyán Zsolt (PhD)
Head of Department, associate professor
National University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Institute of Military Aviation
Department of Aerospace Controller and Pilot Training
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774



http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem_Bottyán_Zs.pdf

A KÖZSZOLGÁLATI CÉLÚ REPÜLÉSEK METEOROLÓGIAI TÁMOGATÁSÁRÓL II. LÉGKÖRÜNK JELENSÉGEI REPÜLÉSMETEOROLÓGIAI MEGKÖZELÍTÉSBEN

A mai modern közszolgálati célú repülésmeteorológiai támogatás alapfeltétele, hogy részletesen ismerjük azokat a légköri folyamatokat, amelyek veszélyesek lehetnek a repülésre. Munkánkban ezért részletesen tárgyaljuk a látástávolság degradációjával, a repülőgépek felületi és hajtóművének jegesedésével, az intenzív légköri mozgásokhoz kapcsolható turbulenciával és szélnyírással valamint a légköri elektromossággal kapcsolatos folyamatokat, jelenségeket. Tesszük ezt annak reményében, hogy megismerve ezeket, elegendően jó előrejelzések készülhessenek az itt tárgyalt jelenségeket illetően, melyek alapját képezhetik egy, a közszolgálati célú repüléseket kiszolgáló meteorológiai támogató rendszernek.

Kulcsszavak: látástávolság, felületi jegesedés, turbulencia, szélnyírás, villámcsapás

BEVEZETÉS

Ahogy korábbi munkánkban említettük, a repülés alatt számos olyan jelenség fordulhat elő a légkörben, melyek valamilyen szempontból veszélyt jelenthetnek magára a repülési folyamatra. Ezeket a légköri jelenségeket most röviden át kívánjuk tekinteni, mert ez által kerülünk annak a tudásnak a birtokába, mellyel ezek prognosztikáját meg lehet közelíteni, ami lehetővé teszi a repülésre veszélyes hatásuk eliminálását is.

Előző tanulmányunkban meghatároztuk az atmoszféra strukturális szerkezetét és alapfolyamatait, így ezek után arra a feladatra vállalkozunk, hogy az korábbiak alapján felvázoljuk azokat a jelenségeket, melyek előfordulása a repülés – már említett komplex – folyamatát jelentősen befolyásolják.

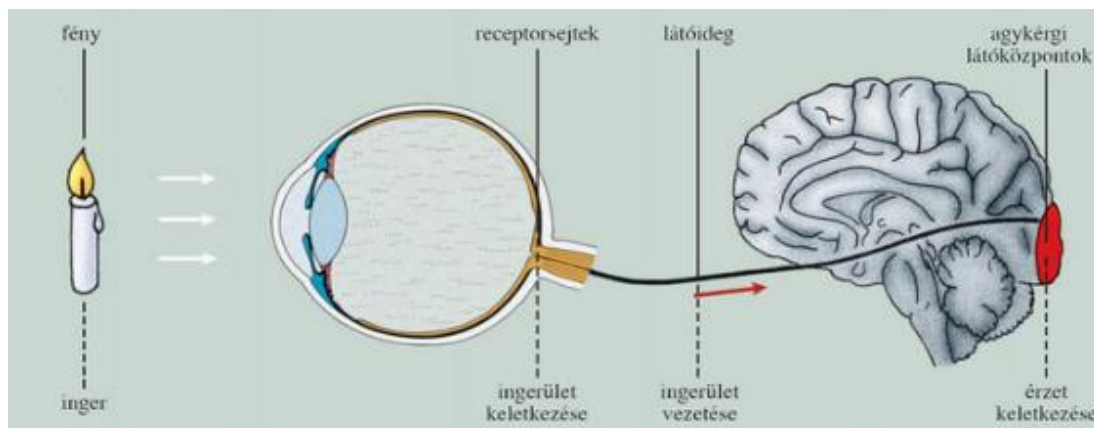
A szóban forgó fenomének mindegyike kapcsolatban van a teljes repülési folyamattal, legyen szó aerodinamikáról, vizuális észlelésről, navigációról vagy éppen kommunikációról. Fontosságuk veszélyességükből fakad, éppen ezért, ismernünk kell a tulajdonságaikat, viselkedésüket, mert csak ebben az esetben tudjuk megfelelő pontossággal prognosztizálni őket.

A REPÜLÉS SZEMPONTJÁBÓL KÜLÖNÖSEN FONTOS LÉGKÖRI FOLYAMATOK FENOMENOLÓGIÁJA

A látástávolság értékének megváltozása az atmoszférában

A repülési folyamatban alapvető szerepet játszanak a fedélzeten dolgozó személyzet vizuális észleléseiből fakadó döntések. Igaz ez akkor is, ha manapság számos olyan technikai berendezés segíti a repülést – a földön és a fedélzeten egyaránt – amelyek lehetővé teszik pl. a navigációt rossz látási viszonyok mellett is. Ugyanakkor, egyrészt ezek a fedélzeti eszközök nem minden repülő eszközre és repülőtérre kerülnek installálásra, másrészt a fel- és leszállás alatt minden esetben szükséges a személyzet részéről a földi tereptárgyak látás által történő pozíció-

meghatározása, a biztonságos repülés végrehajtásához. A fentiek alapján világos tehát, hogy a látás illetve a láthatóság esszenciálisan fontos kérdés a repülésben is. Ahhoz, hogy világos képet kapjunk a láthatóság megváltozásának és a légkör állapotának kapcsolatáról, át kell tekintenünk röviden, magának a látásnak a folyamatát.



1. ábra A látás folyamata [1]

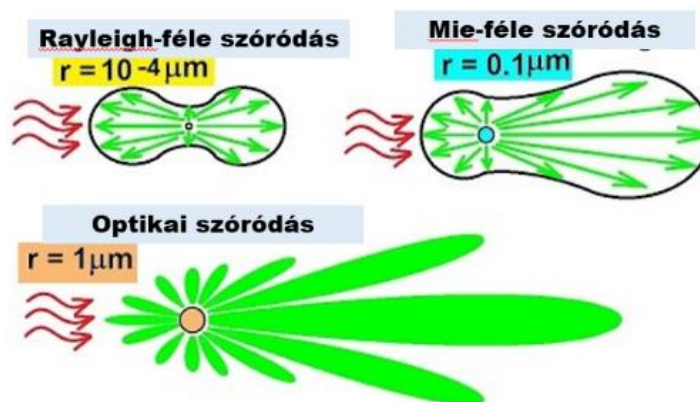
A természetben előforduló tárgyak vizuális észlelése az emberi szem és idegrendszer segítségével történik (1. ábra). A szem a tárgyról érkező elektromágneses hullámok (380–780 nm) észlelésére kialakult szervünk, mely adott intenzitású és hullámhosszú sugárzás beérkezésekor ingerületet továbbít az agykéreg látóközpontjába, ahol maga az érzet képződik. Ahhoz, hogy az érzet kialakuljon (ténylegesen lássuk a tárgyat) szükséges, hogy elegendő intenzitású legyen az a sugárzás, amely a tárgyról a szembe bejut. Ez ugyan még csak szükséges feltétele a látásnak, hiszen a tárgy környezetétől történő elkülönítése is szükséges, ahhoz, hogy lássuk azt. (pl. ha egy fehér papírlapot helyezünk egy ugyanolyan fehér színű tábla elé, a lapot nem fogjuk tudni észre venni, holott elegendő intenzitású a fény, ami a szemünkbe jut róla, de a környezettől nem különül el.) Ezért tehát meg kell vizsgálnunk, hogy a tárgy és a szem között haladó sugárzás intenzitása változhat-e és ha igen, a légkör ebben milyen szerepet játszik?

Ismert számunkra, hogy az elektromágneses sugárzás terjedése közben – a közeg tulajdonságaitól és a sugárzás hullámhosszától függő mértékben – veszteségeket szenved (Bouguer–Lambert–Beer-törvény) [2]. Ezeket összefoglaló néven extinkciónak nevezzük, melybe a visszaverődés, az elnyelődés és a szóródás összessége tartozik bele. A légkört alkotó valós szubsztátum a fő alkotó gázok (nitrogén, oxigén, argon, szén-dioxid, vízgőz, ózon stb.) mellett tartalmaz – térben és időben jelentősen eltérő koncentrációjú – szilárd és cseppfolyós halmazállapotú részecskéket és egyéb szennyező anyagokat is, mely utóbbiakat aeroszolnak hívunk. Ezen a közegen keresztül hatolva a látható fény is gyengülést szenved el, melynek a látás szempontjából van igen fontos jelentősége, ugyanis az előbb említett légköri alkotókon történő szóródás jelentős intenzitáscsökkenést idéz elő, a szóban forgó esetben (2. ábra).

Ahogy a fenti ábrán is látható, eltérő karakterisztikájú szóródást tapasztalhatunk a légkörben attól függően, hogy a korábban említett összetevők közül, melyek esetében történik meg a jelenség maga.

A legkisebb méretű atomok és molekulák esetében tapasztalhatjuk a *Rayleigh-féle szóródást*, melyre jellemző, hogy közel szimmetrikus a szórt sugárzás karakterisztikája és a légkört alkotó

alapgázok miatt jön létre (ez okozza a kék színét a tiszta égboltnak). Ennek a szórásnak a mértéke a légkörben elhelyezkedő atomok és molekulák számával arányos. Mivel azonban a felszín közelében az alapgázok koncentrációja kevésbé változik, a Rayleigh-féle szóródás okozta sugárzásgyengülés jó közelítéssel konstansnak vehető.



2. ábra A légköri sugárzásgyengülést okozó szóródások fajtái. (a szerző által készített ábra)

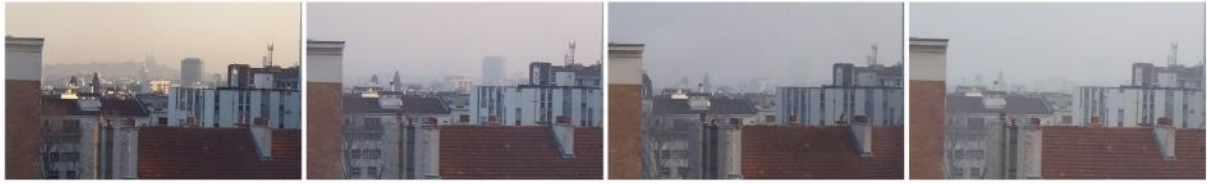
A *Mie-féle szóródás* alapvetően a jóval nagyobb méretű légköri aeroszol részecskék okozzák és ebben az esetben már egy jelentős előre-szóródást is megfigyelhetünk. A fénygyengítés ebben a szórási fajtában általában a $0,1 \mu\text{m}$ és az $1 \mu\text{m}$ közötti aeroszol-mérettartományban (optikailag aktív tartomány) a legnagyobb, hiszen ebben az esetben igaz az, hogy a cseppméret és a fény hullámhossza közel azonos.

A legnagyobb méretű atmoszférikus elemeken (felhőcseppek, csapadék elemek) történik az *optikai szóródás* jelensége, amikor a haladó fénysugár előre történő szóródása még karakterisztikusabb és egyben hullámhossz-független is (emiat látszik fehérnek-szürkének a felhő és a köd). A fentiek alapján, a látható tartományú elektromágneses sugárzás (fény) intenzitásának változékonyságát alapvetően a Mie-féle és még inkább, az optikai szóródás erőssége szabja meg, amely fizikai folyamatok az aeroszol-hoz illetve a felhő- és csapadékcseppek jelenlétéhez (koncentrációjához) kapcsolódnak.

A láthatóság kérdéséhez visszatérve beszélnünk kell két fontos fogalomról: az egyik a *kontraszt*, a másik pedig a szem ún. *látásküszöb* értéke. A kontraszt nem más, mint egy adott tárgy és a hozzá tartozó háttér képeinek az eltérése. Munkánkban csak az ún. megvilágítás kontraszt értékével foglalkozunk, melynek értékét az alábbi egyszerű formula segítségével kaphatjuk meg:

$$C = \frac{L_T - L_H}{L_H} \quad (1)$$

ahol L_T a tárgyhoz tartozó képpontok megvilágítása, L_H pedig a háttér képpontjainak ugyanezen értéke és C maga a kontraszt érték. Egyrésztől világos, hogy ha a test fekete, a kontraszt értéke -1 , hiszen ez esetben a testről nem jut fény a szemünkbe. Más esetben, ha a tárgy sötétebb a háttérnél, akkor a kontraszt negatív, pozitív kontraszt esetén pedig a tárgy maga világosabb a háttérénél. Nulla a kontraszt értéke, ha a tárgy és a háttér megvilágítása megegyezik és ebben az esetben a tárgy és a háttér nem különíthető el a szem által. A légköri extinkció okozta sugárzáscsökkenés miatt történő kontraszt-változást a 3. ábra mutatja. Balról jobbra haladva, az extinkció növekedéséből adódó kontraszt-változás szembeutó a tárgyak homályosabbá válásával egyidőben [3].



3. ábra A kontraszt csökkenése a légköri extinkciós együttható növekedése során [3]

A látásküszöb az a legkisebb kontraszt, amelyet még a szemünk érzékelni képes. Látni fogjuk, hogy egy adott tárgy esetén a szem és a tárgy távolságának növekedésével (ha minden más tényező változatlan) a kontraszt csökken és eléri a látásküszöböt, ami azt jelenti, hogy az objektum, abból a távolságból már szemmel nem észlelhető. Fontos megjegyeznünk, hogy a nappali időszakban a látásküszöb függ a látószög nagyságától, mégpedig oly módon, hogy kisebb látószöghöz kisebb látásküszöb érték tartozik.

Beszélnünk kell a szem egy másik fontos megvilágítással kapcsolatos látásküszöb-értékéről, az ún. *észlelési küszöbről* is. Ennek főleg az éjszakai észleléseknél van jelentősége, hiszen pl. a hirtelen felvillanó pontszerű fényforrások észlelése sokkal könnyebben megvalósul, mint egy kiterjedt, megvilágított felület esetén. Ekkor ugyanis a látószög határesetben nullának vehető. Fontos megemlítenünk, hogy nappali időszakban állandó látószög esetén a látásküszöb értéke nem függ a háttérmegvilágítástól és értéke 0,02 [2][4].

Térjünk rá ezek után a látástávolság, a szem és a környezet kapcsolatának fizikai leírására a nappali időszakra vonatkozóan. A korábbiak alapján a látástávolság az a távolság, amely esetén a szóban forgó tárgy kontrasztja egyenlő a látásküszöbvel. Egy fekete test a horizont síkjához, mint háttérhez képest az alábbi kontraszt értékkel jellemezhető:

$$C = \frac{L_h[1 - e^{-\beta R}] - L_h}{L_h} = -e^{-\beta R} \quad (2)$$

ahol C a kontraszt, L_h a megvilágítás a horizont, mint háttér esetén, R a fekete test távolsága a megfigyelőtől és a β pedig a levegőre vonatkozó térfogati extinkciós együttható. Tegyük fel, hogy egy test a megfigyelő szemében L_0 mértékű megvilágítást hoz létre, ekkor meghatározhatjuk a kontraszt távolságtól való függését:

$$C(R) = \frac{L_0 e^{-\beta R} - L_h e^{-\beta R}}{L_h} = C_0 e^{-\beta R} \quad (3)$$

ahol C_0 az észlelőhöz nagyon közel lévő test kontrasztja a horizonthoz viszonyítva. A szem érzékenységét figyelembe véve (a $0,55 \mu\text{m}$ -es hullámhosszon kapjuk a maximális érzékenységet) ezek után meghatározhatjuk a látástávolság értékét fekete testre vonatkozóan:

$$|C_0| e^{-\beta R_{vis}} = 0,02 \quad (4)$$

ahol R_{vis} a látástávolságot jelöli. Ebből egyszerű átrendezéssel kapjuk az ún. Koschmieder-formulát:

$$R_{vis} = \frac{3,912}{\beta} \quad (5)$$

ahol β a fent említett hullámhosszhoz tartozó térfogati extinkciós együttható. Szólnunk kell arról, hogy az eredetileg Koschmieder által használt 0,02-es látásküszöb helyett inkább a 0,05-ös értéket használják a gyakorlatban, így az előző formula így alakul:

$$R_{vis} = \frac{3,000}{\beta} \quad (6)$$

Az éjszakai időszakban történő látástávolság meghatározásához figyelembe kell vennünk az adott tárgy által kibocsátott fény erősségét, hiszen ekkor a napból érkező sugárzás nem áll rendelkezésre. Az FAA meghatározása szerint, amennyiben a megvilágítás erőssége nem éri el a $6,85 \text{ Cd/m}^2$ értéket a Koschmieder-formula nem becsüli jól a tényleges látástávolságot [5]. Ezért a Koschmieder-féle eredeti összefüggés így módosul:

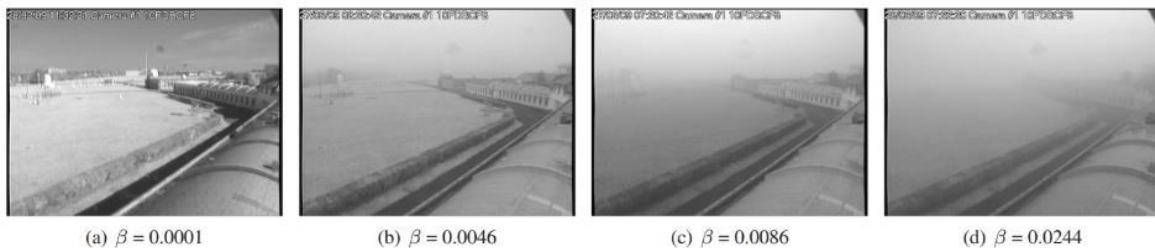
$$E_T = \frac{I e^{-\beta R_{vis}}}{R_{vis}^2} \quad (7)$$

ahol E_T a látásküszöböt, I a fényforrás intenzitását jelenti, míg a többi változó a korábban definiált értékkel bír. Ebben az esetben az alábbi egyenlet iteratív megoldásával kaphatjuk meg a látástávolságot:

$$R_{vis} + \frac{1}{\beta} \ln \left(\frac{R_{vis}^2 E_T}{I} \right) = 0 \quad (8)$$

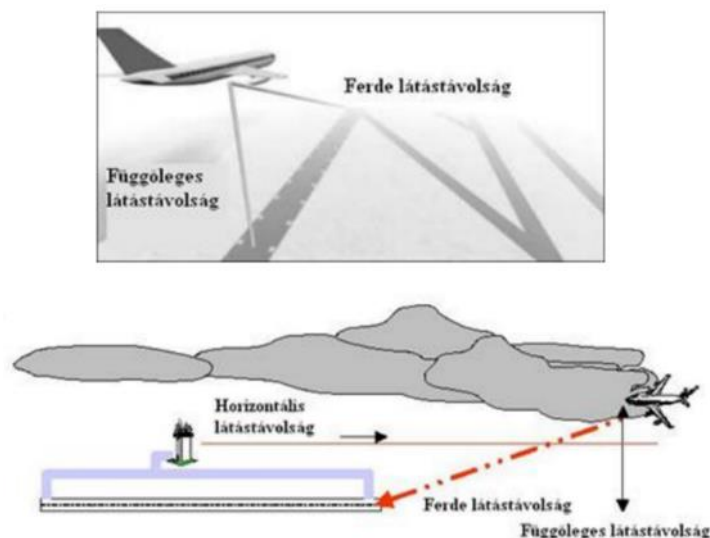
A (6) és (8) összefüggések alapján lehetséges elegendően pontos becslést adni a látástávolság értékére, amely a repülésben alapvető fontosságú meteorológiai paraméter. Ezeket az egyenleteket használják a repülőtereken meghatározandó futópálya menti látástávolság (RVR) értékek kiszámításához is.

Látható, hogy egy tárgy adott távolságból történő megbízható észlelése mindkét esetben erősen függ a térfogati extinkciós együtthatótól, amelynek értéke a légköri alkotók sugárzategyengítésének mértékét reprezentálja. Világos tehát, hogy a légkör mindenkori állapota és annak olyan változásai, amelyeknek hatásuk van az extinkciós együttható értékére, befolyásolják a látástávolság értékét. Ha az atmoszférában egyáltalán nem volna víz és aeroszol, az extinkciós együttható - a korábban említett $0,55 \mu\text{m}$ -es hullámhosszra érvényes - értékét ($\sigma_e = 11,66 \text{ m}^{-1}$) behelyettesítve az (5) összefüggésbe, azt kapjuk, hogy a látástávolság közelítően 336 km lenne [6]. A valóságban ennél általában jóval alacsonyabb értékeket tapasztalunk a felszín közelében (0–30 km között), ami nyilvánvalóvá teszi, hogy az aeroszolnak, a felhő- és csapadékelemeknek a jelenléte, a látástávolság alakulása szempontjából fundamentálisnak mondható. A légköri extinkciós koefficiens növekedésével csökken a látástávolság értéke, ahogyan azt a 4. ábrán láthatjuk.



4. ábra A látástávolság csökkenése az extinkciós koefficiens (β) növekedése mellett [3]

Világos azonban számunkra, hogy látástávolságot nem csak a felszínen lehet értelmezni a fentebb megadott módon, hanem pl. a repülőgép fedélzetéről, mint kiindulási ponttól is definiálhatjuk ezeket. Ennek megfelelően beszélhetünk egyenes, függőleges és ferde látástávolságról is [7]. Az említett látástávolságokat az 5. ábra szemlélteti.



5. ábra A különböző típusú látástávolságok és értelmezésük [7]

A ferde és függőleges látástávolság értékek értelemszerűen szintén a repülőterek közelében fontosak a fel- és leszállási, valamint a megközelítési repülési fázisokban. Jól látható, hogy – pl. egy alacsony felhőzettel borított repülőtér esetében – jelentős különbségek alakulhatnak ki a különböző látástávolság értékek között (5. ábra alsó kép).

Korábbi munkánkban összefoglaltuk a légkör alapfolyamatait [8]. Ezek között szerepelt a csapadék- és felhőképződés mechanizmusa melynek során kondenzációs folyamatok zajlanak légkörünkben. Ennek eredményeképp olyan folyékony és szilárd elemek képződnek, melyek mérettartományuk alapján, a Mie-féle illetve az optikai szóródás csoportjába tartoznak. Tekintve, hogy a fénygyengítés ebben a két típusban számottevő, ezek a folyamatok erősen befolyásolják a mindenkori látástávolság értékét. A fent leírtak alapján a látástávolság prognózisa – mint repülésmeteorológiai alapfeladat – nem tekinthet el ezeknek a folyamatoknak az ismeretétől és előrejelzésétől.

A túlhűlt víz megjelenése a légkörben és a felületi jegesedési folyamatok

A repülés lehetőségét a levegő és a repülőgépek egymás közötti sebességkülönbségéből adódó erőhatások adják a kezünkbe. Korábban már foglalkoztunk az így kialakuló erővel [8]. Most csak arra utalunk, hogy amennyiben repülés közben – akaratunktól függetlenül – az emelőerő és/vagy a vonó- (toló)erő csökken, illetve az ellenállási és/vagy a súlyerő megnő, az a repülés egyensúlyának súlyos megbomlásához vezethet. A légkörben azonban – később tisztázandó feltételek mellett – előfordul olyan jelenség, mely hasonló szituációhoz vezethet. Ez a légköri folyamat pedig nem más, mint a légi jármű felületének és/vagy hajtóművének jegesedése (6. ábra).

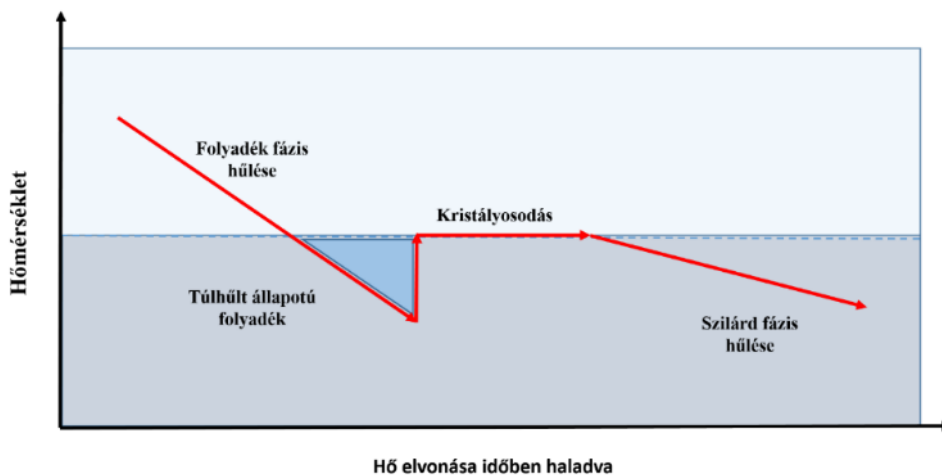
Előre szükséges bocsátanunk, hogy mindkét jegesedés kialakulása igen bonyolult mikrofizikai történések mentén valósul meg, ezért itt most csak röviden tárgyaljuk őket. Másrészt, a jegesedés tényleges intenzitása, alakja geometriája, típusa csak részben függ időjárási tényezőktől, több, más faktor is erősen befolyásolja ezeket (pl. szárnyszelvény geometriai kialakítása, a repülés sebessége stb.) [10][11].

Ugyanakkor le kell szögeznünk, hogy alapvetően a fent említett felületi jegesedési folyamatok szükséges feltételét, (ti. a túlhűlt vízcseppeket) az atmoszféra – részben már ismert – alapfolyamatai produkálják, tehát nagyon erős kapcsolat létezik a jegesedés és a légkör mindenkori állapota között.



6. ábra Jéglerakódás repülőgép szárnyán leszállás után [9]

A túlhűlt állapotú folyadékra az jellemző, hogy hőmérséklete – az adott fizikai körülményekhez tartozó – fagyáspontjához viszonyítva alacsonyabb annál, de halmazállapotát nem változtatta meg, azaz folyékony maradt a hűlés során. Ez a túlhűlt állapot azonban instabil egyensúlyt eredményez, mely állapot külső perturbáció hatására nagy sebességgel átmegy az adott hőmérséklethez tartozó stabilis, azaz szilárd halmazállapotba. Ez az átmenet igen gyakran, szinte robbanásszerűen megy végbe és ezzel egyidőben – a halmazállapot megváltozása során – jelentős mennyiségű hő is felszabadul, tekintettel a víz igen magas fajlagos fagyáshő értékére, ami 337 kJ/kg . A folyékony-túlhűlt-szilárd fázisátmenetet a 7. ábrán tanulmányozhatjuk. A szóban forgó ábrán jól láthatjuk, hogy amennyiben a vízből folyamatosan elvonjuk a hőt (hűlés), a hőmérséklete képes a fagyáspont alá is csökkenni (túlhűl), de egy bizonyos ponton hirtelen a fagyáspontra ugrik a hőmérséklete (függőleges piros nyíl az ábrán) és ezzel egy időben azonnal kezd kialakulni a szilárd fázis rácsszerkezete is. Ha a hőelvonás sebessége állandó, a vízszintes tengelyen az idő is értelmezhetővé válik és a folyamat idő-függése is feltárul. Ebben az esetben a függőleges piros nyíl egy időben rendkívül gyorsan zajló kifagyási folyamatot jelenít meg.



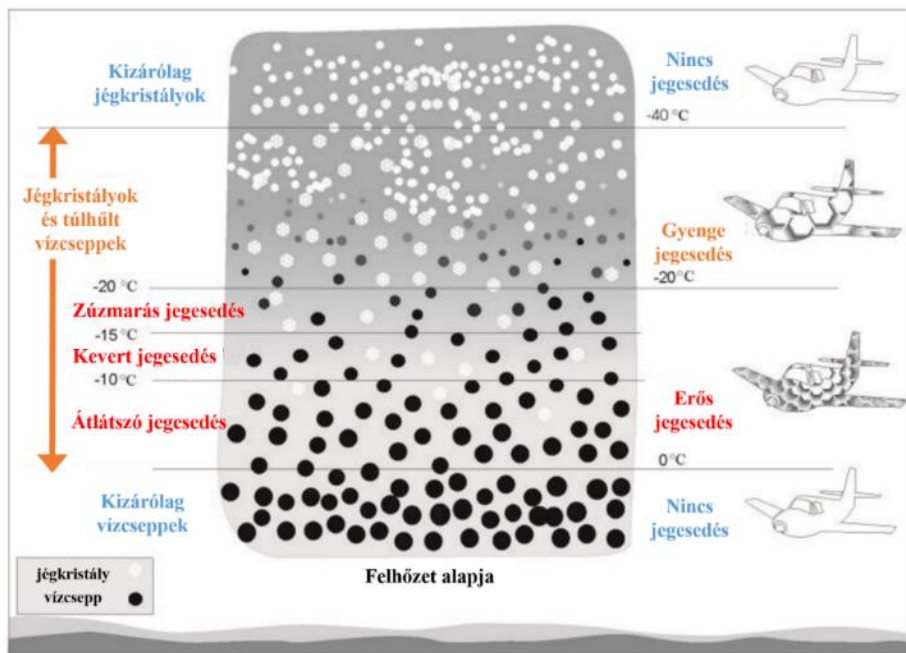
7. ábra A folyékony-túlhűlt-szilárd fázisátmenetek a hőelvonás és a hőmérséklet függvényében.

A világoskék zóna jelzi a túlhűlt állapotot. A függőleges piros nyíl a hirtelen fagyást reprezentálja (a szerző által készített ábra)

A légkörben a víz folyékony halmazállapotban, a felhőkben és a csapadéokban található meg. Korábban utaltunk rá, hogy a felhőképződés során igen nagyszámú, kisméretű, lebegő vízcseppek képződnek, melyek egy része az atmoszféra 0°C alatti hőmérsékletű tartományában sokáig képesek túlhűlt állapotban maradni. Ezzel szemben, a speciális körülmények között kialakult

túlhűlt csapadékelemek esetében (mint pl. az ónos eső) a légköri tartózkodási idő jóval rövidebb, mint a felhőelemek esetén, így ezek viszonylag hamar kihullanak, tehát ritkábban találkozhat velük a repülő eszköz.

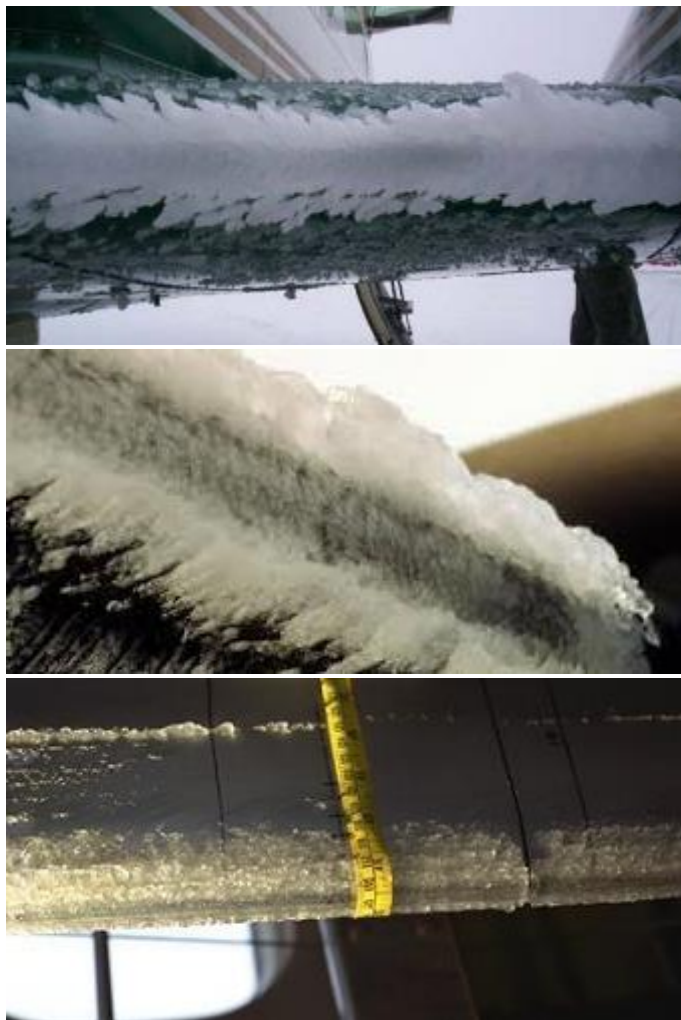
A fenti ismeretek fényében azt mondhatjuk, hogy a repülő eszközök felületi jegesedése akkor kezdődhet meg, ha $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ alatti hőmérséklet mellett, felhőbe repül bele. Ez a valóságban a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ fokos izoterma magassága feletti repülések esetén valósul meg, tehát a fagypont magasságának ismerete fundamentális kérdés felhőben történő repülések végrehajtásakor. Ugyanakkor a felhőben sem homogén fizikai viszonyok uralkodnak, ezért a várható jegesedési potenciál (jegesedés mértéke) sem állandó, főként azonban a magasság szerint változik (8. ábra).



8. ábra Felhőelemek halmazállapot szerinti eloszlása és a hozzájuk kapcsolódó jegesedési típus és potenciál (a szerző által készített ábra)

Ahogy a 8. ábrán látható, a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ és a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ közötti hőmérsékleti tartomány hordoz egyáltalán jegesedési potenciált, hiszen ebben a zónában fordulhat elő egyáltalán túlhűlt vízcsepp a felhőben. Az is világos, hogy a magasság növekedésével (és egyben a hőmérséklet csökkenésével) a túlhűlt víz koncentrációja csökken, mert a hűléssel és az idő múlásával egyre inkább valószínűbb a cseppek megfagyása. Ezért a $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ -os izoterma felett a jegesedés esélye lényegében megszűnik. A fagyponthoz tartozó magasság alatt repülve szintén nem következhet be felületi jegesedés. A jegesedési zónában azonban különös figyelmet kell, hogy szenteljünk a $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ fokhoz tartozó magassági intervallumra, melyet a 8. ábrán erős jegesedéssel jeleztünk. Itt találkozhatunk a legintenzívebb felületi jegesedéssel és emellett, a kialakuló jéglerakódás mindhárom alaptípusa is megjelenik ebben a zónában. A képződő jéglerakódás három típusát a 9. ábrán mutatjuk be. A zúzmarás jéglerakódás (rime ice) hófehér, átlátszatlan, erősen érdes felületű bevonatot eredményez a repülőgépek felületén (első sorban az áramlásnak kitett felületeken). A kevert tulajdonságú jég (mixed ice) akkor képződik, ha a zúzmarás és az átlátszó típusú jég rétegek időben váltakozva rakódnak le a felületen. Alakja szabálytalan, néha egészen bizarr formátumú, félig átlátszó bevonat, melynek színe így szintén változatos árnyalatú. Az átlátszó jégbevonat (clear ice) alatt a felület látható, az így képződött jég felülete a

leginkább homogén, a három típus közül. Míg az előző két fajta jégbevonat leginkább a szárnyak belépő éleinél vagy annak közelében alakul ki, addig az átlátszó jég a szárny jóval nagyobb felületét képes bevonni. Ennek oka az, hogy ebben az esetben a repülőgép felületének ütköző cseppek fagyása lassabban zajlik le, ezért a még meg nem fagyott víz az áramlás irányába mozgó vízfilmet képez, ami rásimul a felületre és úgy szilárdul meg azon.



9. ábra A felületi jégakkréció három alaptípusa: zúsmarás (fent), kevert (középen), átlátszó (lent) [12][13][14]

Meteorológiai értelemben tehát a felületi jegesedést, a felhőben található túlhűlt vízcseppekkel történő ütközés hozza létre. A jégakkréció kialakulásának sebességét és a jégbevonat típusát is befolyásolják az időjárási körülmények. A jégbevonat kialakulását lehetővé tevő, rendkívül összetett mikrofizikai folyamatok leírása számos korábbi munkában megtalálhatóak [10][11]. Ezek elemzéséből kiderül, hogy ennek a veszélyes jelenségnek a létrejöttét a felhőben lévő túlhűlt vízcseppek koncentrációja, azok cseppméret eloszlása és a levegő hőmérséklete, mint időjárási tényezők, alapvetően befolyásolják. A felületi jegesedési folyamat előbb említett időjárás által adott előfeltételeinek előre jelzése tehát fontos operatív meteorológiai feladat, ami a közszolgálati célú repülések támogatásának is nélkülözhetetlen eleme kell, hogy legyen.

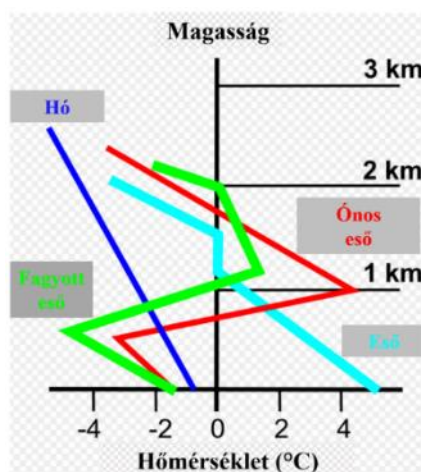
Fenomenológiai értelemben teljesen hasonló szituáció zajlik le akkor, amikor a repülőgép – ugyan felhőn kívül, de éppen az alatt haladva – ónos csapadékban repül. Ez a helyzet azonban még kritikusabb, a felhőn belüli jegesedéshez képest, hiszen a túlhűlt (ónos) csapadékcseppek

mérettartománya legalább egy nagyságrenddel nagyobb, mint a felhőelemeké. Ez a tény két roppant fontos dolgot hordoz magában:

- a nagyobb cseppméret, jóval nagyobb tömegű túlhűlt víztartalmat jelent a vele való ütközés során;
- a nagyobb cseppméret, nagyobb ütközési valószínűséggel és hatékonysággal is jár, ami kiugróan gyors jégbevonat-növekedést indukál.

A fentiek alapján egyértelmű, hogy a repülés közben előforduló felületi jegesedés legveszélyesebb meteorológiai körülményeit az ónos csapadék hullása jelenti, tehát ezt a túlhűlt csapadékszónát feltétlen el kell kerülni a repülési útvonal során. Sajnálatos, hogy a felületi jegesedéshez kapcsolódó egyik legjelentősebb légikatasztrófa is ilyen időjárási szituációban történt 1994. október 31-én, az Egyesült Államokban, az Indiana szövetségi államhoz tartozó Roselawn település mellett [15].

Az ónos jellegű csapadék kialakulását a téli félév melegfrontjához kapcsolódóan tudjuk értelmezni. A melegfronthoz kapcsolódó és gyakran jelentős inverziót mutató hőmérsékleti profil szerkezetének alakulása szerint, a front előtti csapadékszónában többféle csapadék típussal is találkozhatunk (10. ábra).



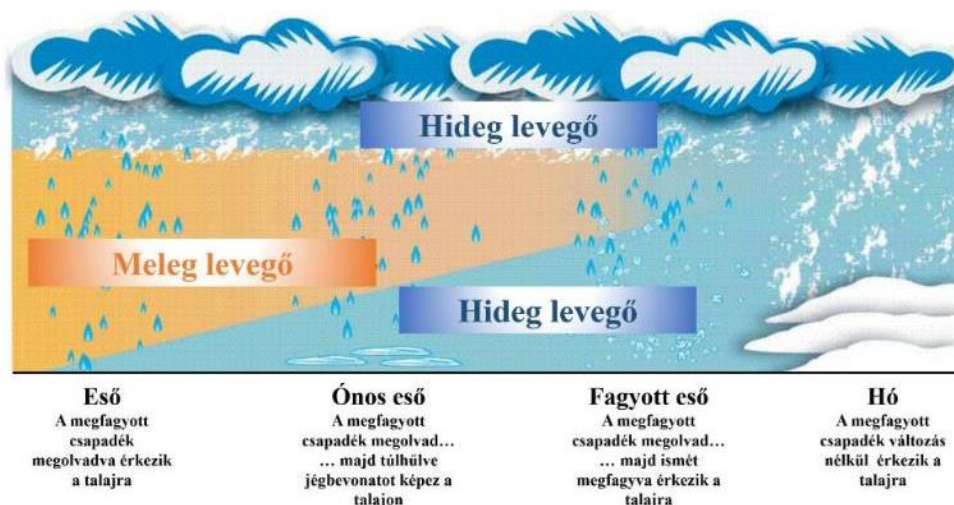
10. ábra Melegfrontban kialakuló csapadék típusok és a hozzájuk tartozó jellegzetes hőmérsékleti profilok.

A magasság és hőmérséklet adatok tájékoztató jellegűek. Forrás: a szerző által készített ábra.

A csapadék típusa alapvetően a melegfronthoz kapcsolódó meleg levegő magasban történő mozgása során kialakuló inverzió erősségétől és annak magasságától függ. Amennyiben a talajtól felfelé a hőmérséklet teljes egészében fagypont alatt van, akkor hó hullik. Abban az esetben, ha az inverzió gyenge vagy izotermia van és ezzel egy időben a talajon a hőmérséklet 0°C feletti értéket mutat, eső fog esni. Erős inverzió esetén, amikor fagypont fölé emelkedik a magasban a hőmérséklet a hulló csapadék ebben a zónában haladva megolvad, majd később túlhűl vagy megfagy, mielőtt a talajra leérkezik. Ha túlhűlt csapadékként fagyott talajra hull, ott azonnal ráfagy és ónos esőként jelenik meg, míg a másik esetben fagyott esőként hull a felszínre. A melegfront haladásával, a front előtti zónában, a fent említett csapadék típusok szekvenciálisan, időben egymás után is megfigyelhetők (11. ábra).

Az ábrán jól látható, hogy a melegfrontot megelőző területen, a fronttól távolodva eső, ónos eső, fagyott eső majd havazás tapasztalható. Lényeges momentum azonban, hogy egy a front előtti elhelyezkedő repülőtér (helyben) ez a csapadék sorrend időben fog megmutatkozni,

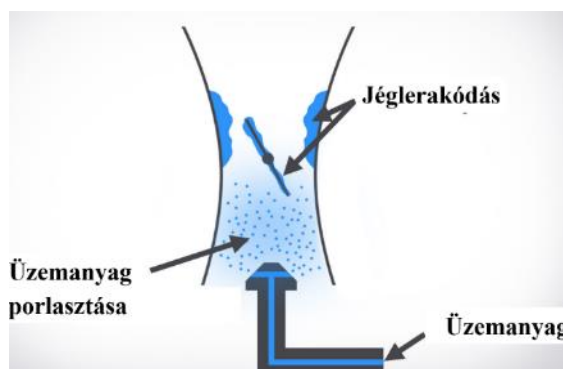
ahogyan a melegfront közeledik a repülőtérhez (csapadék-szekvencia). A fentiek alapján világos tehát, hogy az ónos csapadék képződésére vonatkozó időjárás előrejelzések szintén lényegbevágó elemét kell, hogy képezzék a repülések meteorológiai támogatásának.



11. ábra Melegfronthoz kapcsolódó csapadék-szekvencia (a szerző által készített ábra)

A hajtómű jegesedésének folyamata és ennek meteorológiai aspektusáról

Ahogy korábban említettük, a repülés alatt, pozitív hőmérsékleti tartományban is találkozhatunk jegesedéssel, ami a repülő eszközök dugattyús vagy gázturbinás hajtómű rendszerében történő jégbevonat kialakulását jelenti. Munkánkban most csak a dugattyús hajtóművek esetében fellépő jegesedést és annak meteorológiai feltételeit tekintjük át. A repülőgépeken alkalmazott dugattyús motorok hajtásához üzemanyag-levegő keveréket kell az égéstérbe bejuttatni. Az így kialakult keverékben természetesen víz is van, nagyrészt vízgőz formájában. A befecskendezés során jelentős fizikai változások történnek a rendszerben, ami lehetővé teszi, hogy a keverékben levő vízgőz kifagyjon. A kifagyott jég egyrészt azért veszélyes, mert csökkenti az áramcső keresztmetszetét, ami az átáramló keverék mennyiségének, és ezzel együtt a hajtómű teljesítményének csökkenéséhez, esetleg teljes leállításához vezet. Másrészt, a keverék mennyiségének szabályozását végző pillangószelep működését is megbéníthatja, ami a teljesítmény-szabályozás elvesztését vonja maga után. Ráadásul a két káros hatás egyszerre és elég gyorsan jelentkezik.

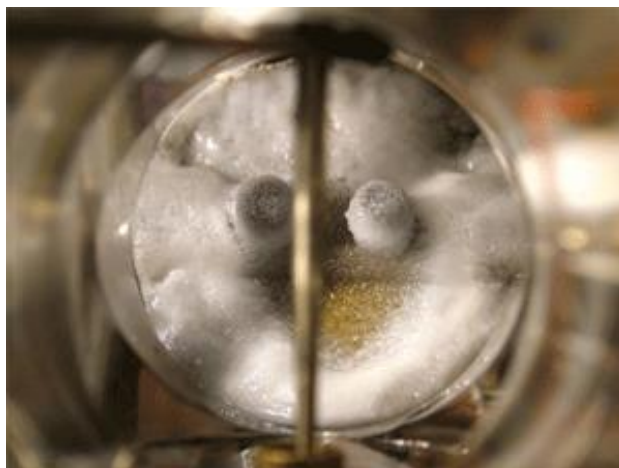


12. ábra Jéglerakódás képződése dugattyús hajtómű esetében [16]

Az üzemanyag-levegő keverék előállításakor a levegőt nagy sebességgel szívjuk be, majd beporlasztjuk az üzemanyagot ebbe a turbulens légáramba (12. ábra).

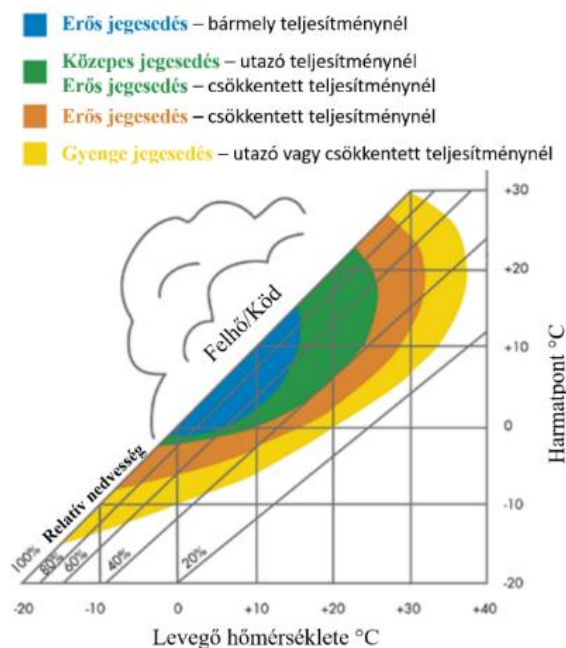
A folyamat alatt a következő fizikai jelenségek zajlanak le:

- a szűkülő áramcsőben a sebesség növekszik, ezért a statikus légnyomás lecsökken (Bernoulli-törvény);
- ideális gázok esetén, állandó térfogat mellett a statikus nyomás és az abszolút hőmérséklet hányados állandó, ami azt jelenti, hogy a statikus nyomás csökkenése a hőmérséklet csökkenésével jár együtt (Gay-Lussac törvénye);
- a beporlasztott üzemanyag apró cseppjei azonnal párologni kezdenek, ami további hőelvonást jelent az áramcsőben.



13. ábra Egy Bing 64 típusú karburátor pillangószelepének jegesedése, ami hajtómű leállást okozott +8 °C és 85% relatív nedvességű levegő esetén [17]

Mindhárom említett jelenség együttesen azt eredményezi, hogy az üzemanyag-keverék hőmérséklete jelentősen csökken – igen gyakran 0 °C fok alá – és így a beszívott levegőben levő víz képes kifagyni az áramcső falára, illetve, a pillangószelepre, egyaránt (13. ábra). Az ábrán jól látható a karburátor pillangószelepén felhalmozódott jégbevonat, ami +8 °C hőmérsékletű és 85% relatív nedvességű környezeti levegő beszívása után képződött [17].



14. ábra Dugattyús hajtómű jegesedésének meteorológiai feltételei [17]

Az eddigiek alapján jól látható, hogy a hajtóműben történő jegesedés szempontjából nem szükséges, hogy túlhűlt vízcseppek legyenek jelen a légkörben. Sőt, a korábbi vizsgálatok eredményeképpen kiderült, hogy akár 15–20 °C fokos hőmérsékleti tartományban is megtörténhet ez a fajta jegesedés. A hajtóműben történő jéglerakódás mértéke azonban nyilvánvalóan függ a mindenkori légkör állapotától, alapvetően a hőmérsékletétől és a benne levő vízgőz mennyiségétől (14. ábra).

Világosan látszik, hogy a legveszélyesebb hajtómű jegesedést 0 °C és 15 °C hőmérsékleti, valamint 60% és 100% közötti relatív nedvességi tartományban tapasztalhatjuk. Ugyanakkor az is leolvasható a 14. ábráról, hogy eltérő hajtómű teljesítmények esetén, a jegesedést okozó környezeti feltételek is eltolódnak (különböző színek az ábrán). Fontos tehát, hogy a meteorológiai támogatás során, a hajtómű jegesedésre veszélyes időszakokat és zónákat a légkörben egyértelműen próbáljuk azonosítani és erre felhívni a hajózó állomány figyelmét is.

A légköri mozgásokkal kapcsolatos dinamikus folyamatok – turbulencia és szélnyírás

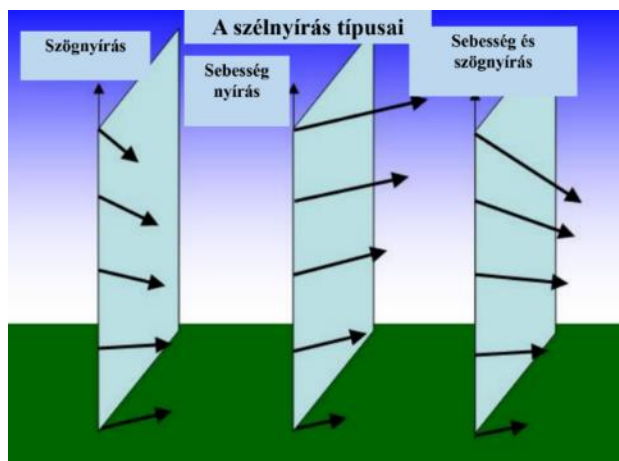
Míg az előzőekben tárgyalt jegesedés a repülést létrehozó erők alakulására és más, a repülési folyamat során létfontosságú eszköz működésére is képes negatívan hatni, az ebben az alfejezetben bemutatandó légköri mozgások veszélyessége kimondottan a repülés dinamikai egyensúlyának megbontásában mutatkozik meg. Láttuk már korábban, hogy az atmoszférában mozgásjelenségek tapasztalhatók, melyek különböző méretskálán jelentkeznek. A kialakuló horizontális és/vagy vertikális légáramlások – a sebességtől és a sűrűdést okozó közegtől függően – fizikai értelemben turbulens típusú mozgások. Az ilyen jellegű áramlások esetén az áramló közeg fizikai jellemzői (nyomás, sebesség stb.) gyorsan, kaotikusan változnak, rendszertelenül ingadoznak és gyakran örvények lépnek fel (15. a. ábra és 15. b. ábra) [18].



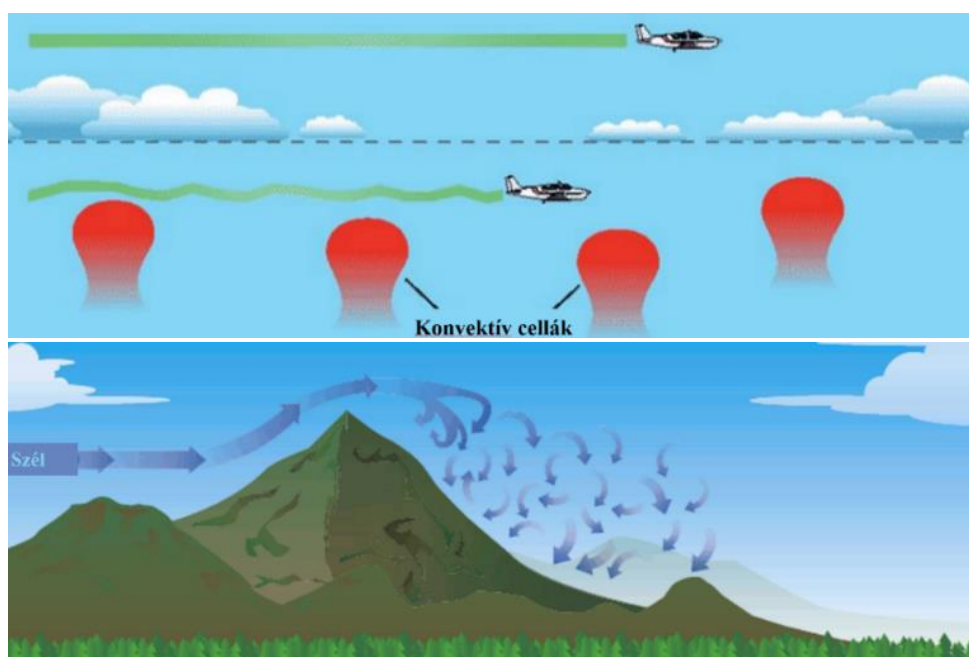
15. a. ábra (bal oldal) A Kármán-féle örvény a repülőgép szárnyáról leváló áramlásban [19]

15. b. ábra (jobb oldal) Kelvin-Helmholtz-féle hullámfelhők kialakulása a légkörben [20]

Értelem szerint az ilyen mozgást produkáló közegben – egy adott pillanatban – egészen különböző sebesség vektorok észlelhetők viszonylag közel eső pontokban is, azaz jelentős szélnyírás tapasztalható. A szélnyírás két pont közötti szélsősebesség-vektor különbsége, tehát maga is vektor. A repülésben általában külön szoktuk választani a sebesség nyírását és a szögnyírását, melynek intenzitását célszerű folyamatosan nyomon követni a repülőtéren (16. ábra).



16. ábra A szélnyírás típusai [21]



17. a. ábra (felső kép) termikus turbulencia [22]

17. b. ábra (alsó kép) mechanikai turbulencia [23]

A légkörben előforduló turbulenciát genetikusan két nagy csoportba sorolhatjuk:

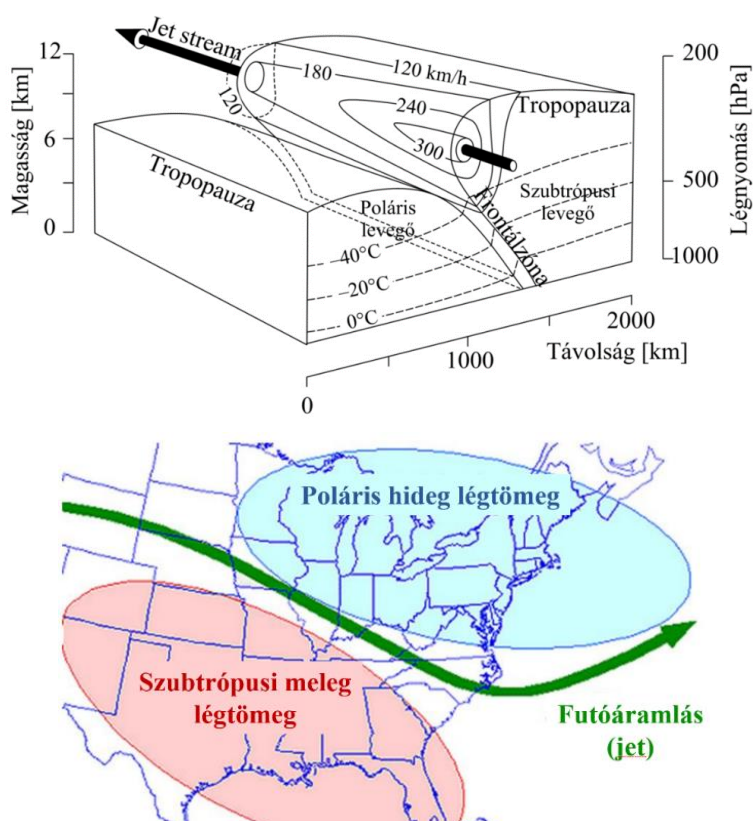
- termikus turbulencia: alapvetően a légköri konvektív folyamatok hozzák létre (17. a. ábra);
- mechanikus turbulencia: a légkörben megjelenő szélnyírás okozza (17. b. ábra).

Mindkét típus esetén jelentős áramlási sebességet tapasztalhatunk, de amíg a termikus inkább a troposféra alsó felében, addig a mechanikus turbulencia a teljes troposzférában előforduló jelenség (sőt a troposféra felett is előfordul). Meg kell jegyeznünk, hogy a légköri mozgások során a felszíni sűrűlési réteg jelentősen befolyásolja a turbulencia mértékét, hiszen akadályként jelenik meg az áramlásban mozgó levegő számára (ezt a hatást a szélesebb magassággal történő logaritmikus növekedése is mutatja). Ennek eredménye az, hogy a felszín közelében igen gyakran erős turbulens hatással kell számolnunk repülés közben.



18. ábra A legfontosabb szélnyírási helyzetek a légkörben [24]

A 18. ábrán látható fontosabb szélnyírási situációk közül a magas szintű jet közelében tapasztalható szélnyírás és erős turbulencia a tropopauza magasságának közelében mutatkozik meg.



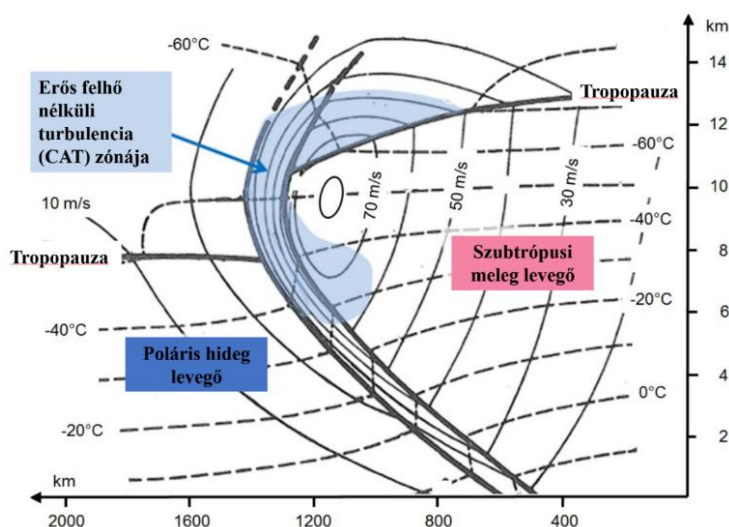
19. a. ábra (fent) a magas szintű jet metszete [26]

19. b. ábra (lent) a futóáramlás a poláris és a szubtrópusi légtömegek között kanyarog [27]

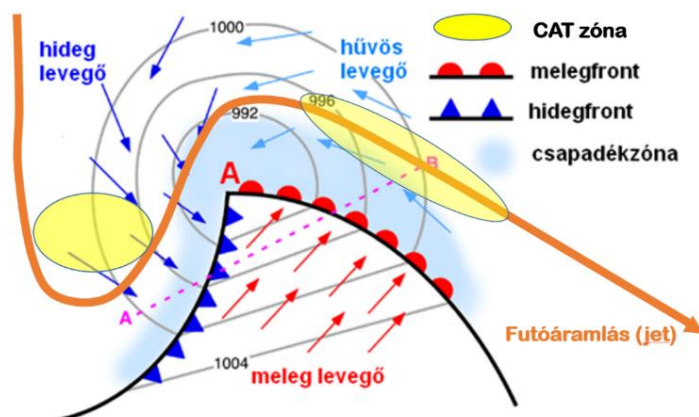
A magas szintű jet egy olyan csőszerű áramlás, melynek horizontális kiterjedése a szélirányra merőlegesen 100–500 km között változik, míg vertikálisan csupán néhány kilométer átmérőjű. A futóáramlások tengelyében a szélsébség gyakran meghaladja a 200 km/h-t, de néha akár a

400 km/h sebességet is eléri [25]. A magas szintű jet a poláris hideg és a szubtrópusi meleg légtömeg határán kialakuló ún. poláris frontálzóna mentén alakul ki és a tropopauza alatt. A magas szintű jet metszetét a 19. a. ábrán láthatjuk. A futóáramlás az alacsony és magas légnyomású zónák között meanderezik, oly módon, hogy áramlás irányába nézve, az alacsony légnyomású zóna bal kéz felé esik, a bárikus széltörvény szerint (19. b. ábra).

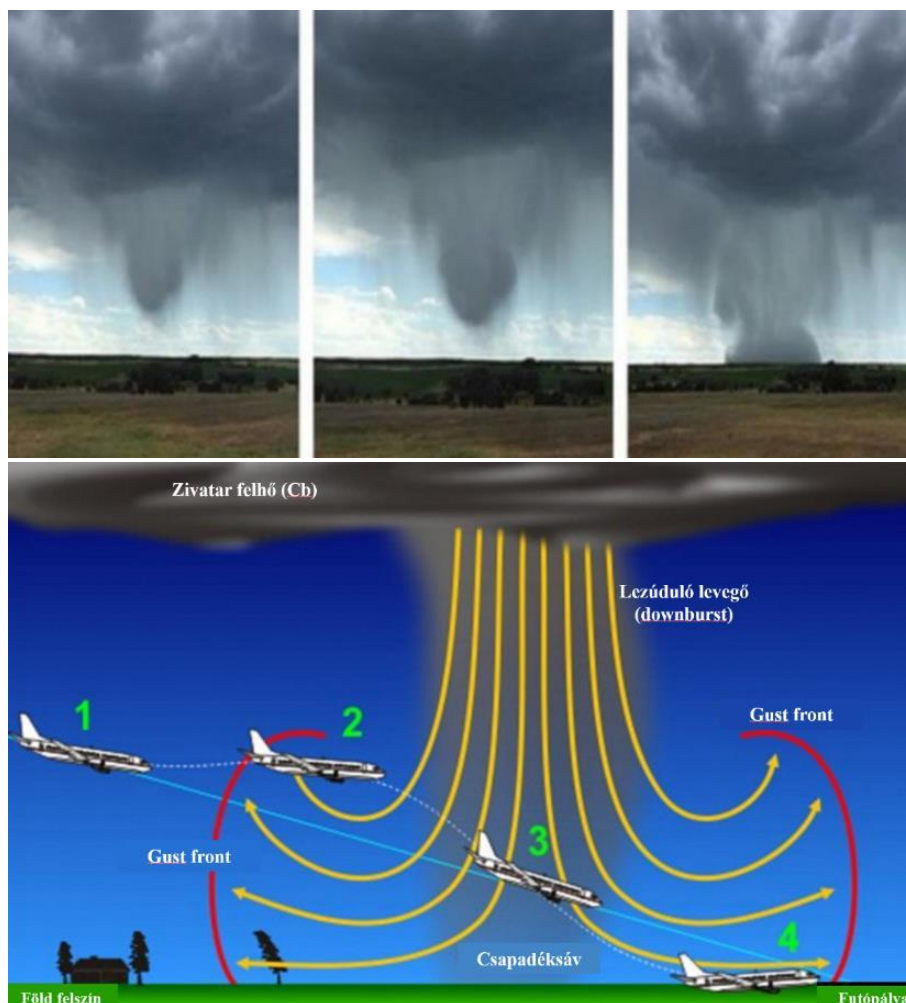
A jet belsejében előforduló igen nagy szélsőesség miatt magában a futóáramlásban és a közvetlen környékén igen erős szélnyírást és turbulenciát tapasztalhatunk. Különösen fontos megemlítenünk a felhő nélküli turbulenciát (clear air turbulence, CAT), melynek előfordulása a jet-ek közelében a legvalószínűbb. Ahogyan a turbulenciára való hajlam nő az áramlás sebességével, így a futóáramlás magja körül várhatjuk a legintenzívebb CAT zónának a kialakulását, melynek sematikus ábrázolását a 20. ábrán láthatjuk. Ugyanakkor, ahogy már említettük a futóáramlás a ciklonok és anticiklonok között kanyarog a tropopauza alatt, így a mérsékelt övi ciklonok esetén is meg tudjuk határozni horizontálisan azokat a területeket, ahol a jet-hez kapcsolódó CAT intenzív lehet (21. ábra).



20. ábra A futóáramlás meridián mentén megfigyelhető sematikus metszete és az intenzív CAT zónák elhelyezkedése [28]



21. ábra Futóáramlás és a hozzá tartozó intenzív CAT zónák mérsékelt övi ciklonban (sematikus ábra) [29]



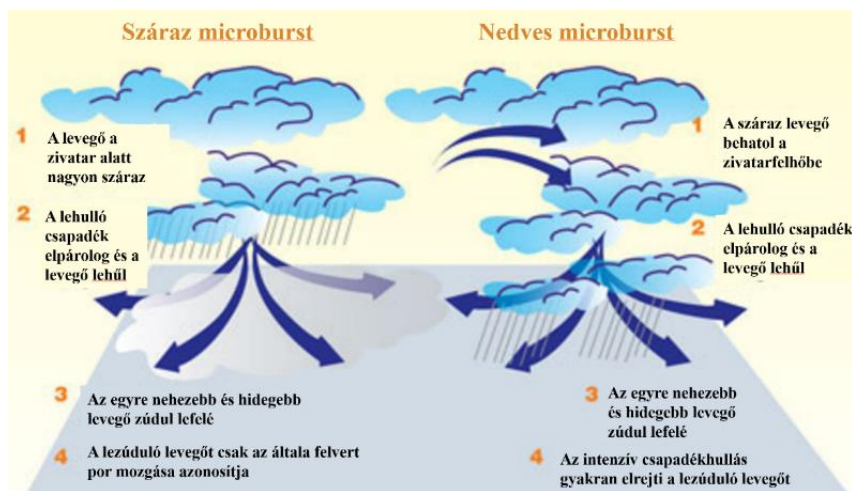
22. a. ábra (fent) zivatarból lezúduló szélroham (nedves microburst) kialakulásának három lépése [30]
 22. b. ábra (lent) a lezúduló szélroham vertikális metszete és hatása a leszálló repülőgépre (a számok magyarázata a szövegben) [31]

A másik igen intenzív turbulenciát és egyben rendkívül erős szélnyírást is okozó jelenség a zivatarokhoz kapcsolódik. Munkánkban magának a zivatar kialakulásával nem foglalkozunk, itt csak annyit jegyzünk meg, hogy a közepes földrajzi szélességek legnagyobb méretű, konvektív mozgásból felépülő meteorológiai mozgásjelenségéről van szó, melyben jelentős vertikális mozgásokat figyelhetünk meg (nem hidrosztatikus állapot). A zivatar kialakulása után a benne zajló függőleges mozgások sebessége 20–30 m/s nagyságú, és számunkra most, a lefelé történő áramlások okozta turbulencia és szélnyírás érdekes (22. a. ábra).

A zivatarból – néha teljesen láthatatlan módon – a fent említett vagy annál nagyobb sebességgel lezúduló hideg levegő a felszínre elérve, tölcser-szerűen szétáramolva, horizontális irányú mozgást indukál. Ez az áramlás kölcsönhatásba kerülve a felszínnel, annak domborzatával, objektumaival, rendkívül örvénylő turbulens mozgást végez és halad sugár irányban kifelé a zivatar magjától (22. b. ábra).

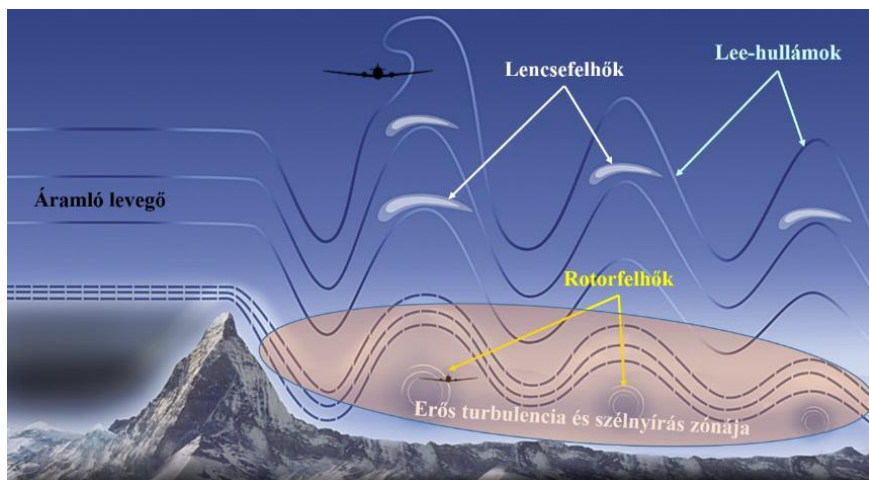
Tekintve, hogy ezek a vertikális szélrohamok rendkívül gyorsan alakulnak ki és gyakran szemmel nem is láthatóak (ellentétben a 22. a. ábrán lefotózott nedves downburst-tal), rendkívüli veszélyt jelentenek az alacsonyan haladó repülőgépekre, különösen a megközelítési és leszállási repülési fázisok alatt (22. b. ábra). Az ábrán látható, hogy az 1-es jelzésnél, a repülőteret

megközelítő repülőgép még siklópályán halad. Amint a gép mozgása során szembe találja magát a leáramlás gust front-jával (2-es jelzés), annak sebességéből adódóan, hirtelen megnő az emelő erő és a repülőgép emelkedni kezd (változtatlan beállítások mellett). Elérve a leáramlás középpontját, a repülőgépre hirtelen hatalmas lefelé irányuló nyomóerő hat, mely a lezúduló hideg levegő dinamikus nyomásából származik melynek eredményeképp azonnal erős süllyedésbe kezd (3-as jelzés). Amennyiben ezt a hatalmas lezorító erőt nem tudja a személyzet kompenzálni, akkor a repülőgép irányíthatatlanná válik és a földnek ütközik, majd megsemmisül. Hasonló szituáció történt ez a Delta légitársaság 191-es járatával, 1985. augusztus 2-án Dallas/Forth Worth nemzetközi repülőterén [32].



23. ábra Száraz és nedves microburst kialakulásának lépései [33]

Néha azonban az említett függőleges szélrohamok nem láthatóak szemmel, illetve csak közvetett módon róluk tudomást szerezni, hiszen nem járnak intenzív csapadékhullással, jóllehet zivatarban alakulnak ki. Ezeket a leáramlásokat száraz microburst-nek hívjuk és kialakulásukhoz nagyon száraz levegőnek kell elhelyezkednie a zivatarfelhő alatt. A magasban az ebbe belehulló csapadék elpárolog, ami a levegőt jelentősen lehűti és az egyre nehezebb hideg levegő lefelé száguld és a talajon szétterülve gust frontot hoz létre (23. ábra). Az elpárolgó csapadék miatt a felszínen közelében nem látunk csapadékfüggönyt, csak a felkavarodó por mozgásából következtethetünk jelenlétére.



24. ábra Hegyek mögötti áramlási zónában kialakuló hullámok, felhőzet, turbulencia és szélnyírás [34]

A nedves microburst esetén a száraz levegő fentről hatol be a zivatarba és ott párolog el a csapadék egy része, lehűtve a levegőt, és ezzel süllyedésre kényszerítve, mozgásba hozza azt. Miután a csapadékhullás nem szűnik meg teljesen, a leáramlást a képződő csapadékfüggöny teljesen el is rejtheti így vizuálisan nem észlelhető (23. ábra). Miután ezek a microburst jelenségek minden esetben zivatarhoz köthetők, az általuk okozott erős turbulencia és szélnyírás a zivatarok megfelelő pontosságú előrejelzésével illetve megfigyelésével, nyomon követésével elkerülhető.

A mechanikai turbulencia és a hozzá kapcsolódó szélnyírás egyik jellegzetes típusa a hegységek mögött kialakuló hullámokhoz kapcsolódik (24. ábra).



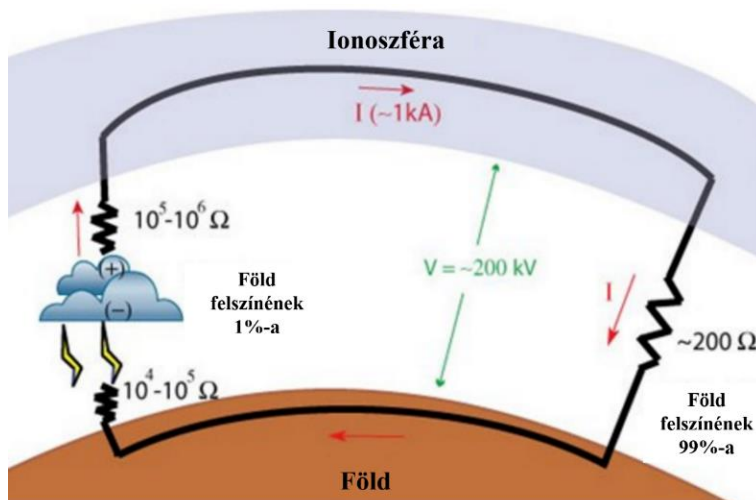
25. a. ábra (bal oldal) lencsefelhők több szintben a hegység mögött [35]

25. b. ábra. (jobb oldal) rotorfelhő a hegység mögött, felette távolabb lencsefelhők [36]

Amennyiben a vízszintesen áramló levegő útjába jelentős kiemelkedés, – a leggyakrabban hegység – áll, a levegő a hegységen átbukva, erős hullámozásba kezd. A hullámozás amplitúdója annál nagyobb, minél nagyobb a szél sebessége és a kiemelkedés magassága. A hullámok csúcsin gyakran lencsefelhők (*Altostratus lenticularis*) észlelhetők, néha több szintben is (25. a. ábra). A kialakult Lee-hullámok a hegységtől távolodva, csökkenő amplitúdóval belesimulnak a zavartalan áramlásba. A hegyek mögötti, felszínközeli zónában, igen veszélyes áramlási kép alakul ki, melynek eredményeképpen speciális ún. rotorfelhők alakulnak ki, melyek tengelye párhuzamos a hegység tengelyével és bennük a levegő a tengely mentén körbe forogva halad. Ezek azért jelentenek különösen nagy veszélyt, mert általában alacsonyan helyezkednek el és rövid távolságon akár 180 fokot is változik bennük az áramlás iránya, ami jelentős szélnyírást indukál (25. b. ábra). A fentiek alapján, a hegységek közelében várható szélirány és szélesebség prognózisa fontos a közelben elhelyezkedő repülőterek és az oda érkező vagy onnan induló repülőgépek személyzete számára. Hogy milyen intenzív lehet a hullámozás azt két megtörtént esettel kívánjuk szemléltetni. 1964. január 10-én az Egyesült Államokban egy B-52-es óriásgep függőleges vezérsíkjá és a Northwest Airlines DC-8-as utasszállítójának 1-es számú hajtóműve szakadt le az intenzív turbulenciában [37].

A légköri mozgásokkal kapcsolatos elektromos folyamatok – zivatarelektromosság és villámlás a repülés szemszögéből

A troposzférában megtalálhatóak a töltéssel rendelkező ionok is (bár jóval kisebb koncentrációban, mint az alapgázok), melyek leginkább a kozmikus és a radioaktív sugárzás hatására képződnek. Amíg ezeknek a térbeli eloszlása nem inhomogén, azaz nem különülnek el töltésük szerint, addig jelentős potenciálkülönbség nem fog mutatkozni, így elektromos áramot sem tapasztalunk ebben az esetben.



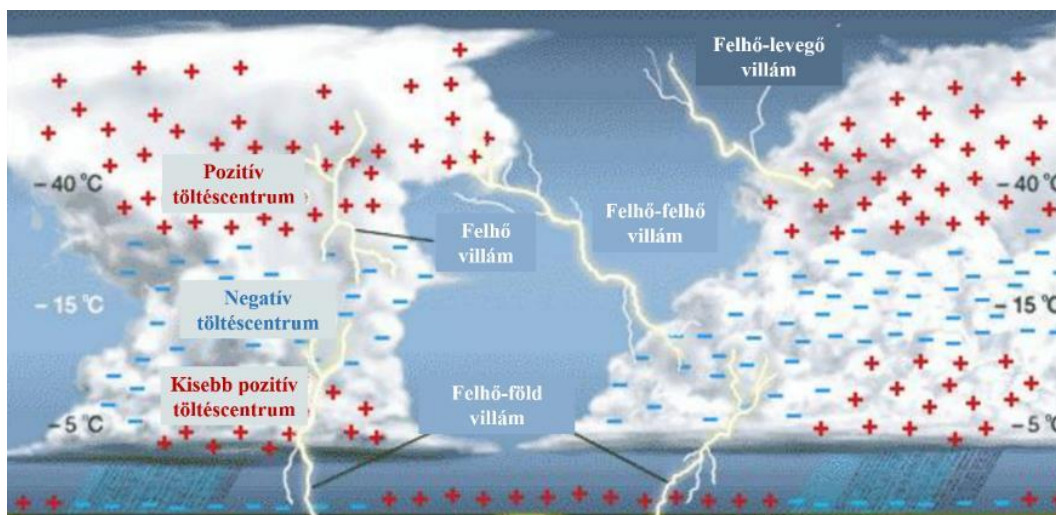
26. ábra A globális elektromos áramkör és jellemzői [38]

Az atmoszféra 60 km feletti rétege azonban már lényegében plazma, az ún. ionoszféra. Létét a Napból érkező nagy energiájú sugárzás elnyelésekor történő ionizációnak köszönheti. A töltések azonban mozognak a levegőben, de mozgásuk és az általuk létrehozott elektromos jelenségek jelentősen különböznek a tekintetben, hogy szépidős (tisztá, nyugodt) vagy zivataros (erősen dinamikus) időjárást vizsgálunk. Az eddigi megfigyelések szerint az atmoszférában kialakul egy ún. „globális légköri áramkör”, melynek szerkezetét a 26. ábrán tekinthetjük meg.

Az áramkör az ionoszféra és a föld felszíne közötti töltésáramlást valósítja meg, oly módon, hogy az áramkör szépidős területén a felszín felé, zivataros időben pedig az ionoszféra felé folyik a pozitív töltések árama. Az ionoszférából a felszín felé folyó pozitív töltésáramot a zivatarok pótolják az ionoszféra irányába. Jól látható, hogy amíg a szépidős szituációban, az áramkörben az ellenállás mintegy 200 Ω , addig zivatarok idején ez 3–4 nagyságrenddel nagyobb, ami a zivatarban elhelyezkedő töltéeloszlás eredménye. Ezzel együtt a szépidős zónában az elektromos térerősség közelítően 200 kV 60 000 méteren, tehát 3 V/m. A zivatarfelhőben villámkisülés előtt ezzel szemben mintegy 100 000–400 000 V/m értékű.

Légkörünkben jelentős elektromos tér tehát zivatarok környezetében fordul elő, mert az intenzív áramlások és az ennek nyomán kialakuló különböző méretű, halmazállapotú felhő- és csapadékelemek hőmérséklettől (így magasságtól) és koncentrációtól függően elkülönítik a hozzájuk (felületükre) kapcsolódó töltéseket. Szerepet játszik még a töltéscentrumok kialakításában a víz és jég eltérő dipólus jellege is [40]. Ennek eredményeképp pozitív, illetve negatív töltéscentrumok alakulnak ki a felhőben (27. ábra). Az eddigi ismeretek szerint, $-5\text{ }^{\circ}\text{C}$ és $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ közötti zónában inkább a negatív töltések, e felett pedig a pozitív töltések halmozódása gyakori, de ez csak jó közelítéssel igaz. A zivatar tehát hasonlóan, mint egy Van de Graaf generátor, töltéseket állít elő és választ szét, azaz potenciálkülönbséget és erős elektromos teret generál. Idővel a potenciálkülönbség olyan nagy lesz két térrész között, hogy a felhalmozódott eltérő töltésű részecskék hirtelen egy kisülés formájában rekombinálnak, intenzív hang- és fényjelenség kíséretében, melyet mennydörgésnek, illetve villámlásnak nevezünk.

Ahogy a 26. ábrán is láthatjuk, a villámok a felhőn belül, két felhő között, a felhő és a felszín között is létrejönnek.



27. ábra Zivatarfelhőben kialakuló töltéscentrumok és villámok [39]

Ha megvizsgáljuk, mi történik villámcsapáskor a repülőgéppel, akkor azt láthatjuk, hogy mivel a gép teste fém, a Faraday-kalitka elv miatt, az áram a fémtest felszínén halad. Másrészt, mivel az elektromos térerősség a hegyes, kiugró tárgyak közelében jelentősen megnő, a villámcsapás a repülőgépet gyakran a szárnyvégeken éri és a farokrész közelében halad tovább a levegőbe. Különbféle számítások szerint, egy utasszállító nagyobb méretű repülőgépet kb. 1000 repült óránként érhet villámcsapás.



28. ábra Villámcsapás esetén az elektromos áram útja a repülőgép felületén [41]

Repülés szempontjából fontos, hogy ismerjük a villámok okozta veszélyeket, hiszen felmerül a kérdés: veszélyes-e a villámcsapás a repülésre? Tekintsük most át azokat a hatásokat, amiket villámcsapás okozhat egy repülőgépen:

- ➔ előfordulhat, hogy olyan erős a villámlás, hogy a géptest megolvad, esetleg ki is lyukad (29. ábra). Ebben az – egyébként ritka – esetben igen komoly probléma adódhat;
- ➔ hajtómű meghibásodás (leállás) is megtörténhet (az 1960-as és 1970-es években, hazánkban is kellett vadászipülőgépből katapultálni villámcsapás miatt);
- ➔ elektromos rendszer, műszerek meghibásodása nem megfelelő elektromos árnyékolás miatt.

Mindazonáltal, villámcsapás miatt ritkán szükséges vészhelyzeti forgatókönyvet alkalmazni, de évente néhány alkalommal azért történik kényszerleszállás emiatt a világban. Ugyanakkor az

előzőek alapján világos, hogy a villámcsapások erősen konvektív, zivataros közegben várhatóak, így ezeknek a meteorológiai helyzeteknek az előrejelzése szintén fontos feladat [42].



29. ábra Villámcsapás okozta sérülés a géptesten egy Boeing-737 utasszállító repülőgép vízszintes vezérsíkján [43]

ÖSSZEGZÉS

Munkánkban áttekintettük a repülésmeteorológiai szempontból fontos légköri folyamatokat. Tettük ezt azért, hogy világosan lássuk, milyen jelenségek, szituációk azok, amelyek prognózisára fel kell készülnünk egy, a közszolgálati célú repülések meteorológiai támogatására alkalmas eljárásrend során.

Megvizsgáltuk a légkörben történő látás feltételeit, az atmoszféra azon jelenségeit, melyek gyengítik a látástávolságot. Kiderült, hogy a látástávolság értékének alakulása rendkívül komplex folyamat eredménye a légkörben, így ennek előre jelzése is alapvetően első sorban közvetett módszerekkel történhet meg.

A repülőgépek jegesedése – mind a felületi, mind a hajtómű esetén – légköri feltételekre vezethető vissza, de ezek csak, mint adott valószínűséget jelentenek, hiszen a jég képződése több egyéb, más (nem meteorológiai) körülménytől is erősen függ. Így feladatunk a légkörben várható túlhűlt víz okozta lehetséges jegesedés veszélyét, mint potenciált prognosztizálnunk.

A légköri dinamikához kapcsolódó veszélyes jelenségeket taglalva beszéltünk a turbulencia és a szélnyírás problémáiról és megjelöltük azokat a jelenségeket, amelyekhez kapcsolódva ezek veszélyes mértékben előfordulnak. A leginkább problematikus időjárási helyzet, ami ezeket a jelenségeket magában hordozza, a zivatar.

Végül a légköri elektromosságról és annak a repülőgépekre gyakorolt hatásáról írtunk és megállapítottuk, hogy ezek a hatások is szinte kizárólag a zivatarhoz, mint komplex légköri jelenséghez kapcsolódnak, így a zivatarok előre jelzése és azok követése elengedhetetlenül szükséges a repülési feladatok biztonságos végrehajtásához.

A mű a KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 azonosítószámú, „A jó kormányzást megalapozó közszolgálat-fejlesztés” elnevezésű kiemelt projekt keretében működtetett Zrínyi Miklós Habilitációs Program keretében, a Nemzeti Közszolgálati Egyetem felkérésére készült.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] http://www.mozaweb.hu/course/biologia_8_2/jpg/b8_119_3.jpg
- [2] Bencze György, Major György és Mészáros Ernő: Fizikai meteorológia. Tankönyvkiadó, Budapest, 1986.
- [3] Laurent Caraffa, Jean Philippe Tarel. Daytime Fog Detection and Density Estimation with Entropy Minimization. ISPRS Annals of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, Sep 2014, Switzerland. pp 25-31, 2014.
- [4] Koschmieder, H: Measurement of Visibility at Danzig. Monthly Weather Review, Vol 58. No. 11., 1930, pp. 439-444.
- [5] Biral, A. A.: Introduction to atmospheric visibility estimation. (online), url: http://www.biral.com/wp-content/uploads/2015/02/Introduction_to_visibility-v2-2.pdf (2017.04.28)
- [6] Molnár Ágnes és Gácsér Vera: Látótávolság és légszennyezettség. Repüléstudományi Közlemények, Vol. 23, No. 2, 2011, pp 1-9.
- [7] Bottyán Zsolt: Kísérlet egy repülőgép-katasztrófa meteorológiai viszonyainak rekonstrukciójára - a Malév HA-MOH repülőgépének balesete. Repüléstudományi Közlemények, Vol. 20, No. 3, 2008. online: http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2008_3/2008_3_Bottyán_Zsolt.html
- [8] Bottyán Zsolt: A közszolgálati célú repülések meteorológiai támogatásáról I. Légkörünk struktúrája, alapfolyamatai repülésmeteorológiai megközelítésben. Repüléstudományi Szemelvények, No. 2, 2017, pp 7-26. ISBN 978-615-5845-26-0
- [9] https://www.bjtonline.com/sites/bjtonline.com/files/styles/bjt30_article_large/public/icing_wing_gro-und.jpg?itok=ehOAvig×tamp=1482754081
- [10] Bottyán Zsolt: Estimation of structural icing intensity and geometry of aircrafts during different conditions – A fixed-wing approach. Időjárás, Vol. 115, No. 4, 2011, pp. 275-288.
- [11] Bragg, M. B., Broeren, A. P. and Blumenthal, L. A.: Iced-airfoil aerodynamics, Prog. Aerospace Sci., Vol. 41, pp. 323-362.
- [12] <https://all-things-aviation.com/wp-content/uploads/2015/10/Airframe-Icing.jpg>
- [13] <https://encrypted-tbn0.gstatic.com/images?q=tbn:ANd9GcTyOXkIwyZuKqJaKRyln3b8EmPcebhgACAx-sOG82GggF47czifj>
- [14] <http://s3.amazonaws.com/estock/nasas1/2/67/46/everystockphoto-nasa-space-26746-1.jpg>
- [15] <https://www.nts.gov/investigations/AccidentReports/Reports/AAR9602.pdf>
- [16] <http://www.boldmethod.com/learn-to-fly/aircraft-systems/dont-let-carb-ice-happen-to-you/>
- [17] http://archive.newsweaver.com/shellaviation/newsweaver.co.uk/shellaviation/e_article00112696064e4.html
- [18] Fedorovich, E., Rotunno, R. and Stevens, B.: Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology, Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [19] <https://www.google.hu/url?sa=i&rct=j&q=&esrc=s&source=images&cd=&cad=rja&uact=8&ved=0ahU-KEwiR2IXHsMzTAhVDKpoKHYVDB1UQjRwIBw&url=http%3A%2F%2Fwww.meteoros.net%2F2012%2F02%2Fturbulencia-atmosferica.html&psig=AFQjCNFbZxg1nNSEDqcnPfwtfXPH-KWgVWQ&ust=1493648204352823>
- [20] [https://cdn.shutterstock.com/shutterstock/videos/3655022/thumb/1.jpg?i10c=img.resize\(height:160\)](https://cdn.shutterstock.com/shutterstock/videos/3655022/thumb/1.jpg?i10c=img.resize(height:160))
- [21] http://www.weatherquestions.com/wind_shear.jpg
- [22] <http://www.backpackertravel.org/wp-content/uploads/2014/12/thermal-turbulence.jpg.pagespeed.ce.0svCOXyli8.jpg>
- [23] <http://www.aero-mechanic.com/wp-content/uploads/2011/10/11-16.gif>
- [24] https://media.licdn.com/mpr/mpr/shrinknp_800_800/AAEAAQAAAAAAAAAg_AAA-AJDE1MjU1MjY4LWRiMTItNDM4Ny1iMGY3LWUxOGVhNWU3MGNhNw.jpg
- [25] Baranka, Bordás, Gyuró, Havasi, Leelőssy, Mészáros, Szépszó, Tasnádi, Weidinger: Klasszikus dinamikus meteorológiai feladatgyűjtemény II. (online), url: http://ttktamop.elte.hu/online-tananyagok/klasszikus_dinamikus_meteorologia_ii_feladatgyujtemeny/index.html (2017.04.28)
- [26] <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/MeteorologiaAlapismeretek/ch07s03.html>
- [27] http://images.slideplayer.com/18/6117286/slides/slide_8.jpg
- [28] http://www.eumetrain.org/data/3/304/media/images/2_6.jpg
- [29] http://www.tankonyvtar.hu/en/tartalom/tamop412A/2010-0012_levegokornyezet/images/013.png
- [30] <https://4.bp.blogspot.com/-ZD3EY92EOqW/VvfosSihEUI/AAAAAAAAVDw/6RanJBp7wvkfZD3uIdet-HRmDp3K9ywmG/s1600/microburst.jpg>
- [31] http://images.gawker.com/llbrzvzleyqqh9bf1f4j/c_scale,fl_progressive,q_80,w_800.png

- [32] <http://libraryonline.erau.edu/online-full-text/ntsb/aircraft-accident-reports/AAR86-05.pdf>
[33] https://www.weather.gov/images/bro/wxevents/2014/aug13midvalley/microburst_schematic_nubilt.jpg
[34] <http://www.esri.com/news/arcnews/winter1011/articles/winter1011gifs/p32p3-lg.jpg>
[35] <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/originals/7e/cd/7d/7ecd7d9bcd9f7e8c2e65dab5d816e549.jpg>
[36] <https://i.ytimg.com/vi/YTRIWRTL1Gc/hqdefault.jpg>
[37] <https://www.weather.gov/media/publications/front/11nov-front.pdf>
[38] <http://player.slideplayer.com/18/6192933/data/images/img4.jpg>
[39] <https://media1.britannica.com/eb-media/78/7578-004-7C794BAD.jpg>
[40] Ferenc Wantuch and Sándor Szonda: General characterisation of the lightnings in the Carpathian-basin. Időjárás, Vol. 109, 2005, pp. 111-123.
[41] <https://qph.ec.quoracdn.net/main-qimg-11405cdc72d6e70d7cd8e0f2ed909544-c>
[42] Sándor Valéria és Wantuch Ferenc 2004: Repülésmeteorológia. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 2005.
[43] <http://i29.tinypic.com/2rqgenm.jpg>

**ON THE METEOROLOGICAL SUPPORT FOR THE PUBLIC SERVICE AVIATION II.
ATMOSPHERIC PHENOMENA IN THE AVIATION METEOROLOGY APPROACH.**

The state-of-the-art meteorological support for the public service aviation have to be based on the exact knowledge about the atmospheric phenomena which are dangerous for the aviation. In our recent work we analyse in-detail the problems of visibility degradation, aircraft airframe icing, atmospheric turbulence, windshear and atmospheric electricity. This discussions make for the weather forecast developments and the devising of a better mode of the meteorological support for the public service aviation, too.

Keywords: *visibility, airframe icing, atmospheric turbulence, windshear, lightning strike*

Bottyán Zsolt (PhD)
tanszékvezető, egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774

Bottyán Zsolt (PhD)
Head of Department, associate professor
National University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Institute of Military Aviation
Department of Aerospace Controller and Pilot Training
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774



http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem_Bottyán_Zs.pdf

INTERNATIONAL AND HUNGARIAN APPLICATIONS OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS IN THE METEOROLOGICAL RESEARCHES

The meteorological applications of inmanned aircraft systems has been grown in the early years in the last twenty-five years. In our present work we show the most important developments regarding to international and Hungarian usage of unmanned meteorological aircrafts. We present the detailed applications of Global Hawk, Aerosonde, Small Unmanned Meteorological Observer (SUMO) and Meteorological Mini Unmanned Aerial Vehicle (M2AV) in the case of weather monitoring. Finally, we also demonstrate the first Hungarian meteorological UAS application with its results, too.

Keywords: *unmanned aircraft system, aviation meteorology, weather forecast, meteorological sensors, radiosonde.*

INTRODUCTION

Nowadays, the high resolution numerical weather prediction systems require huge amount of straight 3D meteorological data to produce their correct forecasts for the different users all over the world. These mentioned 3D meteorological data stem from different sources such as surface meteorological stations, ocean buoys, radio soundings, meteorological satellite systems, radars, LIDARs, airborne measurements etc.

The most important part of these data come from the lower troposphere because the state of the planetary boundary layer (PBL) is basically determines the atmospheric phenomenon which are so essential to aviation safety. Only the high resolution airborne measurements are able to provide the mentioned important atmospheric data so this kind of measurements are fundametal in the state-of-the-art weather predictions, as well [1][2][3].

Despite of the importance of these PBL data there is not enough amount of high quality meteorological measurements in this atmospheric region to improve significantly the numerical weather predictions' accuracy. It is clear earlier we only could fall back on radiosonde data in this region of troposphere. Although the radiosonde data are freely available since many decades these infromations does not cover properly the lower troposphere in the whole Earth as it can be seen in Figure 1.

Because of high costs of radiosonde measurements and the lack of continental surfaces around the world there are some huge areas of the Earth where the mentioned meteorological data are absolutely missing.

Applying the AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) measurements information was an important step to get some more exact meteorological data from PBL. The AMDAR data mainly derived from larger aircrafts belong to lead commercial airliners thus the source of these data strongly connected their flight path of course [5].

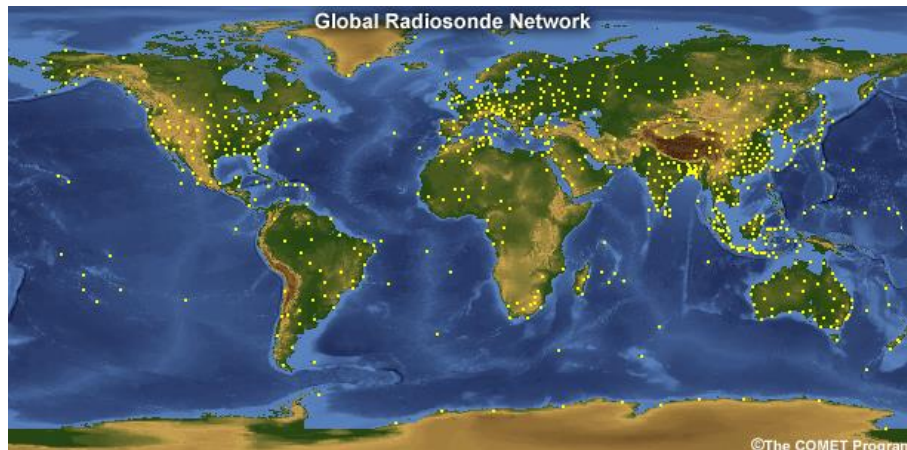


Figure 1. The Global Radiosonde Network [4]

Airplanes which are mounted AMDAR sensor system able to measure or derive the following atmospheric parameters with a high resolution of time, pressure altitude, and GPS position:

- Air temperature (static air temperature);
- Wind speed and direction;
- Pressure altitude (barometric pressure);
- Turbulence (Eddy Dissipation Rate or Derived Equivalent Vertical Gust, if the algorithm is installed);
- Water vapour (if sensor is installed).

Additional non-meteorological parameters that can be reported, measured or derived include:

- Icing indication including accreting or not accreting (pending);
- Departure and destination airport;
- Aircraft roll angle;
- Flight identifier.

While in flight, an AMDAR-equipped aircraft reports the real-time meteorological variables above every 3–10 minutes.

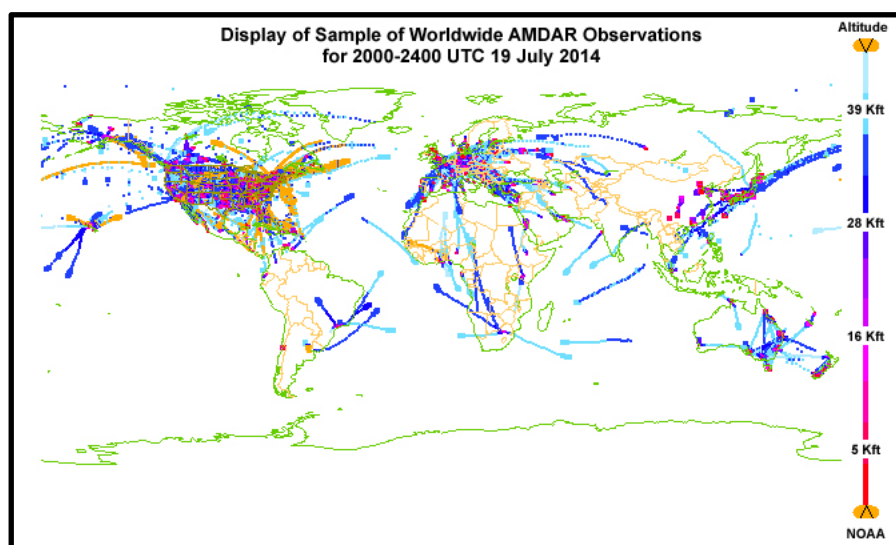


Figure 2. Sources of the AMDAR observations as a function of altitude and geographical locations [6]

AMDAR data are mainly available from larger airports, thus meteorologists can access vertical profiles of temperature and winds with 100-meter vertical resolution in the lower troposphere up to about 700 hPa. Depending on the AMDAR participating airlines' schedules, some airports have the capability of providing multiple profiles per hour. On the other hand in case of AMDAR measurements there are also a lot of geographical regions have not such airborne atmospheric data as we can see in Figure 2. AMDAR provides over 600,000 observations daily, from over 3,000 aircraft. We have to note the AMDAR data significantly cheaper than radiosonde ones with averages just 15USD/profile against the radiosonde 300 USD/profile value [7].

Ideally, the two systems should be regarded as complementary in the context of establishing, maintaining, and optimising a national observing system but it is clear, usage of AMDAR and radiosonde data in the numerical weather prediction systems are not enough to create an appropriate forecasting of meso-scale meteorological systems over a large area of the Earth.

For example, at present in Hungary, there are only two locations (Budapest and Szeged) have radiosounding measurements twice and once a day so it means the Hungarian Meteorological Service can give us three atmospheric profiles per day altogether. On the other hand the number of airports have AMDAR data sources in our country is also very low: approximately 3–4 airports (mostly the LHBP) have AMDAR data only which means 20-30 tropospheric measurements per day. In spite of using more and more AMDAR and radiosonde data in numerical weather predictions the above mentioned facts give some strong limitations in their usage in weather forecasting.

On the basis of temporal and spatial distribution of AMDAR and radiosonde data we can declare the applicable of them is an important step in high resolution weather prediction but we cannot emerge the quality of our predictions in a higher level without a new generation of airborne meteorological measurement technology.

In our opinion a potential new airborne measurement system have to based on the well-known unmanned aircraft system (UAS) technology and its advantages. Accordingly, international and Hungarian experimental applications in atmospheric researches can be shown in next Chapters of our work.

WHY UAS TECHNOLOGY IS AN APPROPRIATE RESPONSE TO THE CHALLENGE OF MODERN AIRBORNE ATMOSPHERIC MEASUREMENTS?

As we mentioned earlier the applied numerical weather predictions require large amount of perfect meteorological data with a high resolution in time and space mainly from the PBL. These data are needed in the data assimilation procedure of numerical models. In order to getting this structured high amount of information from the lower atmosphere the application of UASs seems to be a good idea from our point of view. To collect the mentioned 3D data (temperature, humidity, air pressure, wind etc.) it would be an appropriate solution: using some special UAVs for this express purpose. Of course there are some other methods (for example remote sensing techniques) to measure these mentioned parameters but usage of them has strong limitations, too. The first problem is: none of them are enough perfect and flexible in

time and space. The second one is: relatively high costs of them (for example in the case of meteorological satellites or weather radars).

Then again the modern UASs turn into more cheaper with the extended flight duration, larger payload capacity and higher level of reliability. In these days there are different types of UASs with a wide range of size and mass as we can see in Figure 3. The applied UASs can appear are ultralight (with 10^{-3} kg mass) or heavy (with 10^4 kg mass) and we can find many more ones between the mentioned values, too. Of course their masses are essential because the mass basically determines the maximum of flight time and altitude of the mentioned systems.

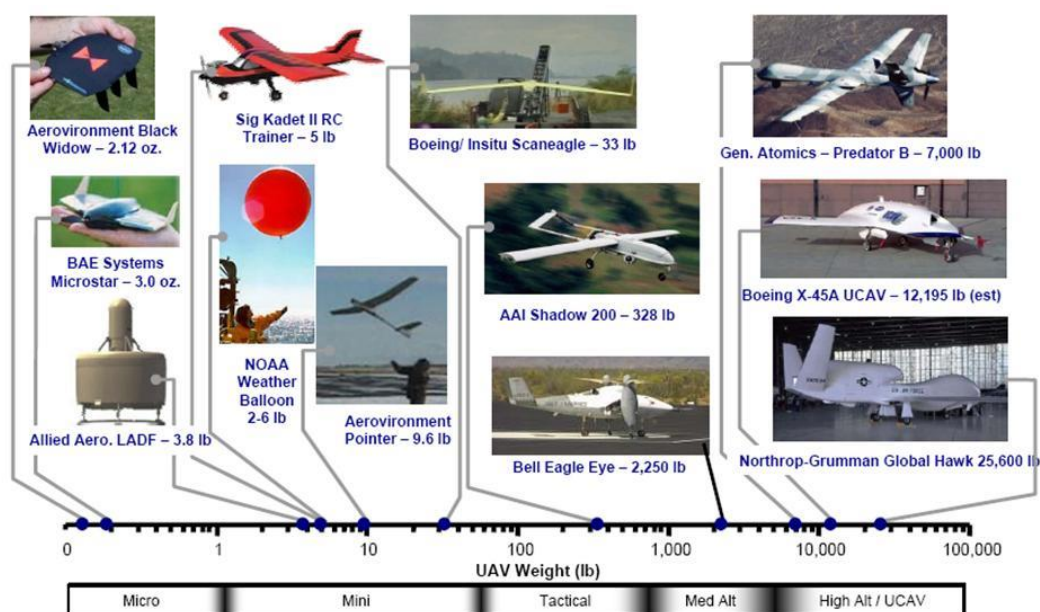


Figure 3. An overview of applied unmanned aircraft systems based on their size [8]

It is obvious in case of perfect meteorological application of the UASs we have to mounted this aircrafts with the special weather sensor systems on their board. Thanks to development of these sensors their size and mass are going to be smaller and smaller thus we can calculate with 10^{-1} and 1 kg of mass and 10^{-2} and 10^{-1} m of size in case of sensors' onboard characteristics. As it can be seen on Figure 3 the most suitable unmanned aircrafts categories for the meteorological applications are in the mini and tactical classes as well.

On the other hand we can also apply the larger UASs for meteorological purposes but in this case their goals would be mainly some very special meteorological missions such as hurricane penetration projects (NASA, Global Hawk) and other high altitude and long flight duration missions, too (Figure 4) [9].

Nevertheless the very high purchase and operation costs of the mentioned High Altitude and Long Endurance (HALE) unmanned aircrafts give us strong limitations in case of the meteorological applications of these systems. However connecting some international large meteorological campaigns which are use the similar large unmanned aircrafts in their researches is a real opportunity of Hungarian meteorologists, too (for example personal taking part in NASA or NOAA weather projects).

We think the real possibility of using unmanned aircrafts in our meteorological researches (and later in the operational weather predictions, too) if we develop an appropriate system for weather reconnaissance and weather data gathering. As we mentioned earlier one of the main problem in the improving of numerical weather prediction is the lack of high quality perfect meteorological data from lower troposphere mostly from PBL.

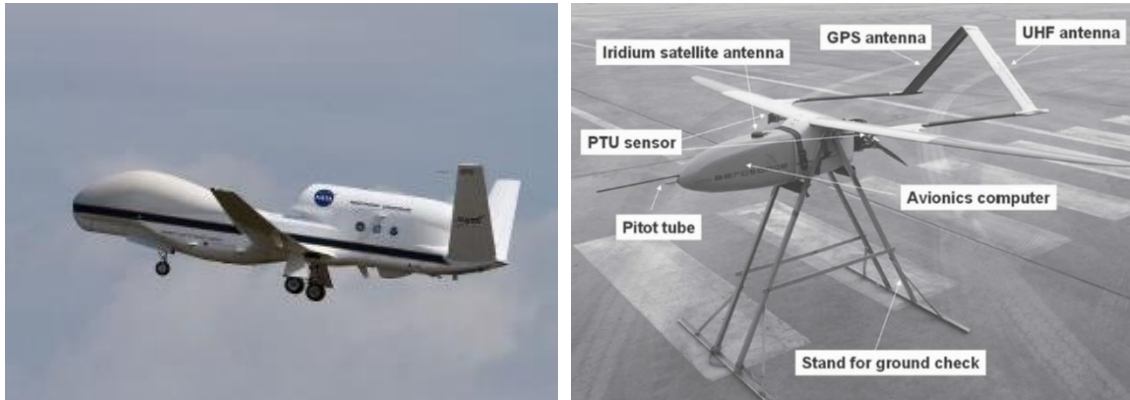


Figure 4. Left NASA Hurricane and Severe Storms Sentinel meteorological High Altitude and Long Endurance (HALE) UAS during take-off. This system is based on Northrop Grumman Global Hawk unmanned aircraft.

[10] Right: The Aerosonde Mark III UAS before the Longwang typhoon penetration in Taiwan [9]

In order to gathering the mentioned weather data we have only one real opportunity: applying some unmanned aircrafts in mini and tactical categories which are mounted perfect meteorological sensor systems and using them with determined flight patterns at the same time over the Carpathian-basin (Figure 5) [11].

There are some advantages of these unmanned aircrafts:

- ➔ they have relatively small take-off mass;
- ➔ they are mounted with flexible, autonomous GPS-based flight control system which are capable to tracking a pre-determined flight path with high accuracy;
- ➔ these aircrafts are able to survey all the PBL, from surface to 3000 meters;
- ➔ their operational and purchase costs are moderate with the special regard to similar manned aircrafts;
- ➔ if there is a serious problem with the mentioned aircrafts they are able to make safe landing (for example with the help of parachute) without any danger of life;
- ➔ and finally if there is a crash the value of the damage will be more smaller than in other case.

Unfortunately, despite of the above mentioned facts there are two important factors are set back the operational usage of the meteorological UASs:

- ➔ firstly, the integration of UASs' flights into conventional airspace system is moving on slowly and we do not know exactly how they can flight with manned aircrafts without violation of aviation safety;
- ➔ on the other hand the lack of law background of applications of the mentioned aircrafts with the special regards to UASs' pilots and users, too.

In the early months of 2017 the Hungarian authorities are working on these laws so we hope in this year there will be an appropriate law environment to using safely our UASs.

In the next two Chapter we are going to show the more significant international and Hungarian meteorological UAS-based developments.

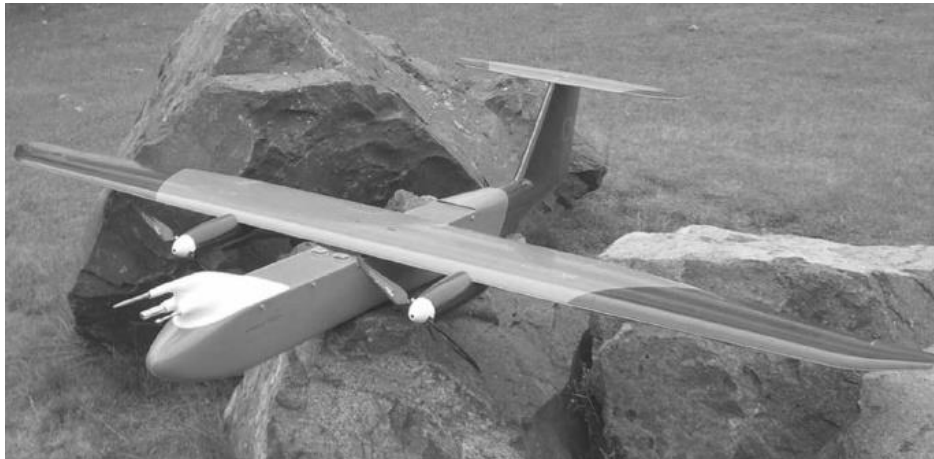


Figure 5. The M²AV (meteorological mini unmanned aerial vehicle) with meteorological sensors are mounted on its board [11]

UAS AIRBORNE METEOROLOGICAL MEASUREMENTS – AN INTERNATIONAL OVERVIEW

The Northrop Grumman Global Hawk

The most important and spectacular meteorological applications of the Global Hawk HALE (High Altitude Long Endurance) UAS are the monitoring of the hurricanes and severe storms inside of NASA projects (Hurricane and Severe Storm Sentinel, HS3 mission). This UAS has some very remarkable flight performances: the Global Hawk is able to flight up to more than 26 hours without landing and its maximum flight altitude is about 60,000 feet.



Figure 6. Loading the dropsondes into the storage compartment of the NASA Global Hawk UAS [12]

Of course there are more meteorological, physical and other sensors and instruments mounted in the onboard of NASA Global Hawk, but we show only the most important ones in this work. Controlling of such huge UAS projects was a very hard work and it required a large technical

team with high level of knowledge of the different scientific area, as well. The control of flight itself happened from the control room as it can be seen in bottom right picture of Figure 7.

The most important other onboard meteorological sensors and instruments are the followings:

- ➔ scanning High-Resolution Interferometer, SHRI can sense the given thermal radiation of the matters and able to determine the humidity profile of the troposphere (Figure 7. upper left picture);
- ➔ during hurricane observation there is a well-applicable instrument such as Cloud Physics Lidar (CPL) also mounted to Global Hawk UAS (Figure 7. upper right picture);
- ➔ the High-Altitude Imaging Wind and Rain Profiler (HIWRAP) is able to high-resolution wind and precipitation profiles in the all troposphere region during the flight in near real-time mode. (Figure 7. bottom left picture).



Figure 7. Some important meteorological instruments from onboard of NASA Global Hawk UAS and the mission control room (explanation of them is in the text) [10]

Of course there are more meteorological, physical and other sensors and instruments mounted in the onboard of NASA Global Hawk, but we show only the most important ones in this work. Controlling of such huge UAS projects was a very hard work and it required a large technical team with high level of knowledge of the different scientific area, as well. The control of flight itself happened from the control room as it can be seen in bottom right picture of Figure 7.

Nowadays the correct prediction of the development and moving of the hurricanes is one of the greatest challenge for the meteorologists all over the world. This forecasts cannot be enough perfect without exact knowing the wind patterns inside in the tropical cyclones (hurricanes or typhoons) so it is essential to gather the mentioned information from there. Earlier we could not receive such information, but today with the help of HALE UAS (such as Global Hawk) mounted with HIWRAP, we can (Figure 8). On this picture we can see well the development of Eye and Eyewall in the observed Karl hurricane.

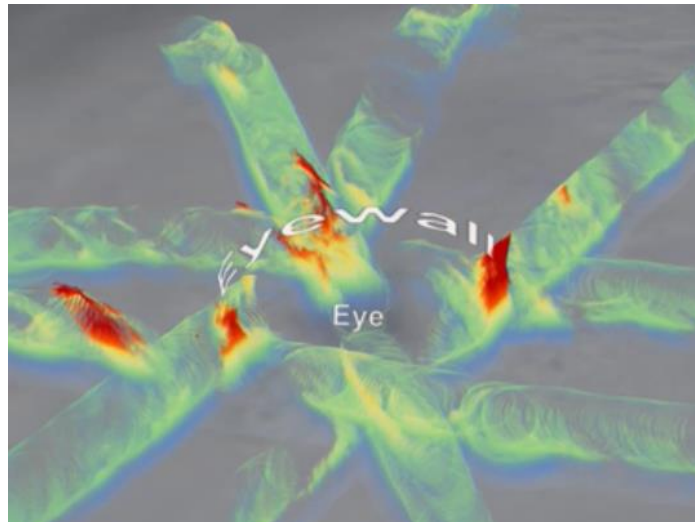


Figure 8. Development of Eye and Eyewall in the Karl hurricane. This picture is based on HIWRAP measurements of NASA Global Hawk UAS [10]

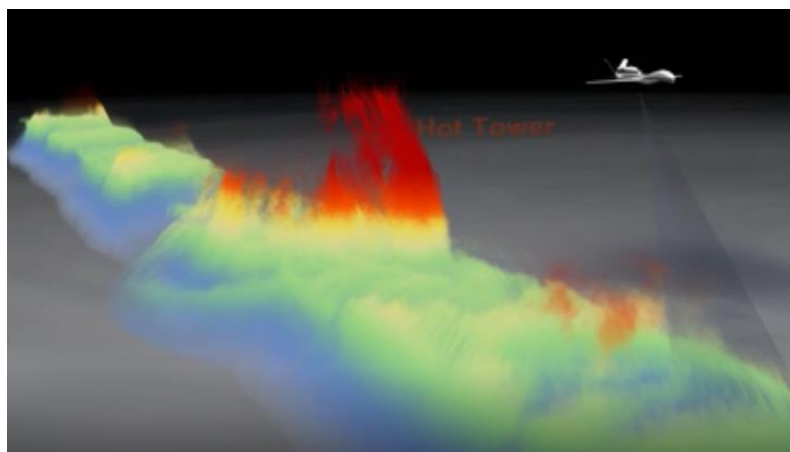


Figure 9. Development and moving of Hot Towers in the Karl hurricane from an other viewing angle. This picture is also based on HIWRAP measurements of NASA Global Hawk UAS [10]

The same HIWRAP instrument made a very spectacular picture which shows the high intensity vertical motions of warm and humid air in the Karl hurricane. The mentioned phenomena called as Hot Tower (Figure 9). The red, orange, yellow, green and blue colours represent 12 km, 10 km, 7.5 km, 6 km and below 6 km altitude, respectively.

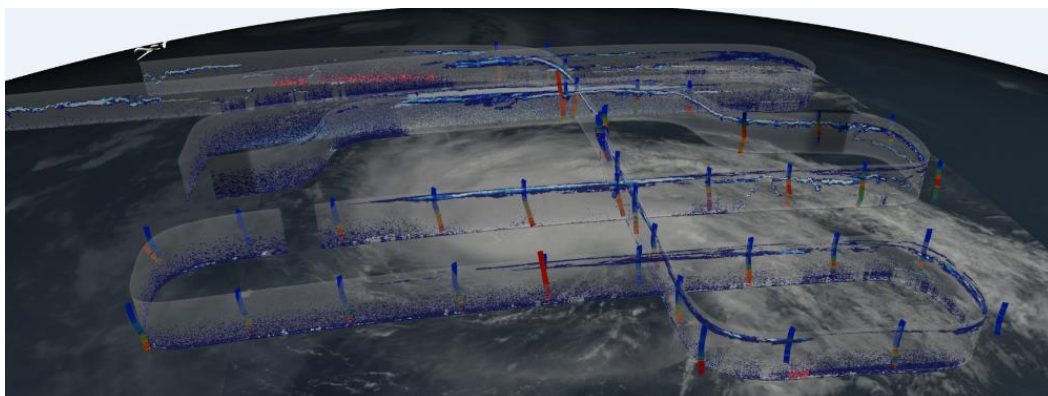


Figure 10. The applied flight routes and the vertical profiles measured by dropsondes during the Nadine hurricane project [10]

There was an other very interesting scientific project was based on the Global Hawk UAS measurements of desert airmasses from Sahara, in the case of development of Nadine hurricane. The UAS dropped many sondes at the given, pre-determined geographical position during its flight to measure the relative humidity profile of the clouds were belong to Nadine hurricane (Figure 10). On this figure the coloured columns represent the values of relative humidity and the blue and red colour mean low and high value of relative humidities, respectively.

At present the NASA hurricane researches with the Global Hawk are going on further and the number of meteorological missions of mentioned unmanned aircrafts is higher than 100.

The Aerosonde UAS

The Aerosonde UAS – like Global Hawk – was also used in many cases are connected with the meteorological projects over the whole Earth, including the Antarctica, as well. The Aerosonde UAS made by Aerosonde Ltd in Australia (Figure 11). The famous UAS was the first unmanned aircraft which was able to cross the North Atlantic-ocean without landing, in August of 1998. The total flight time was 26 hours and 45 minutes from Canada to Great Britain with the total flight distance of 3270 km (Figure 12).

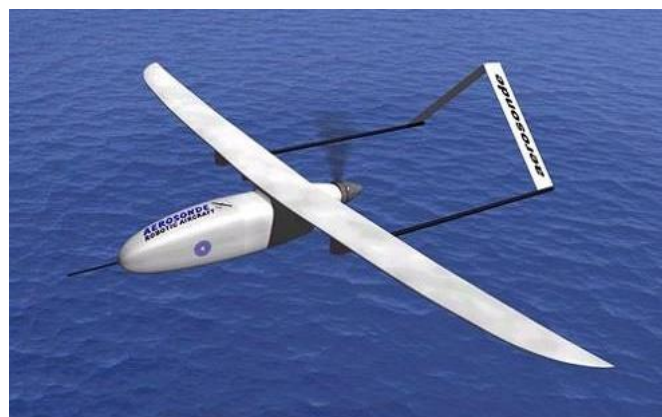


Figure 11. The Aerosonde UAS during its flight over the Atlantic-ocean [13]

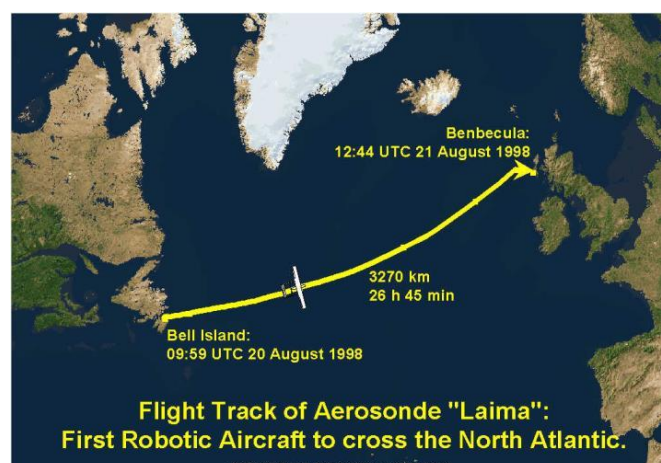


Figure 12. The historic flight of Aerosonde in 20–21 August of 1998 [14]

It is obvious - based on the above mentioned flight performance – the Aerosonde UAS also very suitable for meteorological purposes. This aircraft can flight with 2–5 kg payload, more

than 1000 km flight radius and 6000 m maximum altitude, as well. On the other hand Aerosonde is able to stay in the air up to 12–17 hours without any landings, if it is needed.



Figure 13. The Aerosonde UAS during the meteorological measurements campaign over Antarctica. The aircraft is located on the top of its transportation vehicle [15]

One of the most famous meteorological application of Aerosonde was in a huge campaign in the Antarctic region during September 2009. This project was belong to University of Colorado and in this period there were many onboard measurement was made by an Aerosonde special meteorological UAS. The total flight number was 16 with 130 flying hours and 11.000 km flight distance over the Antarctica (Figure 13).

The UAS in hand was equipped with the following instruments and sensor systems during the measurement campaign:

- Pitot-tube with GPS unit (windspeed and wind direction measurement);
- conventional radiosonde unit (temperature, humidity, air pressure measurements);
- infra-thermometer (surface temperature sensing);
- dropsonde unit (temperature, humidity, wind profiles determination);
- pyranometer and pyrgeometer instruments (short- and longwave radiation measurements).



Figure 14. Thick ice contamination on the wings and sensors of Aerosonde after its landing [16]

During Aerosonde flights over the Antarctic there were some serious challenges such as unusual cold temperatures, strong wind and intensive airframe icing, too (Figure 14). The extreme cold weather played also an important role in the problems of aircraft engine and sensors. The strong wind caused some dynamical instabilities during its take-off and landing flight phase [16].

Of course the scientists could gather a large amount of airborne data from the troposphere over the Antarctica with the help of Aerosonde UAS. In our work we only show two important profile measurements which are based on Aerosonde UAS measurements during the mentioned scientific project. These are show four temperature and windspeed profiles were made by Aerosonde UAS in 24 September of 2009. These profiles were originated from different locations as it can be shown in the upper right area of Figure 15 and 16 [17][18].

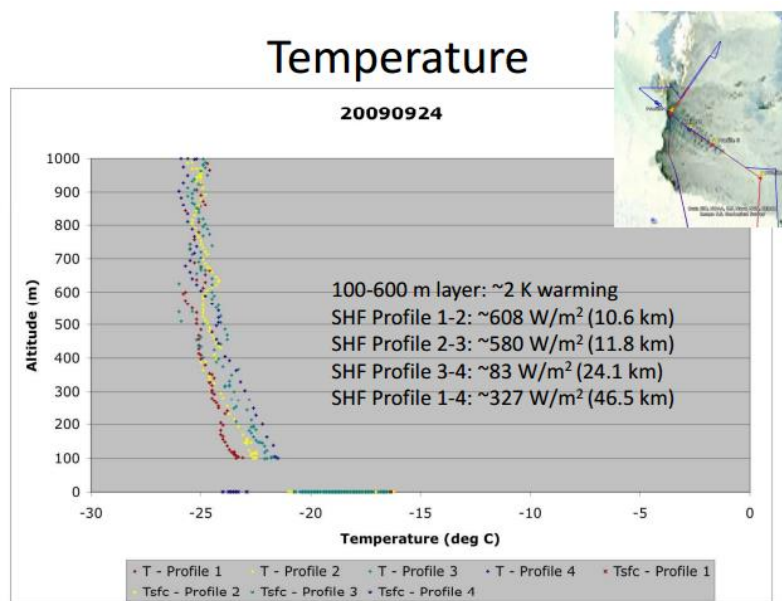


Figure 15. Different temperature profiles are based on Aerosonde UAS measurements were made in different time and space during the Antarctic campaign [17]

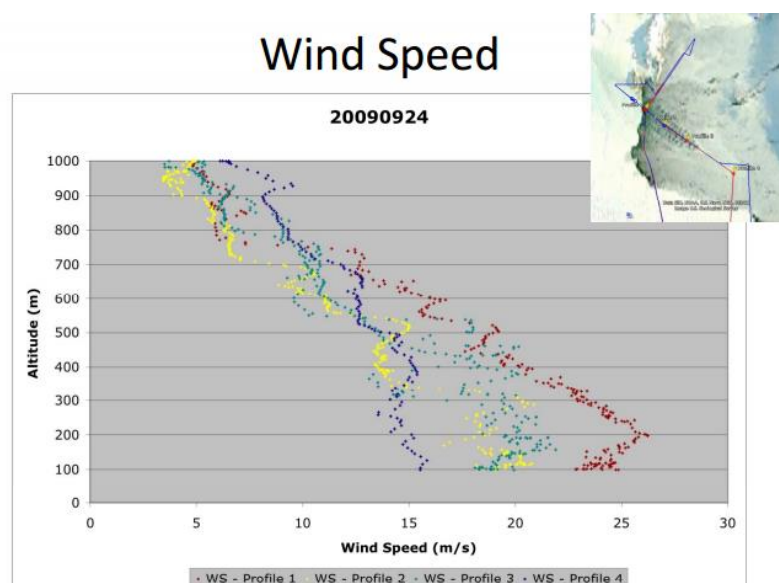


Figure 16. Different windspeed profiles are based on Aerosonde UAS measurements were made in different time and space during the Antarctic campaign [17]

The Small Unmanned Meteorological Observer (SUMO) UAS

The SUMO (Small Unmanned Meteorological Observer) UAS developed by University of Bergen can observe specifically the planetary boundary layer (PBL) of our atmosphere (Figure 17) [19].



Figure 17. The Small Unmanned Meteorological Observer (SUMO) unmanned aircraft system [19]

speed of flight	between 12–35 m/s
maximum altitude	higher than 3500 m AMSL
wingspan	0.8 m
length	0.75 m
maximum take-off mass	0.58 kg
maximum flight time	max. 30 minutes

Table 1. The important values of flight performances of SUMO UAS [19]

The most important flight performances data of the mentioned SUMO UAS can be seen in the Table 1. It is clear, the SUMO has a small take-off mass and size with the relatively short flight duration but this system is able to observe the top of PBL. The SUMO is very suitable planetary boundary layer profiling with high resolution in time and space, as well. Indeed we can take in account this meteorological UAS like a fast radiosonde instrument which can be applied several times (Table 1).

Like Aerosonde, the SUMO also took part some meteorological campaign over the different polar regions of Earth such as Iceland and Antarctica. Among the mentioned facts the other big advantage of the SUMO is its price: we can purchase it from about 700–800 EUR and the basic meteorological sensors are included in it. The aircraft has autonomous autopilot system with GPS unit. The next meteorological elements are mounted on its board: DigiPicco I2C temperature and humidity (outer installation below its wing) and SCP1000 air pressure (inner installation) sensors. With the using of proper geographical position values are derived by GPS unit and onboard telemetric data the SUMO can determine wind profiles, too. It is important to note the measured and computed telemetric data can be accessed with 4 Hz frequency in real-time mode with the help of its control laptop.

As we note earlier the SUMO is an ideal system measuring vertical values of meteorological state variables over a given location (meteorological profiling). In order to excellent profiling the SUMO is able to flight along the given special 3D routes (climbing spiral shaped) are developed by scientists with a constant thrust and pitch angle (Figure 18). Using this special

maneuver SUMO can determine temperature, humidity, windspeed and wind direction profiles as it made them over Iceland (Figure 19) [19].

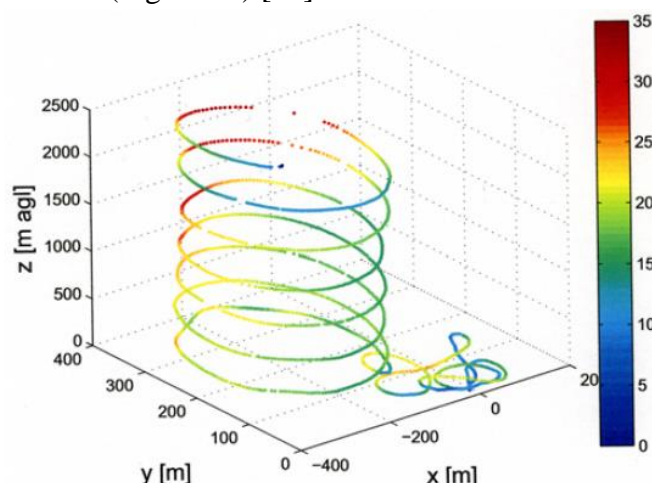


Figure 18. The general climbing and sinking maneuver of SUMO UAS to determine PBL profiles [19]

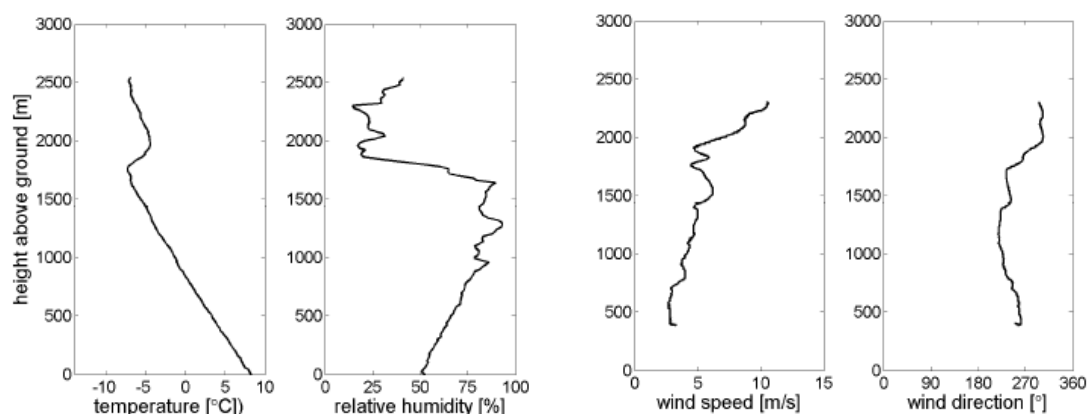


Figure 19. Temperature, relative humidity, windspeed and wind direction profiles are made by SUMO UAS during the meteorological campaign over Iceland [19]

Meteorological Mini Unmanned Aerial Vehicle (M²AV)

The Meteorological Mini Unmanned Aerial Vehicle (M²AV) UAS developed by Technical University of Braunschweig turned up in 2007 and this aircraft system also was applied in the measuring of PBL [20]. The basis of the mentioned system is a Carolo T200 unmanned aircraft which can be purchased freely. Of course the UAS has an autonomous autopilot unit and was mounted with some special meteorological sensors, too (Figure 20–21).



Figure 20. The Meteorological Mini Unmanned Aerial Vehicle (M²AV) UAS is based on Carolo T200 aircraft with its meteorological sensors [20]

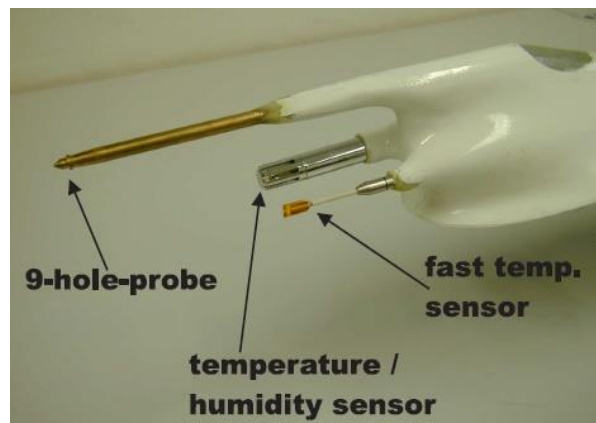


Figure 21. Sensors of Meteorological Mini Unmanned Aerial Vehicle UAS: 9-hole-probe for (measuring atmospheric turbulence), temperature/humidity and fast temperature sensor [20]

The mounted sensors' specifications can be shown in the following Table 2.

Measurements	Physical range	Abs. Accuracy	Resolution
<i>dynamic pressure</i>	0–1250 Pa	± 15 Pa	0.3 Pa
<i>dynamic pressure</i>	0–250 Pa	± 3 Pa	0.1 Pa
<i>static pressure</i>	800–1100 hPa	± 2 hPa	± 1 hPa
<i>differential pressure</i>	(–250)–(250) Pa	± 5 Pa	0.1 Pa
<i>slow temperature</i>	(–40)–(+60) °C	± 1 °C	± 0.1 °C
<i>fast temperature</i>	(–40)–(+40) °C	± 5 °C	± 0.05 °C
<i>relative humidity</i>	0–98%	± 5 %	± 0.1 %
<i>wind vector comp.</i>	0–10 m/s	± 1 m/s	± 0.05 m/s

Table 2. Important specifications of measurements of Meteorological Mini Unmanned Aerial Vehicle (M²AV) [20]

The main goal of using M²AV was the high-resolution measurements of winds in the PBL. Despite some different wind measurement techniques, in case of using M²AV the applied method was the following: the aircraft made a flight along a 3D square pattern firstly in climbing, after in sinking mode. From the measured different flight parameters the wind characteristics can be determined during the flight (Figure 22).

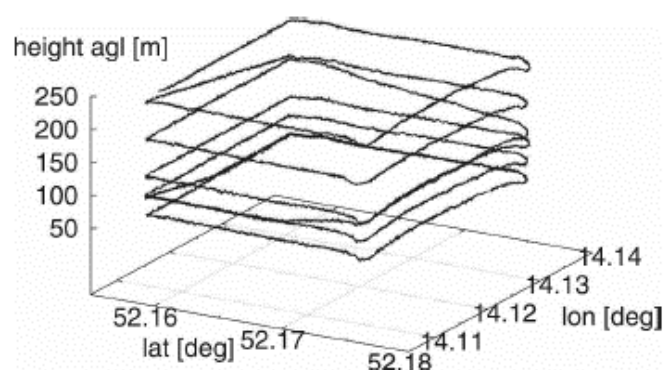


Figure 22. The applied flight geometry to determine wind vector components in case of M²AV [11]

In order to testing the M²AV measurements the scientists compared their wind measurements data derived from UAS with a 99 m wind tower and a Sodar ones on 1 August, 2007. The results of this comparison can be show non Figure 23.

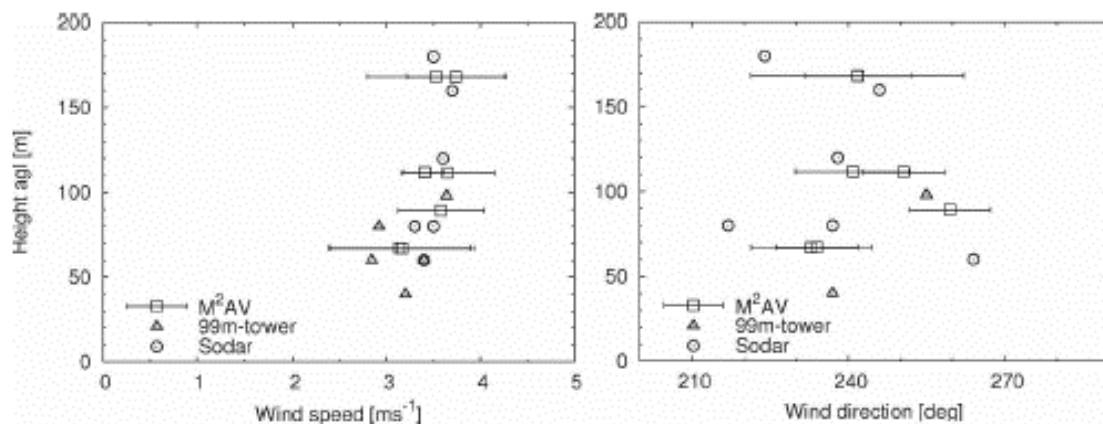


Figure 23. Comparison of windspeed (left) and wind direction (right) values measured by M²AV, 99 m tower and Sodar on 1 August, 2007 [11]

There is a good fitting among the different measurements so the wind characteristics were derived by M²AV UAS has a high quality accuracy. In case of windspeed the difference among the mentioned measurements is smaller than 1 m/s. On the other hand there is a little bit larger differences in the wind direction values but this is not larger than 30 degree at the given level.

It is obvious we only show the most important worldwide meteorological UAS applications in order to focus the experimental usage of Hungarian weather unmanned aircraft system described in the next Chapter. Nevertheless we have to note applying similar meteorological UAS in the weather monitoring is a big challenge and indispensable method all over the world.

UAS AIRBORNE METEOROLOGICAL MEASUREMENTS – EARLIER HUNGARIAN EXPERIMENTS

Experimental applications of the model aircraft as an early meteorological UAS in 1975.



Figure 24. The HA-MET-02 experimental model airplane is equipped with a radiosonde unit, before its take-off.
Source: personal explanation of Zénó András Gyöngyösi

During an earlier overview of the Hungarian meteorological measurements we happened on an experimental airborne measurement was based on a larger model airplane which was equipped a simple unit of radiosonde. (Figure 24).

Unfortunately, the results of the mentioned experimental flights and other details are absolutely not known because of the long period of the elapsed time. In spite of the lack of measurements data it is clear, this experimental airborne observation was the first attempt to gather some weather data from lower atmosphere with the help of an „unmanned airplane” over Hungary. On the other hand it is obvious the idea of this experiment was originated from aviation meteorologists who were employed by at the Meteorological Office of the Ferihegy International Airport (LHBP) in Budapest, Hungary in this time.

In our opinion probably there was a large potential inducement in case of the above mentioned experiments: on 15 January 1975 an IL-18 airplane of MALÉV Hungarian Airlines crashed during its landing at Ferihegy Airport. At the moment of the accident the weather conditions at the airport were very poor with the special regard to ceiling and visibility [21] After the investigation it was obvious the time and space resolution of the given meteorological data were available in the Meteorological Office was insufficient to making more accurate forecasts. We have to note the lack of weather data was not the most important factor in the mentioned crash. Usage of the experimental system might be the first attempt to reduce the real lack of atmospheric data near the airport and we can regard the applied model aircraft as the first Hungarian weather reconnaissance airplane (Figure 25).



Figure 25. The experimental meteorological model aircraft and the persons who developed it in 1975. Source: personal explanation of Zénó András Gyöngyösi

BHE Bonn Hungary Electronics Ltd. BXAP15 UAS

The BHE Bonn Hungary Electronics Ltd. plays an important role in the Hungarian development of complex UAV systems such as BXAP15 one. On the other hand the mentioned firm also took part in the development of first Hungarian experimental meteorological UAS in cooperation with the Institute of Military Aviation of National University of Public Service in the period of 2011–2013. The experimental weather reconnaissance UAV is based on the BXAP15 unmanned aircraft system (Figure 26).



Figure 26. The BXAP15 UAS was applied for atmospheric measurements between 2011 and 2013 over Hungary. Upper left: the landed UAS. Bottom left: the control panel of the UAS. Right: the meteorological sensors are mounted on the fuselage. Source: photos by Zénó András Gyöngyösi

The all mentioned system has two main parts: an aircraft itself and a control unit is mounted on the surface. The control unit contains a remote controller and a special antenna which is in communication with aircraft on microwave wavelength during the flight. On the screen of control unit we can see some important informations about aircraft, for example True Airspeed, Ground Speed, altitude values are based on barometric and GPS data, accumulator capacity and navigational informations, etc. Moreover we also get some information about telemetrics and real-time video, too. There is a very useful function of the autopilot system since we can give a complex 3D flight path determined by up to 500 waypoints (it is a database contains the 3D geographical locations and the given airspeeds between them) and the aircraft is able to follow it exactly during its flight. It is important to note we can modify this database on the screen of control unit before and after take-off and if the aircraft is under control of autopilot system we are able to switch on the manual mode, immediately. The control system also storage some important other information about the whole system.



Figure 27. Left: catching of the unmanned aircraft with a net. Right: the aircraft on its catapult before take-off
Source: [22] and photographed by Zénó András Gyöngyösi, 2012.

The aircraft unit can take-off from the surface and with the help of its catapult system. The landing can happen on its gears or in a catching net as we can see in Figure 27 [22]. In an emergency situation the aircraft is able to interrupt the flight and descending with the help of its parachute. The basic flight performance data of the unmanned aircraft are the followings:

speed of flight	between 60–100 km/h
maximum altitude	higher than 3500 m AMSL
wingspan	3.7 m
length	1.7 m
maximum take-off mass	14 kg
maximum flight duration	maximum 90 minutes
engine	1200 W electric
payload mass	4 kg

Table 3. The basic flight performace data of BXAP15 UAV [22]

On the basis of above mentoned facts, during the TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 „Critical Infrastructure Protection Researches” project we applied this *BXAP15* system for monitoring the lower atmospheric phenomena. In order to use the mentioned unmanned system for meteorological measurenets we had to develop or used a special onboard sensor system which were the follwings (Figure 28) [23]:

- ➔ Vaisala radiosonde (for air pressure, temperature and relatív humidity measuring). It was installed on the right hand side of fuselage of aircraft under the wing (in a white plastic box). This radiosonde was able to communicate with the surface station located in the meteorological office of Hungarian Meteorological Service in Szeged, Hungary. During the flight along the 3D flight path the radiosonde transmitted the measured meteorological data from the onboard of aircraft;
- ➔ Vaisala temperature and relative humidity sensors (slow, 1 Hz data stream). This unit was istalled on the left hand side of fuselage of aircraft in a white tube which could shadow them during the flight;
- ➔ Onboard air pressure, temperature and humidity sensor unit developed by our colleagues (fast 10 Hz data stream). It was located partly in the fuselage and its sensors were mounted on the surface of aircraft;
- ➔ Five-hole Pitot-tube system for the measuring the turbulence characteristics during the flight and it was specifically mounted on the nose of the aircraft (fast 10 Hz data stream).



Figure 28. The applied unmanned aircraft with its meteorological sensor units before take-off. The Vaisala radiosonde can be seen on the fuselage like a white box. The five-hole Pitot-tube can be seen on the nose of the aircraft. Source: photographed by Zénó András Gyöngyösi, 2012.

International PBL measurement campaign – A case study

During 24–30 of November 2013 there was an international PBL measurement campaign near the airport of Szeged, Hungary in order to try our meteorological UAS and to demonstrate its applicability for our colleagues. These experimental flights were based on our earlier mentioned project of TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2011-0001 „Critical Infrastructure Protection Research”.



Figure 29. Installation of the automatic weather station at the airport of Szeged (author can be seen in the center of photograph). Source: the picture made by Zénó András Gyöngyösi, 2013.

Before starting the experimental measurements – in order to appropriate verification of our experimental weather data derived from our meteorological UAS – we installed two automatic weather stations at the airport (Figure 29). After that we had determined the exact flight routes for our UAS with the special regards to application of onboard radiosonde and other weather sensor systems (Figure 30).

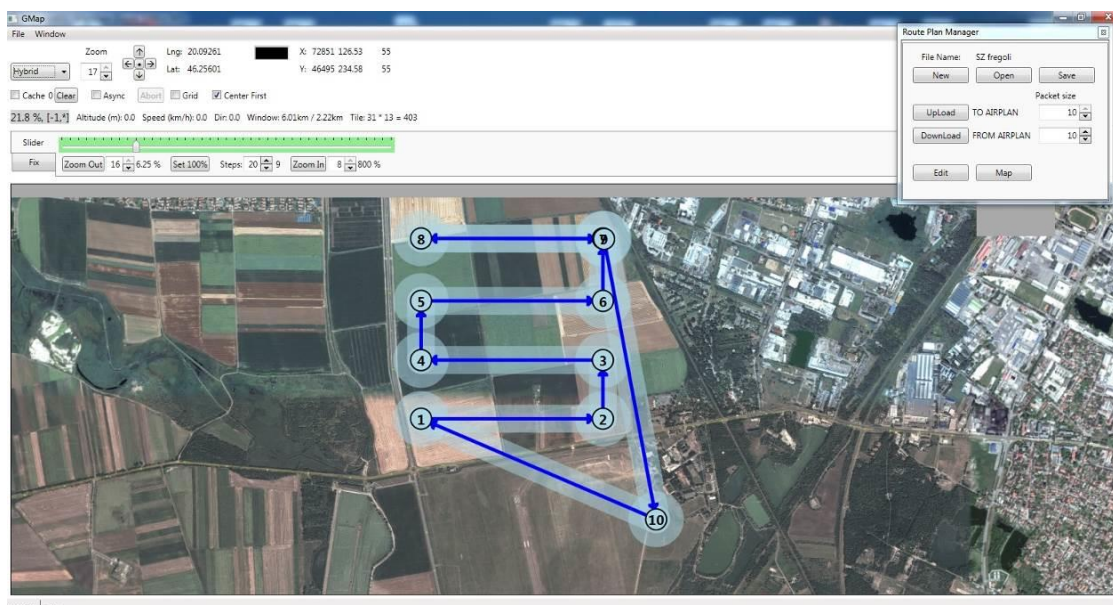


Figure 30. One of the planned flight routes of our experimental meteorological UAS during the measurement campaign near the airport of Szeged [24]

Between 27 and 29 of November 2013 there were six complete flight with our meteorological UAS. Except the first experimental flight the radiosonde unit (with the cooperation of

Hungarian Meteorological Service) was also mounted on the board of the aircraft. The most important characteristics of five complete experimental flights can be shown in Table 4.

No.	T/O time [day UTC]	Flt time [sec]	Hmax [m]	T range [°C]	Rh range [%]	p range [hPa]
1	27. 10 29:19	847	530	−3.4/2.5	66.8/88.1	955/1014
2	27. 12 49:37	674	483	−2.4/2.9	66.4/81.9	961/1015
3	27. 14 26:46	1444	1030	−5.9/5.9	62.4/93.9	901/1016
4	28. 06 04:28	2813	1979	−6.3/−0.2	63.3/91.9	806/1020
5	28. 09 34:41	3166	2178	−5.9/0.2	48.1/84.6	800/1021

Table 4. Main characteristics of UAS flights during the measurement campaign November 27–28 of November, 2013. T/O time: the take-off time in UTC, Flt time: the flight time seconds, Hmax: the maximum height above ground level, achieved during the flight, T range, Rh range, and p range: temperature, relative humidity, and pressure maxima and minima, respectively

Using the radiosonde unit on the board of an aircraft was not an unique idea as we seen earlier but there was a little problem with it. Generally the radiosonde after the bursting of its balloon – in a routine application – begins to descend and stops its measurements and data transmission immediately. It means in descending mode the radiosonde is not able to work and transmit its data to the receiving station. Certainly we had to solve this problem and we did it with the help of colleagues who worked at Hungarian Meteorological Service. After that the radiosonde unit can gather and transmit the meteorological data properly from the board of UAS during the both of ascending and descending part of the 3D flight path.

The first attempt to using a radiosonde unit like a meteorological measurement sensor on the board of an autonomous unmanned aircraft system happend on 27 of November 2013 in Hungary.

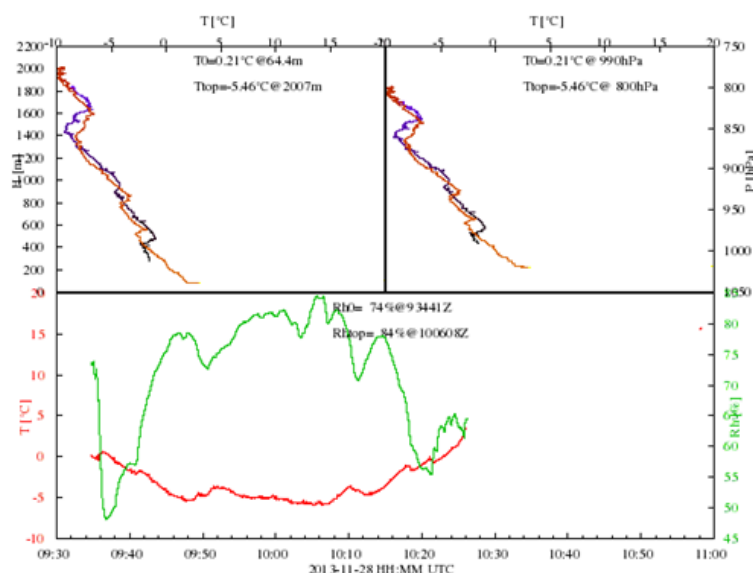


Figure 31. The derived weather data from the fast onboard sensors of the Hungarian meteorological UAS during the second flight on 28 of November 2013 in Szeged. Upper left: temperature as a function of altitude; Upper right: dew point temperature as a function of altitude; Bottom: Temperature (red line) and relative humidity (green line) variations during the experimental flight [25]

Near the mentioned radiosonde unit we also installed a slow and fast weather sensor system on the board of Hungarian unmanned aircraft. The measured data by them logged on the board and transmit to the surface station, too. A set of the gathered meteorological data during the second flight on 28 of November 2013 in Szeged can be shown in the Figure 31.

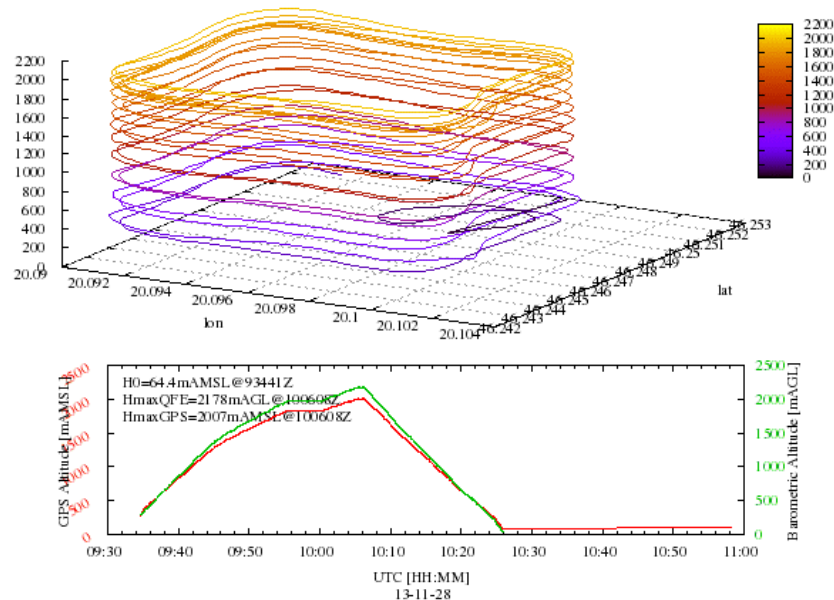


Figure 32. Representation of the whole 3D flight path during the second flight on 28 of November 2013 as a function of geographical locations (upper) and the variation of the altitude of UAS during the flight (bottom) [26]

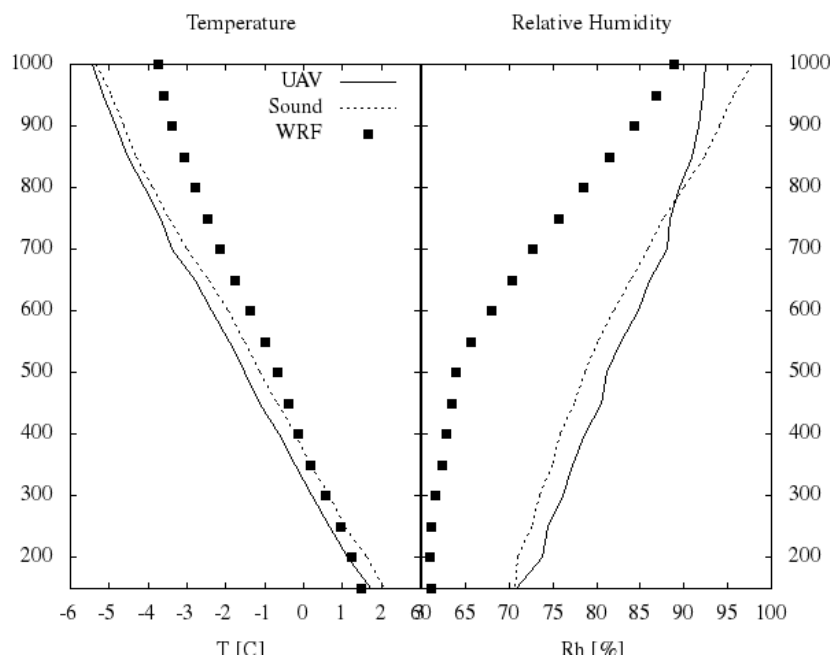


Figure 33. Comparison of temperature and relative humidity data derived from different sources during the fourth flight of Hungarian meteorological UAV on November 28, 2013. Measured data (UAV – solid line) is compared to measurements by operational Vaisala radiosonde device onboard of UAV (dotted line) and to the predicted data of the our numerical weather model (high resolution WRF domain – black squares) [23]

During our experimental flight we applied some standard flight geometries and manoeuvres are used the similar airborne weather measurements around the world. Among them we applied the descending and ascending flight modes to determine meteorological profiles of temperature,

and humidity. To derive the wind characteristics we used the special ascending and descending four-square flight routes as we can see in Figure 32. From the onboard flight data – with the help of the mentioned four-square flight path – we can derive the wind speed and direction at the given level of flight.

On the base of the qualitative comparison of Figure 33 we can see, that the temperature measurements were a little bit underestimated (negative bias), while humidity data provided by our unmanned aircraft were a little higher than the reference (radiosonde values), yielding an overestimation in the measurements. Comparing our measurements to modeled data shows that the high resolution numerical model (WRF) predicted more stability in the lower layer than the real temperature lapse rate, that might be a result of the under-prediction of layer clouds and humidity (and of radiative cooling near surface) compared to realistic conditions in the lower layers. This sort of under-prediction in terms of humidity is clearly visible on the right panel as well, where the modeled relative humidity curve differs significantly from both measurements, especially in the lower 800 m layer (Figure 33) [23].

CONCLUSIONS

Gathering appropriate high-resolution meteorological data from PBL is a very important task in order to making our forecasts more better. Beyond applying radiosondes and AMDAR data the best way to do it using small unmanned aircraft systems which are mounted some special meteorological sensors.

In our work we showed the most important developments regarding to international and Hungarian usage of unmanned meteorological aircrafts. We presented the detailed applications of Global Hawk, Aerosonde, Small Unmanned Meteorological Observer (SUMO) and Meteorological Mini Unmanned Aerial Vehicle (M2AV) in the case of weather monitoring. Finally, we also demonstrate the first Hungarian meteorological UAS which was specially equipped for the purpose of boundary layer measurements, It has been developed and successfully used during the mentioned measurement project. Of course we showed the results of the Hungarian UAS were measured during the international PBL campaign, too.

The work was created in commission of the National University of Public Service under the priority project KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 titled „Public Service Development Establishing Good Governance” in the Miklós Zrínyi Habilitation Program.

REFERENCES

- [1] Passner, J.E., Dumais, R.E., Flanigan, Jr. R. and Kirby, S., 2009: Using the Advanced Research Version of the Weather Research and Forecast Model in Support of ScanEagle Unmanned Aircraft System Test Flights. No. ARL-TR-4746, Computational and Information Sciences Directorate, ARL, 49 p.
- [2] Marius, O.J., Ólafsson, H., Ágústsson, H., Rögnvaldsson, Ó., and Reuder, J., 2012: Improving High-Resolution Numerical Weather Simulations by Assimilating Data from an Unmanned Aerial System. *Month. Weather Rev.* 140, 3734–3756.
- [3] Stenmark, A., Hole, L.R., Voss, P., Reuder, J. and Jonassen, M.O., 2014: The Influence of Nunataks on Atmospheric Boundary Layer Convection During Summer in Dronning Maud Land, Ant-arctica." *J. Geophys. Res. Atmospheres* 119 (11) 6537–6548.
- [4] https://www.meted.ucar.edu/avn_int/amdar/media/graphics/raobs_dots_topo.jpg
- [5] Tuba Zoltán, Kardos Péter, Szabó Péter: AMDAR adatok lehetséges felhasználása a repülésmeteorológiai előrejelzésben. *Repüléstudományi Közlemények, Szolnok*, 2016/2, pp. 165–178. (in Hungarian)
- [6] https://www.meted.ucar.edu/avn_int/amdar/media/graphics/global_amdar.jpg
- [7] http://www.wmo.int/pages/prog/www/GOS/ABO/AMDAR/AMDAR_System.html
- [8] <http://www.neweagle.net/support/wiki/images/6/6c/UAV.JPG>
- [9] Lin, P-H and Lee, C-S. (2008): The Eyewall-Penetration Reconnaissance Observation of Typhoon Longwang (2005) with Unmanned Aerial Vehicle, Aerosonde. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Vol. 25., pp. 15-25.
- [10] <http://www.nasa.gov>
- [11] Kroonenberg, A., V., D., Martin, T., Buschmann, M., Bange, J. and Vörsmann, P. (2008): Measuring the Wind Vector Using the Autonomous Mini Aerial Vehicle M2AV. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Vol. 25., pp. 1969-1982.
- [12] <http://www.nasa.gov/content/goddard/team-loads-dropsondes-on-hs3-mission-global-hawk/#.Uu9v4v15Nu4>
- [13] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/2/28/Aerosonde.jpg/300px-Aerosonde.jpg>
- [14] http://media.defenceindustrydaily.com/images/AIR_UAV_Aerosonde_Trans-Atlantic_1998_lg.jpg
- [15] http://icestories.exploratorium.edu/dispatches/wp-content/uploads/2009/09/photo_13.thumbnail.jpg
- [16] J. A. Curry, J. Maslanik, G. Holland, and J. Pinto (2004): Applications of Aerosondes in the Arctic. *Bulletin of American Meteorological Society*. 2004. DOI: 10.1175/BAMS-85-12-1855.
- [17] J. Cassano and S. Knuth (2011): Unmanned Aerial Vehicle Flights over Terra Nova Bay, Antarctica During September 2011. https://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&cad=rja&ved=0CEIQFjAC&url=http%3A%2F%2Fpolarpower.org%2FPTC%2F2011_pdf%2FPTC_2011_Knuth.pdf&ei=VgIKU5nMIuu7ygPGl4GgCA&usq=AFQjCNFydKCWLD8I8ncltnxCihKy8FGAig&sig2=Um3qYzEGaTI2eEcd4YeUjA
- [18] S. L. Knuth, J. J. Cassano, J. A. Maslanik, P. D. Herrmann, P. A. Kernebone, R. I. Crocker and N. J. Logan. 2013: Unmanned aircraft system measurements of the atmospheric boundary layer over Terra Nova Bay, Antarctica. *Earth System Science Data*, Vol. 5. pp. 57-69.
- [19] S. Mayer, A. Sandvik, M., O. Jonassen, J. Reuder: Atmospheric profiling with the UAS SUMO (2012): A new perspective for the evaluation of fine-scale atmospheric models. *Meteorol Atmos Phys* (2012) 116:15–26. DOI 10.1007/s00703-010-0063-2.
- [20] T. Spiess, J. Bange, M. Buschmann and P. Vörsmann (2007): First application of the mete-orological Mini-UAV 'M2AV'. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 16, No. 2, 159-169 (April 2007).
- [21] Bottyán Zsolt, 2008: Kísérlet egy repülőgép-katasztrófa meteorológiai viszonyainak rekonstrukciójára - a Malév HA-MOH repülőgépének balesete. *Repüléstudományi Közlemények*. Vol. 30., No. 3. p 12. (in Hungarian)
- [22] Kazi Károly, 2012.: magyar fejlesztésű, teljesen automatizált UAV rendszer. *Repüléstudományi Közlemények*. Vol. 30., No. 3. p 12. (in Hungarian) Vol. 34. No. 2. pp. 999-1013. (in Hungarian)
- [23] Zsolt Bottyán, András Zénó Gyöngyösi, Ferenc Wantuch, Zoltán Tuba, Rita Kurunczi, Péter Kardos, Zoltán Istenes, Tamás Weidinger, Katalin Hadobács, Zoltán Szabó, Márton Balczó, Árpád Varga, Andrea Bíróné Kircsi, and Gyula Horváth. 2015: Measuring and modeling of hazardous weather phenomena to aviation using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS). *Időjárás*. Vol. 119. No. 3. pp. 307-335.
- [24] http://turbulencia.uib.es/szeged13/UAV/Flight_patterns/fregoli.jpg
- [25] http://meteor24.szrf.hu/~zeno/test_flights/20131128/flt_2/
- [26] http://meteor24.szrf.hu/~zeno/test_flights/20131128/flt_2/

**A PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLŐGÉPEK METEOROLÓGIAI CÉLRA TÖRTÉNŐ NEMZETKÖZI ÉS
HAZAI ALKALMAZÁSAI**

A pilóta nélküli repülőgépek meteorológiai alkalmazására vonatkozó igény az elmúlt 25 évben jelentősen megnőtt. Munkánkban áttekintjük a UAS eszközök elmúlt időszakban történt fontosabb nemzetközi és hazai meteorológiai alkalmazásait. Részletesen kitérünk a Global Hawk, az Aerosonde, a Small Unmanned Meteorological Observer (SUMO) és a Meteorological Mini Unmanned Aerial Vehicle (M²AV) alkalmazások ismertetésére. A hazai kísérleti fejlesztések áttekintése során pedig az eddigi első hazai meteorológiai célú kísérleti UAS alkalmazásról adunk képet, melynek során az elért eredményeket is láttatjuk.

Kulcsszavak: pilóta nélküli repülőgép, repülésmeteorológia, előrejelzés, meteorológiai szenzorok, rádiószonda.

Bottyán Zsolt (PhD)
tanszékvezető, egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774

Bottyán Zsolt (PhD)
Head of department, associate professor
National University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Institute of Military Aviation
Department of Aerospace Controller and Pilot Training
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774



AZ UAS ESZKÖZÖK IDŐJÁRÁS MEGFIGYELÉSRE TÖRTÉNŐ ALKALMAZÁSÁNAK FONTOSSÁGA ÉS HAZAI LEHETŐSÉGEI

A mai modern numerikus előrejelzésben alkalmazott adatasszimiláció eredménye annak módszerétől, a felhasznált 3D-s megfigyelési adatok mennyiségétől, minőségétől és eloszlásától nagyban függ. Munkánkban röviden bemutatjuk az alkalmazott adatasszimilációs technikákat és rámutatunk a megfigyelések szerepére és annak hiányosságaira. Megmutatjuk, hogy a megfelelő szenzorokkal felszerelt UAS eszközök alkalmazásával javítható a numerikus modellek pontossága és egyben nyomon követhető a modellek valós idejű hibája, valamint lehetőség nyílik a határretegben repülésre veszélyes folyamatok időben történő detektálására is. Ezekkel az eszközökkel légi időjárás-felderítés is végezhető, mely fontos információt nyújt a repülésmeteorológusok számára és ezzel a repülésbiztonság növelését szolgálja. Munkánkban ezeken túlmenően bemutatjuk az UAS eszközök lehetséges hazai meteorológiai alkalmazását a valós idejű adatasszimiláció, a légköri tomográfia és a GNSS passzív radar alkalmazásokon keresztül.

Kulcsszavak: repülésbiztonság, adatasszimiláció, időjárás-felderítés, légköri tomográfia, GNSS alkalmazás, UAS eszköz

A 3D-S METEOROLÓGIAI ADATGYŰJTÉS PROBLÉMÁJÁNAK MEGKERÜLHETETLENSÉGE

Napjainkban az egyre nagyobb felbontású numerikus időjárás-előrejelzés egy rendkívül komoly problémával szembesül, melynek megoldása az említett prognózisok további pontosításának kulcskérdése is egyben: hogyan tudunk térben és időben pontos, elegendő mennyiségű 3D-s mérésen és/vagy megfigyelésen alapuló meteorológiai információhoz jutni a prognosztikai tartományban? Az alábbiakban vázoljuk azt a két lényeges területet, melyek esetében nélkülözhetetlen lesz ezeknek az adatoknak a felhasználása, a numerikus előrejelzések pontosítása és alkalmazása során. Munkánk során bemutatjuk, hogy a kérdéses adatgyűjtés megvalósításának talán legkézenfekvőbb módja, meteorológiai szenzorokkal felszerelt pilóta nélküli légi járművek (Unmanned Aircraft System, UAS) alkalmazása lenne.

Tekintve, hogy az általunk vizsgált előrejelzések a repülések támogatásához szükséges meteorológiai információ előállítását végzik, így értelem szerint, 3D-s prognosztikai tartományt feltételezünk a továbbiakban. Ez esszenciálisan fontos kitétel számunkra, hiszen ebben az esetben az analízishez szükséges, elegendő felbontású és minőségű mért, és/vagy észlelt meteorológiai információ is ténylegesen valós, térbeli (3D-s) eloszlású kell legyen.

Az időjárás előrejelzése az atmoszférának nevezett összetett, kaotikus viselkedést mutató rendszer térben és időben (4D-ban) történő fejlődésének – adott pontossággal – történő meghatározását jelenti. Akármilyen módszerrel is történjen ez a predikció, a kiindulási időpontban a prognosztikai tartomány fizikai állapotának minél pontosabb, részletesebb leírása (analízis), mint kezdeti feltétel, elengedhetetlenül szükséges ahhoz, hogy az előrejelzés megbízható legyen. Ugyanakkor, pontosan a légkör kaotikus viselkedéséből adódóan ez önmagában csak szükséges, de nem elegendő a megfelelő pontosságú prognózis elkészítéséhez.

Az említett kezdeti feltételmezőt a számszerű előrejelzések során, a rendelkezésre álló meteorológiai mérések és észlelések, valamint egy ún. háttérmező (ami gyakran egy rövid távú numerikus előrejelzés) kombinációjával állítják elő. A cél, hogy az így előállított analízis a lehető legpontosabban írja le a kiindulási időpontban a légkör állapotát [1]. Az eljárást adatasszimilációnak nevezzük. A mai korszerű számszerű előrejelzések elképzelhetetlenek valamilyen típusú adatasszimilációs technika alkalmazása nélkül, de bármilyen módszerrel is dolgozzanak, kiemelkedően fontos, hogy van-e elegendő mennyiségű és minőségű 3D-s mérési adat, amit felhasználhatnak a modell inicializációja során?

A jelenlegi meteorológiai mérőhálózatnak több problémáját korábbi munkánkban már érintettük, így itt csak röviden utalunk rá [2]. Alapvető gond, hogy a felszín feletti régiókból jóval kevesebb mennyiségű adat áll rendelkezésre, mint a felszíni megfigyelésekből és ezeknek a térbeli és időbeli eloszlása is kedvezőtlen. Utaltunk korábban a rádiószondás és AMDAR mérések hasonló hiányosságaira, de a távérzékelési módszereken alapuló mérések korlátai sem teszik lehetővé a fenti kérdés kielégítő megoldását.

Leginkább a nagy térbeli és időbeli felbontású (High Resolution, HR) numerikus modellek alkalmazása során kerültünk szembe a megbízható 3D-s adatok hiányával, hiszen itt olyan légköri mozgásrendszerek előrejelzése került előtérbe, melyek már alapvetően a mezoskálán jelennek meg, így karakterisztikusan időben órák, térben pedig 10 km-es nagyságrendben tűnnek elő. Ebből az következik, hogy a makroskálájú jelenségekkel szemben itt már lényegileg lokálisan előforduló, és időben gyorsan változó jelenségekkel van dolgunk. Csakhogy ezeknek a mozgásjelenségeknek a prognózisa nagyon finom felbontású, 3D-s analízist követel meg, melyhez igen gyakran nem áll rendelkezésre elegendő mért/észlelt adat.

Másrészről, amikor a repülésmeteorológus számára egy numerikus előrejelzés rendelkezésre áll, fontos tudnia, hogy mennyire tekinthető megbízhatónak a szóban forgó predikció az adott prognosztikai tartományban. Közismert, hogy minden előrejelzés hibával terhelt, de hogy konkrétan mennyire tér el a valós és az előrejelzett időjárás egymástól, azaz mennyiben lehet támaszkodni az előrejelzési produktumra a repüléstámogatás során, gyakran csak később válik nyilvánvalóvá, amikor a következő időszak mérési adataihoz hozzájut a felhasználó. Mivel azonban ezek az adatok is nagyrészt felszíni mérésekből és észlelésekből, valamint távérzékelési információkból állnak, a légkör valós 3D-s állapotáról keveset árulnak el, így a numerikus modell megbízhatóságáról csak korlátozott információ szerezhető és az is csak később.

Harmadrészt, az adott számszerű előrejelzés esetében mindig léteznek olyan korlátok, melyek megszabják, hogy egyáltalán milyen időbeli és térbeli tartományon képesek jelenségeket előrejelezni. A légkörben azonban mindig a teljes méret-, és időskálán zajlanak a folyamatok, ezért vannak olyanok, amelyek nem is jelezhetők előre az adott modellkeretek között (pl. szubgrid jelenségek), de mégis potenciálisan veszélyt jelenthetnek a repülés számára (pl. turbulencia). Ezeknek a jelenségeknek a felderítése is rendkívül fontos, hiszen a repülésbiztonság igen fontos szegmensét jelentik.

Véleményünk szerint a fentebb vázolt problémáknak az optimális megoldása, meteorológiai szenzorokkal felszerelt UAS eszközök speciális módszertan alapján történő alkalmazása lenne, melyek lényegesen javíthatnák a HR prognózisok pontosságát és információt szolgáltatnának

azok megbízhatóságáról, egyaránt. Munkánkban ezért az adatasszimiláció rövid tárgyalása után, ezeknek az eszközöknek a hazai meteorológiai alkalmazási lehetőségeit tekintjük át.

AZ ADATASSZIMILÁCIÓ ÉS A METEOROLÓGIAI MEGFIGYELÉSEK VISZONYÁRÓL

Az általános adatasszimilációs probléma

A numerikus időjárás-előrejelzés előző fejezetben meghatározott feladata megköveteli, hogy a légköri hidro-termodinamikai egyenletrendszer (HTER) megoldásán keresztül jussunk el az atmoszféra adott tartományának elegendő pontosságú becsléséhez. A folyamat során alapvető fontosságú, hogy rendelkezünk a prognosztikai tartományra vonatkozó kezdeti- és peremfeltételekkel, amelyek lehetővé teszik a HTER numerikus megoldását. A kezdeti feltételeket a prognosztikai tartományra vonatkozó kiindulási mező (analízis) foglalja magában, melynek előállításakor arra kell törekednünk, hogy az minél pontosabban leírja a tényleges légköri állapotot, de legalábbis a lehetőségekhez képest az összes meglévő információt tartalmazza. Értelem szerint, az analízisben szereplő meteorológiai információ jelentős része mérési, észlelési és távérzékelési *tényleges adatok* formájában jelenik meg, melyeket *megfigyeléseknek* nevezzük a továbbiakban.

A megfigyelések azonban térben és időben gyakran nagyon egyenlőtlen eloszlásban állnak rendelkezésre továbbá, a numerikus előrejelzés rácspontjaira sem illeszkednek. Mindez azt jelenti, hogy a kiindulási mező előállításához valamilyen módon az előbbi két lényeges problémát meg kell oldani úgy, hogy az így generált mező a lehető legpontosabb legyen. A megfigyelések nem egyenletes eloszlásából a prognosztikai tartományra vonatkozó adathiány orvoslására ún. *háttérmezőt* (background) szoktak figyelembe venni, ami lényegében egy rövidtávú numerikus előrejelzés, az adott prognosztikai tartományra. Feltéve, hogy ez az előrejelzés elegendően pontos, ahol szükséges, megfelelően kiegészíti a megfigyelések egyenlőtlenségéből adódó adathiányt.

Az fent említett eljárással előállított kiindulási mezőt *objektív analízisnek* nevezzük és automatikusan kerül kialakításra, különféle technikai megoldások alkalmazásával. Ezeket az objektív analízist szolgáltató módszereket nevezzük összefoglaló néven *adatasszimilációs technikáknak*. A modern numerikus prognosztikában számos adatasszimilációs eljárás létezik, melyeket itt nincs módunkban tárgyalni, csupán a – manapság gyakran alkalmazott – *variáción alapuló* és a *nudging* elvű adatasszimilációt vesszük szemügyre abból a célból, hogyan jelenik meg ebben a folyamatban a megfigyelések szerepe és fontossága.

A variáción alapuló adatasszimilációról

A variációs adatasszimiláció rövid áttekintése két korábbi munkán alapszik [1][3]. Az adatasszimiláció feladata annak az objektív analízisnek (x_a) az előállítása, amelynek a lehetőségekhez képest a legjobban kell becsülnie a tényleges meteorológiai mezőt (x_t), a rendelkezésre álló megfigyelések (y) valamint a háttérmező (x_b) segítségével. Legyen N a modell rácsponatok száma megszorozva a becsülni kívánt változók számával és P pedig az összes megfigyelések száma. Ebben az esetben a feladat nem más, mint az alábbi veszteségfüggvényt (J) minimalizálni:

$$J(x) = \frac{1}{2}(x - x_b)^T B^{-1}(x - x_b) + \frac{1}{2}(y - H(x))^T R^{-1}(y - H(x)) + J_c(x) \quad (1)$$

A fenti egyenletben x az ún. kontroll változó, a B ($N \times N$ -es) és az R ($P \times P$ -s) kovariancia mátrixok, melyek a háttérmezőhöz illetve a megfigyelésekhez tartoznak és becsléseken alapulnak. A kovariancia mátrixok előállítására igen fontos mozzanata az adatasszimilációs folyamatnak, de a mostani munkánkban erre a területre nem térünk ki. A H a jelen esetben nemlineáris megfigyelési operátor. A $J_c(x)$ az ún. dinamikai és fizikai kényszereket leíró tag a kontroll változóra vonatkozóan. Lényegében az (1) egyenletben a háttér tag a kontroll változó és a háttér mező eltérését adja, amit természetesen súlyozunk a háttér mező jóságát reprezentáló B^{-1} mátrixszal. A megfigyelési tag analóg módon a kontroll változó és a megfigyelések eltérését mutatja, amit jelen esetben a megfigyelések jóságával (R^{-1}) fogunk súlyozni. Ezek alapján tehát végül is arról van szó, hogy a $J(x)$ függvény minimalizációja nem más, mint az analízisnek (x_a) a háttér mezőtől és a megfigyelések mezejétől vett eltérésének a minimumának az előállítása. A minimum számításáról most itt csak annyit szeretnénk megemlíteni, hogy alapvetően magának a $J(x)$ függvénynek és annak gradiensének ($grad J(x)$) a figyelembevételével történik.

A nudging-ról

A variációs adatasszimilációtól eltérően a nudging technika azon alapszik, hogy egy ún. *relaxációs tag* segítségével a numerikus modellt a megfigyelésekhez közelítjük [4]. A relaxációs tag az alábbi formulával adható meg:

$$\frac{dx}{dt} = M(x, t) + G(x) \sum_{i=1}^P w_i (y_i - H(x)_i) \quad (2)$$

Az összefüggésben az x a becslendő meteorológiai paramétert, $M(x, t)$ a numerikus modell x -re vonatkozó prediktuma, a $G(x)$ a nudging együtthatót a w_i pedig az i -edik megfigyelés súlytényezőjét azonosítja. A $H(x)$ itt is a megfigyelési operátor, amely ez esetben is lehet nemlineáris. Ahogy a (2) egyenletből látható, a $G(x)$ nudging együttható akár meteorológiai paraméterként is különböző lehet és tapasztalati úton adható meg. A w_i súlytényezők kialakítása esetén a becsült modell- és megfigyelési hibák, a megfigyelés és a rácspont távolsága és az analízis, valamint a megfigyelés időpontja közötti idő az alapvető figyelembe veendő információ. Nagy előnye – és ezért is alkalmazzák igen gyakran – hogy a megfigyeléseket akkor lehet figyelembe venni az adatasszimilációs ciklusban, amikor azok megjelennek, lévén a nudging módszer folytonos módszer. Ugyanakkor pl. a 4-DVAR módszerrel összevetve, az objektív analízismező és a modell konzisztenciája nem mindig kielégítő. Ezzel együtt mivel számításigénye kisebb a fenti adatasszimilációs technikánál, közkedvelt eljárásnak számít.

A megfigyelések szerepe az analízismező pontosításában

Az előzőekben tárgyalt adatasszimilációs technikák esetében is rendkívül fontos tehát, hogy az objektív analízismező előállításakor rendelkezünk elegendő mennyiségű és pontosságú meteorológiai megfigyelésekkel. A cél – ahogy már korábban utaltunk rá – az, hogy az analízismező minél inkább megközelítse a megfigyelésmező és a kiegészítő háttérmező kombinációját.

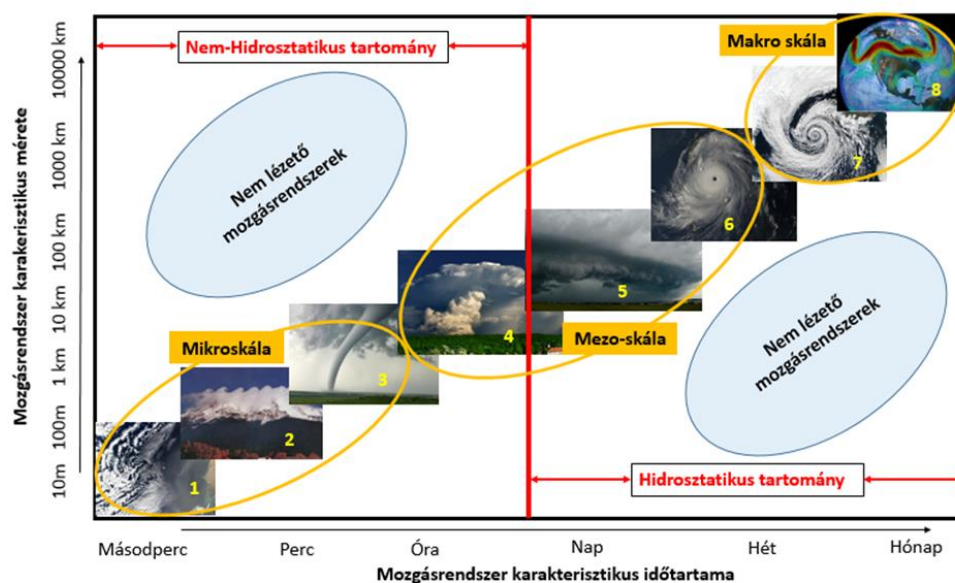
Nyilvánvaló, hogy amennyiben a megfigyelések térbeli és időbeli eloszlása nem kielégítő, problémás lesz az analízismező pontossága is, hiszen ebben az esetben „hézagok” fordulnak elő a megfigyelések terében. Ha nem alkalmaznánk a háttérmezőt (ami, ne felejtjük el maga is legtöbbször egy numerikus prognózis), akkor ezeknek a „hézagoknak” konzisztens adattal történő kitöltése lehetetlen lenne. Ugyanakkor, azzal is tisztában kell lennünk, hogy a háttérmező

alkalmazásával bizonytalanságot is viszünk a rendszerbe, hiszen az alkalmazott adatok (mivel maguk is előrejelzésből származnak) eredendően prognosztikai hibával terheltek. Különösen igaz ez a prognosztikai tartomány alacsonyabb szintjein, pl. a planetáris határrétegben (PHR) (hozzávetőlegesen a felszíntől számított 500–1500 méteres szint), ahol a numerikus produktumok gyakran alá- vagy felülbecsülik a meteorológiai paraméterek értékeit. Az ebben a régióban kialakuló meteorológiai folyamatok modellezése repülésmeteorológiai szempontból is kiemelkedően fontos, hiszen a repülések leginkább veszélyes fázisai itt zajlanak le (pl. a le- és felszállás művelete), így a meteorológiai támogatásnak előtérbe kell helyezni a planetáris határréteg – a lehetőségekhez mérten – pontos előrejelzését.

A MEZOSKÁLÁJÚ FOLYAMATOK NUMERIKUS ELŐREJELZÉSÉNEK TOVÁBBI ASPEKTUSAI

A rácsfelbontás kérdése

A repülésre leginkább veszélyes meteorológiai folyamatok – mint korábbi munkánkban már említettük – a mezoskálán jelennek meg, melyeknek számszerű előrejelzése a *nowcasting* folyamat alapvető eleme (1. ábra) [5].

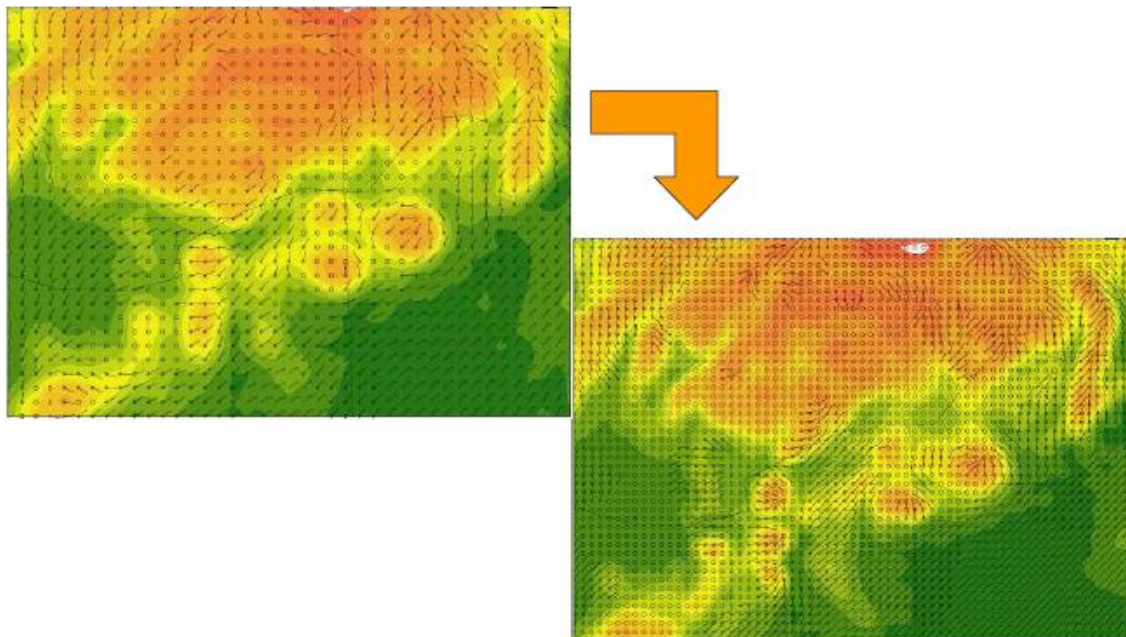


1. ábra Légkörünk alapvető mozgásrendszereinek elhelyezkedése az időtartam és élettartam koordináta rendszerben [5]

Nyilvánvaló tehát, hogy a mezo-léptékű modelleknek ezeket a jelenségeket nyomon kell követniük a kialakulásuktól a felbomlásukig, vagyis egy nagyon komoly térbeli és időbeli *felbontási kritériumnak* kell megfelelniük.

Ha pl. egy zivatar prognózisát szeretnénk elvárni egy numerikus modelltől, akkor a rácsszerkezet kialakításakor figyelembe kell vennünk magának a zivatarnak a karakterisztikus méretét is, hiszen, ha túl nagy a horizontális rácstávolság, akkor igen gyakran előfordul, hogy a diszkrét pontokon megjelenő prognosztikai változók értékei nem jeleznek a rácsok között kialakult zivatarral utaló értékeket, így az nem jelenik meg a modell outputban. Első közelítésben az mondhatjuk, hogy amennyiben egy mozgásjelenség (amit előre kívánunk jelezni) karakterisztikus

horizontális mérete L , akkor $L/10$ az a minimális vízszintes rácsávolság, amivel dolgozhatunk. Ez azt is jelenti, hogy a szóban forgó zivatar esetén, ha $L=30$ km, akkor a horizontális rácsfelbontásnak 3 km-nél nem szabad nagyobblnak lennie [6].



2. ábra Az OMSZ ALADIN rövidtávú numerikus modellje (balra fent), mint oldalsó peremfeltétel az AROME modell (jobbra lent) számára. Jól látható a szélmező sokkal finomabb felbontása az AROME modell esetén, ami a lényegesen kisebb rácsméretnek köszönhető [7]

A mezo-léptékű folyamatok leírásához szükséges sűrűbb rács (általában 2–5 km-es horizontális rácsfelbontás) és a *nem-hidrosztatikus* HTER miatt a modell-egyenletek integrálása további jelentős számítási igény-növekedéssel jár. Ezért a mezo-skálájú modelleket egy adott kisebb térbeli tartományra vonatkozóan futtatják, azaz *korlátos tartományú modellek*, melyek a futtatáshoz szükséges oldalsó peremfeltételeket egy másik – az említett területet is magában foglaló - előrejelzési tartományú modell futtatásának eredményeiből nyerik.

Parametrizáció és adatasszimiláció problémái mezo-skálán

Külön említést kell tennünk a mezo-léptékű modellek *parametrizációs problémáiról*. Ezt a kérdéskört csak érintőlegesen tárgyaljuk, mert e cikk keretei nem teszik lehetővé a mélyebb elemzést. A kérdéskört egy korábban megjelent munkánk alapján mutatjuk be [8].

A HTER-ben szerepelnek olyan mennyiségek is, melyek változásait, illetve a légkörben felvett értékeit a felszín és a légkör kölcsönhatásai (kényszerek) határozzák meg (hőáram, nedvességáram). Ezek a kölcsönhatások azonban az ún. turbulens diffúzió folyamatán keresztül hatnak, melynek nagyságrendi skálája a mikrotartományba esik. Tekintve, hogy a folyamat sok szempontból nem ismert pontosan, így a HTER megoldásakor csak ún. *paraméterezési eljárással* vehető figyelembe. Ennek lényege, hogy „az explicite nem kezelhető, az adott ráccsal már nem felbontható, ún. *sub-grid* folyamatoknak a vizsgált skálára kifejtett hatását a modell paramétereinek a függvényében statisztikailag vesszük figyelembe” [6]. A paraméterezésnél az adott hatás statisztikai átlagértékeit alkalmazzuk, vagy az adott hatás folyamatának erősen leegyszerűsített, empirikusan formulázott változatával dolgozunk [9]. Meg kell említeni, hogy még a felhőfizikai folyamatokat és a sugárzás elnyelődés folyamatát is csak a parametrizációval tudunk figyelembe venni a HTER megoldásánál.

Két területet külön ki kell emelnünk, nevezetesen a *konvekció* és a *nedvesség* illesztését a modellekbe. A két meteorológiai tényező összekapcsolódik egymással és együtt felelősek a konvektív felhőrendszerek és a hozzájuk tartozó – sokszor a repülésre rendkívül veszélyes – jelenségek kialakulásáért. A konvekció parametrizációjában nagy nehézséget okoz a függőleges légáramlás nagyságának meghatározása, hiszen a felemelkedő légréteg sebességét sok tényező befolyásolja: a talaj minősége, a növényzet, a domborzat, az adott légtest stabilitási viszonya, a nedvességtartalom stb. Ugyanakkor, a nedvességtartalom vertikális eloszlásának viszonylag pontos ismerete nélkül az előbbi paraméter nem is határozható pontosan meg! Ezzel el is érkeztünk a mezo-skálájú modellezés egyik legnagyobb kihívásához, mely a nedvességtartalom 3D-s eloszlásának a becslését jelenti. Tekintve, hogy a légköri nedvesség eloszlása térben és időben egyaránt nagyon szélsőséges értékek között mozoghat, a mezo-skálájú modellek „elszállásának” gyakori forrása az elégtelen térbeli nedvességi és hőmérsékleti előrejelzés.

Az adatasszimiláció tárgyalásakor már előtérbe került, hogy az objektív analízismező előállításához mind prognosztikai, mind pedig megfigyelési információkat is felhasználunk. A megfigyelések egyre nagyobb térbeli és időbeli felbontására vonatkozó igény a mezo-skálán már létfontosságú, hiszen a cél már olyan karakterisztikus méretű jelenségek előrejelzése, amelyek 10–50 km-es tartományban fordulnak elő. Éppen ezért egyrészt a távérzékelési eljárások kiterjesztése (nem-lineáris megfigyelési operátorok (*H*) kifejlesztése) valamint az egyéb 3D-s adatforrások alkalmazása egyaránt fontos momentum. Ugyanakkor a nagy mennyiségű és felbontású mérések megkövetelik a folytonos 4D-s adatasszimilációs technikák alkalmazását is. Másrésztől, további vizsgálatok szükségesek ahhoz, hogy az alábbi fontos kérdésekre választ kapjunk:

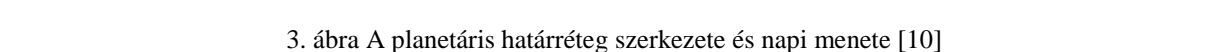
- ➔ felhasználjuk-e a meghajtó modell analízisét a korlátos tartományú modell analízisének előállításakor?
- ➔ és milyen peremfeltételeket használunk a háttérmező előállításakor?

A planetáris határréteg kérdése

A mezo-léptékű időjárási rendszerek előrejelzése a korábban leírtak alapján rendkívüli fontosságú kérdés. Ugyanakkor az is nyilvánvaló, hogy a számszerű előrejelzések megbízhatósága nem kizárólagosan informatikai probléma, hanem megfelelő pontosságú, nagy térbeli és időbeli felbontású meteorológiai adatok asszimilációja szükséges hozzá. Ráadásul a modellekbe történő adatasszimilációhoz szükséges meteorológiai adatok jelentős része a planetáris határrétegből (PHR) és a közvetlen felette elhelyezkedő légrétegből szükségesek leginkább, hiszen a határréteg-szerkezet napi és évszakos változásainak megfelelő pontosságú numerikus prognosztikai becslése alapvető szempont a rövidtávú előrejelzésben. A planetáris határréteg az az alsó troposzférikus réteg, amely leginkább az 100–1500 m magasságig terjed, de évszakos és napi menete ennek a magasságnak egyaránt létezik (3. ábra) [10].

Ebben a rétegben a felszín, mint termikus és mechanikus kényszer fejt ki hatását és folyamatai eltérő tér- és időskálán alakítják az ún. szabad légkör áramlási rendszerét. A planetáris határréteg két fő részre bontható:

- ➔ a felszín-közeli vagy állandó fluxusú rétegre, ahol eltekintünk a turbulens áramok (vagy fluxusok) magasság szerinti változásától. Ebben a zónában a szélesség magasság szerinti megváltozása logaritmikus függvénnyel közelíthető.



alsóbb rétegének (különös tekintettel a planetáris határréteg) vertikális állapotának ismerete alapvető fontosságú a nyári (konvektív) és a téli (stabilis) időjárási szituációkban, egyaránt.

A szóban forgó pilóta nélküli repülő eszközöknek a fedélzetükön – hasonlóan a korábban alkalmazott esetekben – rendelkezniük kell legalább *hőmérséklet, statikus légnyomás és légnedvesség* mérésére alkalmas szenzorokkal. Ezeknek az érzékelőknek célszerűen *gyors méréseket* kell tudniuk végrehajtani, hiszen a repülő eszközök horizontális és vertikális sebességéből adódóan, hirtelen változtathatják meg a pozíciójukat. Ezért is szükséges, hogy az érzékelő berendezések képesek legyenek legalább 10 Hz-es frekvenciával elvégezni az adott mérési folyamatot! A fedélzeten rendelkezésre álló további berendezések (GPS pozíció, IAS esetleg GS) adataiból meghatározott algoritmusok segítségével számíthatók az adott helyen a *3D-s szélvektorok*. Természetesen van lehetőség közvetlenül is a szél menet közben történő mérésére, de ehhez speciális 3D-s szélmérő berendezést (pl. szónikus anemométer) vagy több lyukú Pitot-csővet szükséges még a fedélzetre installálni. Ez utóbbi esetében a repülés közben fellépő *turbulencia* mérésére is lehetőség adódik. Véleményünk szerint azonban egy meteorológiai célú UAS eszköz fedélzetén a korábban említett szenzorcsoporthoz működésével és a legegyszerűbb szélvektor meghatározás alkalmazásával már elegendő információt kapunk a légkör pillanatnyi állapotáról és egy kisebb méretű repülő eszköz terhelése is határok között tartható.

Felmerül a kérdés, hogy mekkora az a mérési pontosság, ami elegendőnek bizonyulhat az említett paraméterek mérése esetén? A hőmérséklet esetében 0,2–0,3 °C-os érték megfelelő, jóllehet a földi eszközök esetében ez az érték 0,1 °C. A statikus nyomás mérésekor törekedni kell a 0,2–0,3 hPa pontosságra, szemben a felszíni légnyomás mérések esetén alkalmazott 0,1 hPa-lal. A relatív nedvesség esetében 5–6%-os mérési pontossággal célszerű számolnunk. A szélvektorok irányának meghatározásakor 20–30 fokos, míg nagyságának (sebességének) becslésekor 1 m/s-os pontosságot kell minimálisan elvárni a rendszertől [11].

Nyilvánvaló, hogy csak akkor lehet ezeket a repülő eszközöket hatékonyan alkalmazni, ha a meteorológiai támogatásért felelős személy döntheti el a repülések időpontját, időtartamát és útvonalát. Ehhez azonban szükséges egyfelől az UAS eszköz használatának integrációja a hagyományos repülő eszközök alkalmazási rendszerébe (légtér használat, kommunikáció stb.), másfelől az adott repülőtér forgalmát irányító személyekkel történő magas szintű koordináció a magas szintű repülésbiztonság fenntartása érdekében.

Az említett célra alkalmazandó UAS eszközök esetében – figyelembe véve a szükséges fedélzeti szenzorrendszer méreteit és tömegét – olyan merev- vagy forgószárnyas gép jöhet számításba, mely minimálisan képes 0,5–1,5 órát a levegőben tartózkodni és alkalmas legalább 0,5–3 kg hasznos tömeg szállítására. A meghajtást elektromos és más üzemanyaggal működő motorok, vagy esetleg gázturbina, egyaránt végezhetik. Mindegyik típusnak vannak előnyei és hátrányai, melyekről ennek a munkának a keretén belül most nincs módunk értekezni.

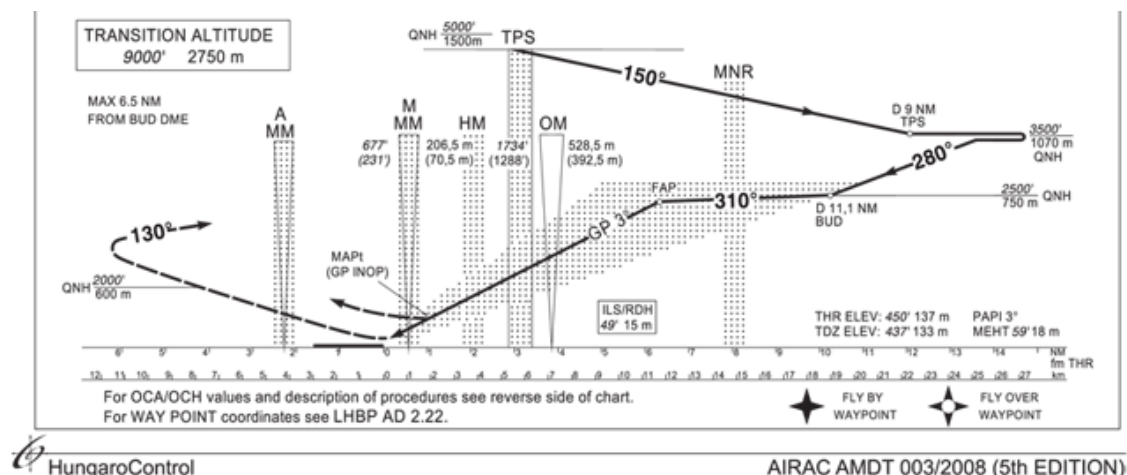
A légi időjárás felderítés, mint a prognózisok real-time verifikációja

Egy korábbi munkánkban már érintettük azt a problémát, amely az operatív repülésmeteorológiai szolgálat támogató munkájában jelentkezik abban az esetben, amikor a meteorológus számára rendelkezésre álló numerikus prognózisok által előrejelzett és a tényleges időjárás között jelentős különbség áll fenn [12]. Ebben az esetben nyilvánvaló, hogy az előrejelző az adott numerikus

outputra kevésbé vagy egyáltalán nem támaszkodhat az általa elkészítendő repülésmeteorológiai előrejelzés készítésekor. Ugyanakkor az is napnál világosabb, hogy nem mindegy mekkora, az előbb említett inkonzisztencia mértéke a valós és a számszerű előrejelzés között. Bonyolítja a kérdést az a tény, miszerint jelen esetben nem csak a felszíni időjárás alakulása fontos számunkra, hanem egy 3D-s légköri tartomány állapotának alakulását kell nyomon követni.

Kiemelkedően fontosak azok a prognózisok, melyek egy adott repülőtér környezetében jelzik előre az időjárás alakulását, hiszen a repülés leginkább veszélyes fázisai (fel- és leszállások) itt zajlanak le. Lényeges tehát, hogy tudjuk, az adott előrejelzés mennyire megbízható az adott prognosztikai intervallumban, ami a HR nem-hidrosztatikus modellek esetén mindössze néhány óra, de általában kevesebb, mint 12–24 óra. Ráadásul, a repülőterek esetében a fel- és leszállások előre meghatározott rendben, adott repülési eljárások figyelembevételével történik, melyekhez konkrét 3D-s útvonalak tartoznak, ezért ezekre az útvonalakra adott előrejelzés pontossága lényegbe vágó kérdés (4. ábra). Az AIP dokumentumok tartalmazzák ezeket az eljárásokat és útvonalakat minden egyes repülőtér esetében, ahogyan pl. az alábbi ábrán, a Budapest Ferihegy repülőtérre történő megközelítés oldalnézete látható [13]. Ismerve ezeket, a numerikus modellek adataiból előállíthatók a mindenkori időpontra és megközelítési pályára vonatkozó meteorológiai metszetek, amelyek tájékoztatnak az adott pályageometria légköri viszonyairól.

Ugyanakkor általában nincs információnk arról, hogy a fenti útvonalon ténylegesen hogyan alakul az időjárás. Télen és nyáron is adódik olyan időjárási helyzet, melyben igen gyorsan változnak a meteorológiai viszonyok az adott megközelítési útvonalon, így nagyon hasznos lenne, ha ismernénk az alapvető fizikai viszonyokat ennek mentén. Ennek a kérdésnek az egyik megoldása lehet a fentebb meghatározott szenzorrendszerrel felszerelt UAS eszköz, amely – a mindenkori forgalom figyelembevételével, akár folyamatosan is – üzemelne és a mért adatokat jelentené a meteorológiai irodába. Ezzel a módszerrel lényegében megvalósítható lenne az alkalmazott numerikus prognózisok real-time verifikációja is, ami a jövőben a modell fejlesztéseknek szabhat új irányokat.



4. ábra A Budapest Liszt Ferenc nemzetközi repülőtér 31L pálya megközelítési eljárásának oldalnézeti térképe [13]

Ennek a légi időjárás-felderítésnek természetesen nem csak az lenne az eredménye, hogy a meteorológus meg tudná becsülni az általa alkalmazott numerikus modellek megbízhatóságát, hanem a repülési tartományban esetlegesen előforduló, a repülésre veszélyes jelenségek megfigyelése, detektálása is nagymértékben elvégezhető lenne, ráadásul majdnem valós időben (pl.

turbulencia, szélnyírás esetleg jegesedés). Nyilvánvaló, hogy ehhez a lesugárzott real-time mérési adatok földön történő gyors feldolgozása és megjelenítése is szükséges lesz.

Az alkalmazott UAS rendszer flexibilitásából adódóan, természetesen bármilyen előre megadott 3D-s repülési útvonalon történő repülés viszonylag gyorsan megvalósítható, így az adott repülő eszköz műszaki paramétereiből származó hatósugáron belül, akár többször is, végrehajthat időjárás-felderítést az adott repülőtér körzetében, ha arra szükség van.

Adatszolgáltatás numerikus modellek adatasszimilációs eljárásaihoz

Ahogy korábban már utaltunk rá, az egyik legnagyobb kihívás az adatasszimilációs eljárásban, a megfelelő mennyiségű, pontosságú, térbeli és időbeli eloszlású meteorológiai adat hiánya. Ezek közül is a troposzférából, de még inkább a planetáris határréteg (PHR) alatti légrétegekből származó megbízható pontosságú és eloszlású adatok hiánya okozza a legtöbb gondot az adatasszimiláció során.

Ha csak hazánkat vizsgáljuk – a nem távérzékelési módszerrel végzett – rendszeres hagyományos elveken történő meteorológiai mérésekről elmondhatjuk, hogy térben és időben egyaránt ritkán zajlanak. Az Országos Meteorológiai Szolgálat által üzemeltetett felszíni hagyományos méréseket végző automata hálózat mindössze közel 240 állomásból épül fel, melyek percenként végeznek méréseket. Még ha ezt a területi és időbeli felbontást elfogadhatónak is tartanánk, a felszín feletti légréteg esetében azonban (elsősorban a PHR-ben) döbbenetes adathiány mutatkozik a hagyományos mérések területén. Gyakorlatilag rádiószondás méréseket az OMSZ csak Budapesten (napi 2 alkalommal) és Szegeden (napi 1–2 alkalommal) végez már hosszú évek óta, elsősorban a jelentős költségek miatt.

A képet némileg árnyalja, hogy a pilóták által vezetett (nagy részt menetrend szerint közlekedő) utas- és teherszállító gépeken egyre inkább rendelkezésre álló meteorológiai szenzorok adatait (AMDAR) megkapják a nemzeti meteorológiai szolgálatok és így asszimilálhatóak a numerikus modellek futtatásához. Ezek jelentős előrelépést jelentenek, de – tekintve, hogy ezek a repülőgépek általában nagyméretűek – kimondottan csak a fontosabb hazai repülőterekre közlekednek, döntő többségében a Budapest Liszt Ferenc Nemzetközi Repülőtérre. Ebből adódóan, valamint az általuk használt standard útvonalak 3D-s geometriájából fakadóan, távolról sem adnak elégséges információt a hazai troposzféra – és főleg nem – a PHR alatti légréteg fizikai állapotáról.

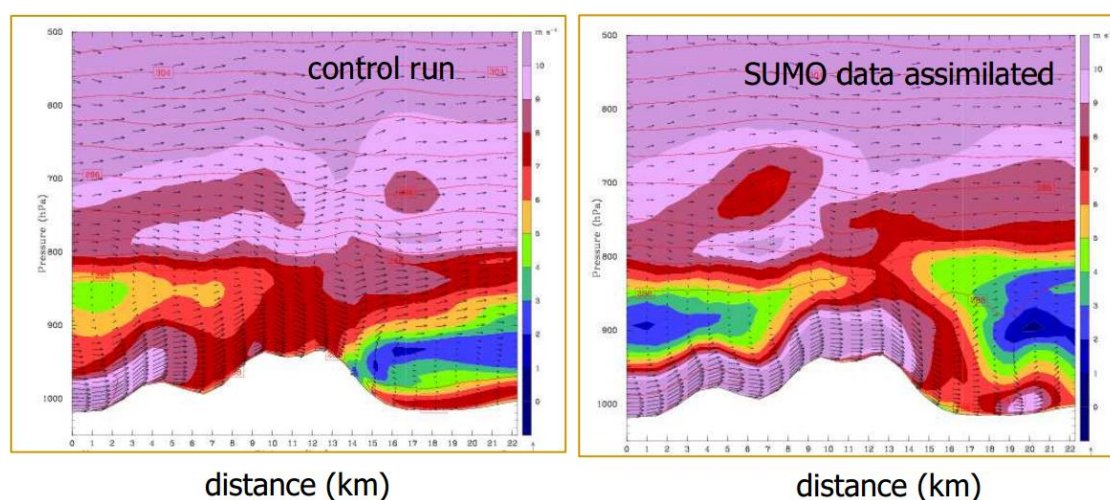
Véleményünk szerint a numerikus prognosztikai outputok minőségi javításának egyik legnagyobb lehetősége abban rejlik, hogy tudunk-e a fent említett légréteg fizikai állapotáról minél pontosabb (értelem szerint 3D-s) pontos, térben és időben nagy felbontású adatokat asszimilálni a modellekbe. Ez az igény azonban – figyelembe véve a műszaki és anyagi lehetőségeket - csak két módon elégíthető ki: modern *távérzékelési eszközök* alkalmazásával (műholdas produktumok, radarok stb.) és *megfelelően felszerelt repülő eszközök* igénybe vételével, melyek repülésük során folyamatosan mérik és jelentik a légréteg fizikai állapotát.

A távérzékelési eszközökből származó adatok is egyre nagyobb számban állnak rendelkezésre, de az általuk szolgáltatott meteorológiai információ – bár felbecsülhetetlen értékű – mégis sok esetben jelentős pontatlansággal terhelt. E tanulmánynak nem célja ennek a problémának a taglalása, de ismeretes, hogy műholddal folyamatosan, nagy pontossággal nem lehetséges moni-

torozni pl. a PHR alatti légréteg nedvességi és hőmérsékleti viszonyait, de gyakran a szélviszonyokat sem, és a több rétegű felhőzet észlelése is gondot okoz stb. A helyhez kötött távérzékelési rendszerek (radar, windprofiler, LIDAR stb.) esetében pedig a horizontális távolság függvényében jelentősen változik a mért adatok pontossága. Ráadásul a windprofilerek alapvetően vertikális méréseket végeznek. Az egyik legnagyobb kihívás azonban ezeknek az eszközöknek a beszerzési és installálási költsége, mely még a nemzeti meteorológiai szolgáltatónak is óriási gondot okoz (üzemeltetési költségekről még nem is beszélve).

A PHR alatti és feletti légréteg 3D-s, nagy térbeli és időbeli felbontású megfigyelésére célszerűen szintén – speciális szenzorokkal felszerelt – *UAS eszközöket vagy esetleg flottát* lehet alkalmazni. Egy ilyen – teljesen egyformán műszerezett meteorológiai mérő UAS eszközökből álló – flotta alkalmazása jelentősen enyhítené a korábban említett 3D-s adathiány problémáját az adatasszimilációkhoz. Természetesen az, hogy hány eszköz, milyen módon és útvonalon, milyen szenzorokkal végezzen repülést, valamint, hogy az adatok milyen módon kerüljenek be a központi rendszerbe, hogyan szervezzük meg a flotta működését, karbantartását, ezek a kérdések válaszra várnak. Ugyanakkor technikai és anyagi szempontból vizsgálva a kérdést elmondhatjuk, hogy ma már egy ilyen UAS repülő flotta szolgálatba állítása teljesen reális és megvalósítható projekt, mely a biztonság növekedése mellett, anyagi értelemben is megspórolná a bekerülés és működtetés költségét. (Arról nem is beszélve, hogy ezeknek a repülőgépeknek több célú alkalmazása is felmerülhet, hiszen nem csak meteorológiai szenzorokat lehetne a fedélzetükre installálni, hanem más jellegű megfigyelésekre alkalmas eszközöket is.)

Maradva azonban pusztán a meteorológiai alkalmazásoknál, egy ilyen real-time időjárás adatgyűjtéssel foglalkozó repülő flotta alkalmazásához elengedhetetlenül szükséges – a korábban már említett – UAS eszközök használatával kapcsolatos szabályozók kidolgozása, hiszen a jelenlegi repülések rendszerébe biztonságosan integrálni kell a pilóta nélküli repülést. Jelenleg érvényben levő szabályozás az ilyen eszközök repülését csak eseti légtérben teszi lehetővé, melynek fogalmát, igénylését és felhasználásának módját a 26/2007. (III. 1.) GKM-HM-KvVM együttes rendelet szabályozza [14]. Várhatóan a közeljövőben Magyarországon is elkészülnek azok az új rendeletek, melyek módosítják az UAS eszközök üzemeltetéséhez szükséges feltételeket és rugalmasabbá teszik a jelenleg kissé nehézkes szabályozást.



5. ábra Az izlandi mérési kampány során végrehajtott SUMO repülések adatainak felhasználása nélkül (fent) és annak WRF-be történő asszimilálásával készült (lent) numerikus modell-becslések a szélereősségre vonatkozóan [15]

Felmerül persze a kérdés, hogy egy UAS eszköztől származó valós idejű meteorológiai információ asszimilációja hogyan képes javítani egy adott numerikus modellből származó output pontosságán? Példaként bemutatjuk a bergeni egyetemen fejlesztett SUMO UAS eszközzel végrehajtott mérési kampány egyik fontos eredményét [15]. A norvég kutatók 2009 júliusában Izlandon az Esia hegyről lezúduló erős szélvihar modellezéséhez szerveztek egy UAS mérési kampányt, melynek során a numerikus modell-számításokhoz (WRF) felhasználták a SUMO UAS eszköztől származó valós idejű mérési adatokat. A SUMO fedélzetéről származó meteorológiai információt sikeresen asszimilálták a WRF modell futtatása során. Ennek eredményeképpen a fenti ábrán látható eredményeket kapták a szél erősségének becslésére (5. ábra).

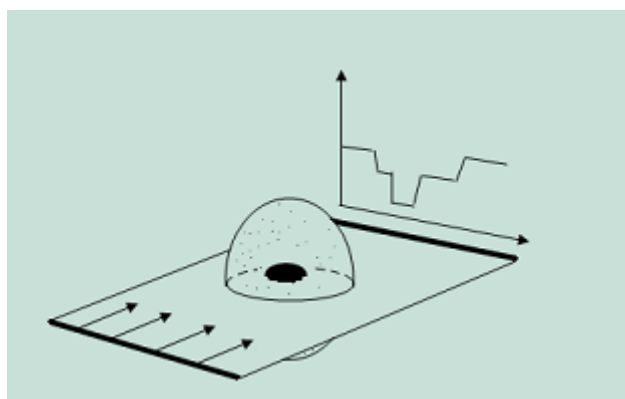
Jól észrevehető a talaj közeli néhány száz méter vastag légrészben, hogy a hegyről lefelé erősen fújó szél az adatasszimiláció nélküli futtatáson gyakorlatilag nem jelenik meg, míg a SUMO adatait felhasználva a hegyen átbukó szél jól nyomon követhető több km-en át. Ez egyben azt is jelenti, hogy a SUMO által szolgáltatott valós idejű adatok asszimilálása a numerikus modell futtatási rendszerébe, jelentősen pontosította, a hegyen átbukó szélre vonatkozó prognózist.

A fenti példa is azt igazolja, hogy van létjogosultsága ilyen jellegű kutatásoknak és kísérleteknek, mert a – főleg mezo- és mikro-léptékű – időjárási folyamatok számszerű előrejelzésének pontosítását, megbízhatóbbá válását segíthetik elő.

A légköri akusztikus tomográfia

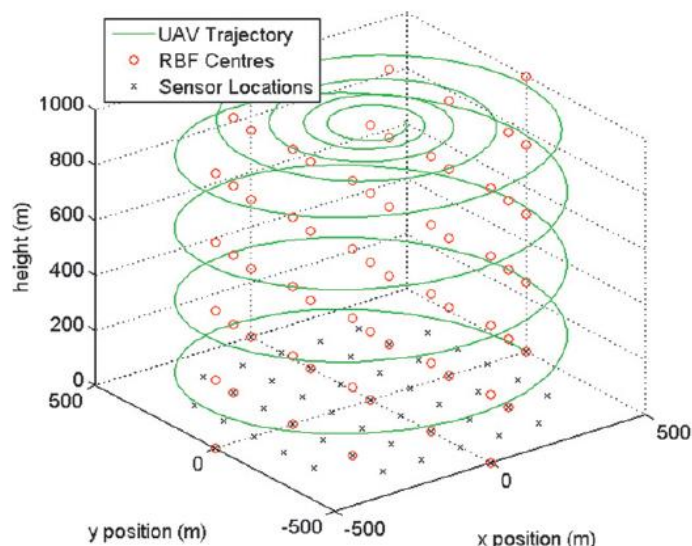
A planetáris határréteg folyamatos megfigyelése – ahogy korábban is említettük – rendkívüli fontossággal bír. Erre a célra több megoldási mód is adódik, melyek közül most a légköri akusztikus (hang terjedési módján alapuló) tomográfiáról és annak UAS eszközök segítségével történő megvalósításáról szólnunk, ebben az alfejezetben.

A tomografikus mérési mód azt jelenti, hogy különböző szintekben rétegfelvételeket készítünk különböző átvilágítási eljárással (pl. röntgen-sugárral, hanghullámmal stb.) az adott médiumról megadott irányokban és az elnyelődés helyéből és mértékéből információt kaphatunk a médium bizonyos tulajdonságainak térbeli eloszlásáról (6. ábra).

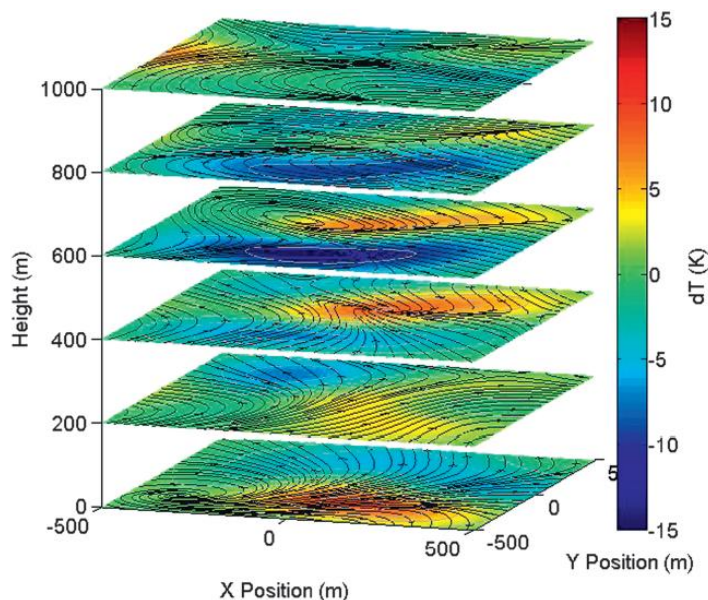


6. ábra Egy adott, középen kisebb áteresztőképességű maggal rendelkező testet világít át a síkszerű röntgensugár-nyaláb. A test mögött a detektor által készített intenzitás görbe látható. A sugárnyalábbal ugyanebben a síkban több irányból is átvilágítják a testet, és a mért intenzitásgörbékből kibontakozik az adott síkban (szeletben) elhelyezkedő részletek rajza [16]

Amennyiben a médium a légkörünk alsó tartománya (pl. a PHR), ebben a közegben célszerűnek mutatkozik a hanghullámokkal történő „átvilágítás” alkalmazása, hiszen a hanghullámok terjedési tulajdonságait karakterisztikusan befolyásolja az atmosféra pillanatnyi fizikai állapota. Különösen jól lehet vizsgálni ezzel a módszerrel a hőmérséklet és a szél 3D-s eloszlását az alsó troposzférában. A vertikális „átvilágításhoz” azonban szükség van az adott magasságokban egy hangforrásra és a talaj szintjében pedig detektorokra. A lefelé irányuló – adott karakterisztikával rendelkező – hangforrást célszerűen egy adott, *előre tervezett pályán repülő UAS eszköz hordozhatja* (7. ábra).



7. ábra Akusztikus légköri tomográfia méréshez alkalmazott UAS eszköz pályája (UAV Trajectory), a súlyozott radiális alap függvények hálózata (RBF Centres) és a talajon elhelyezett hangszenzorok [17]

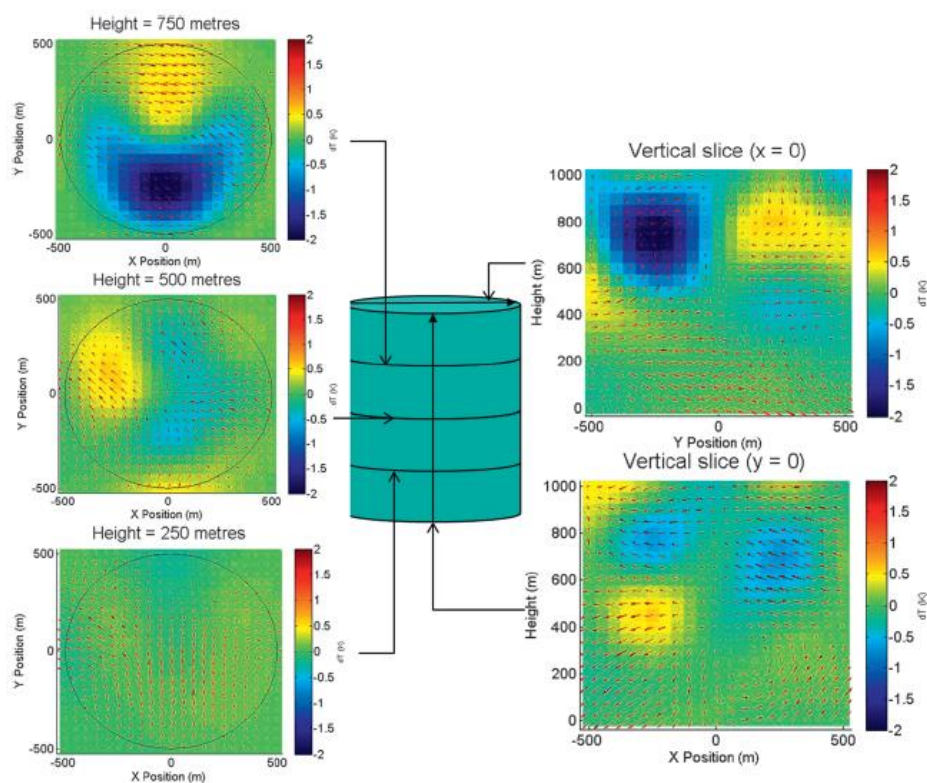


8. ábra Az alsó troposzféra - akusztikus tomográfia segítségével – több szintben előállított hőmérséklet és horizontális szélirány mezők [17]

Az ausztrál kutatók kísérletében, egy 32 m/s sebességgel repülő UAS eszköz repülése közben függőlegesen lefelé kisugárzott hanghullámait 49 darab egymástól 125 méterre elhelyezett

hangszenzor érzékelte [17]. A kisugárzott és észlelt hanghullámok tulajdonságaiból – több ismert matematikai módszer alkalmazásával – elő tudták állítani több szintben a légkör hőmérséklet és horizontális légmozgás eloszlását (8. ábra). Az ábrán a hőmérsékleti anomália értékei láthatóak színskálával megjelenítve a referencia 20 °C értékhez viszonyítva. Rendkívül jól megfigyelhetők az egyes szintek közötti hirtelen hőmérsékleti változások, hiszen pl. amíg a talajon (0; –400) koordináta közelében a referencia értékhez képest mintegy 7–8 K pozitív anomália látható, ugyanezen pont felett 600 méter magasban már közel ugyanennyi negatív hőmérsékleti anomáliát tapasztalhatunk (ez 600 méteren kb. 15 K-es hőmérséklet-csökkenést jelent).

Persze joggal merülhet fel a kérdés, hogy mennyire pontosak ezek az akusztikus tomográfiával előállított adatok. Erre vonatkozóan a kutatók természetesen végeztek egyidejű méréseket, más mérési elv alapján dolgozó mérő berendezés segítségével, a hőmérsékletre és szélesebbesre vonatkozóan, egyaránt. Ismerve ezeket az előbbi adatokat és az akusztikus tomográfia segítségével előállított értékeket elkészítették a különbség mezőket az említett két paraméterre vonatkozóan (9. ábra). Az ábrán a hőmérséklet és szélesebbesség eltérések értékei azt mutatják, hogy mindkét paraméter esetén az átlagos négyzetes hiba kisebb, mint 0,4 K, illetve 0,4 m/s. A hiba maximuma 750 méter magasban a hőmérséklet esetén 1,7 K volt. A mért szélvektorok fekete színnel kerültek jelölésre, míg a tomográfiából származtatott szél piros nyilakkal látható az ábrán [17].



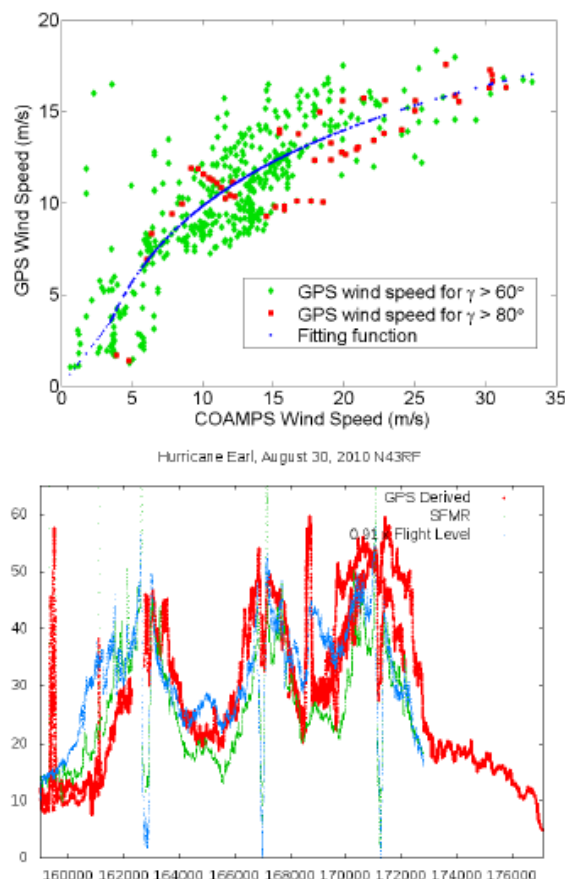
9. ábra A 3D-s légköri tomográfiával előállított és a tényleges hőmérsékleti valamint horizontális szél mezejének különbsége a különböző irányú metszeteken (a bal oldalon vízszintes, míg a jobb oldalon függőleges sík mentén készült mezők láthatóak). A szél esetében a mért vektor fekete színnel, a tomográfiával származtatott pedig pirossal került ábrázolásra [17]

Tekintve, hogy a módszer elegendő pontosságú adatokat képes szolgáltatni a hőmérséklet és a szél esetében, valamint a rendszerhez szükséges berendezések relatíve alacsony beszerzési és

üzemeltetési költségei alkalmassá teszi arra, hogy hazánkban is végezzünk ilyen jellegű kísérleti – és amennyiben ezek sikeresek – akár operatív méréseket, adott kiemelten fontos régiókban (ahogy korábban említettük, elsősorban pl. a repülőterek közelében). Mi sem természetesebb, hogy ezek az így előállított adatok az előző alfejezetben említett adatasszimilációs eljárások rendelkezésére állhatnak.

GNSS passzív radar alkalmazások

A GNSS (Global Navigation Satellite System) műholdak nagyfrekvenciás sugárzásának és ezek különböző tereptárgyakról történő folyamatos visszaverődéséből származó jelek vételi lehetősége nagy lehetőségeket jelent a meteorológiai alkalmazások terén is. Lényegében ez a mérési módszer, mint *passzív radar technika* értelmezhető, hiszen itt a mérésekhez szükséges jelet maguk a GNSS rendszerben dolgozó, folyamatosan sugárzó műholdak állítják elő, így erről külön nem kell „gondoskodni”, csak a direkt és a visszavert sugárzás vételéről. A technika lényege abban áll, hogy a direkt és a visszavert elektromágneses sugárzás tulajdonságaiban különbségek jelennek meg a visszaverő felület fizikai tulajdonságainak függvényében és ez alapján következtethetünk az adott fizikai állapot értékeire vonatkozóan.

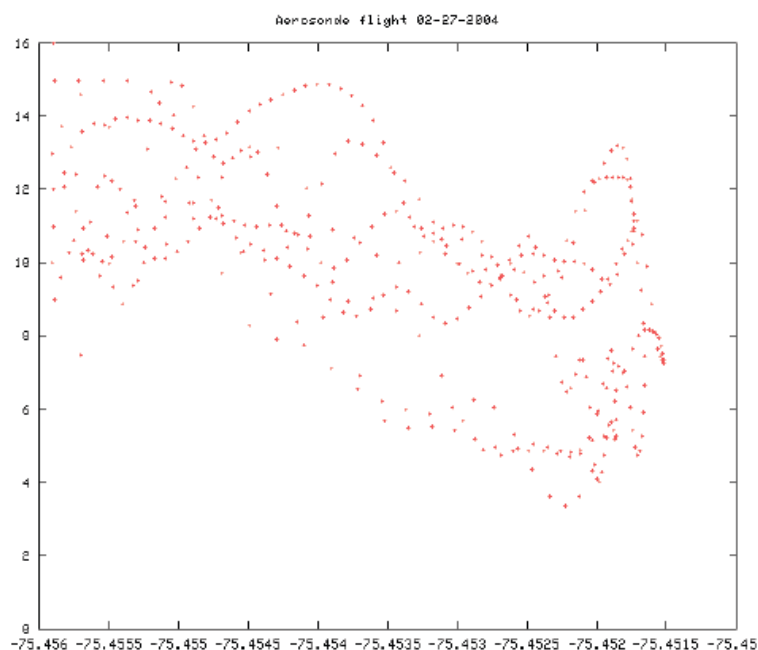


10. ábra Kalibrációs görbe a GPS jelek és a tényleges szélmerések közötti kapcsolat számszerűsítéséhez (fent).

Szélsebességek az Earl hurrikán környezetében 2010. augusztus 30-án. Piros görbe: a kalibrációs görbe segítségével számított szélsebesség; zöld görbe: mikrohullámú radiométerből származó szélsebességek; kék görbe: felszíni extrapolált Flight Level (FL) szélsebességek [18]

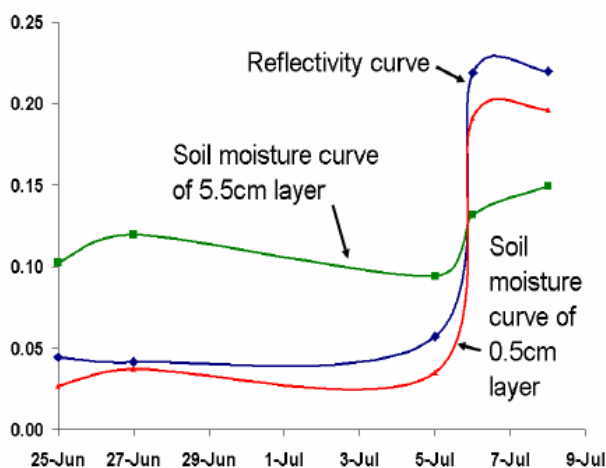
Munkánkban a GNSS passzív radar alkalmazás két olyan meteorológiát érintő területével kívánunk foglalkozni, melyek lehetővé teszik egyrészt a *szél becslését vízfelszín felett*, másrészt pedig

a talaj nedvességtartalmának meghatározását a fent említett elv alapján [18]. A szélbecslés során azt használhatjuk ki, hogy a GNSS műholdakról származó jelek eltérő tulajdonsággal verődnek vissza a szél által keltett vízfelületi hullámokról, vagyis a víz felszínének érdessége és az érdességet kialakító szél sebessége között erős sztochasztikus kapcsolat mutatható ki. Összevetve a visszavert és a direkt jel közötti különbséget, meghatározható egy érdességi paraméter, mely alapján megbecsülhető a felszín közeli szél sebessége (10. ábra). Az UAS eszközök alkalmazási lehetősége értelemszerűen abban áll, hogy a direkt és a visszavert GNSS jeleket vevő detektorokat és a hozzájuk kapcsolódó feldolgozó egységet képesek hordozni. Példaként említhetjük az egyik első ilyen kísérletet, melynek során az Aerosonde UAS eszköz fedélzetén helyezték el ezeket a detektorokat és a feldolgozó egységet, 2004. február 27-én (11. ábra).



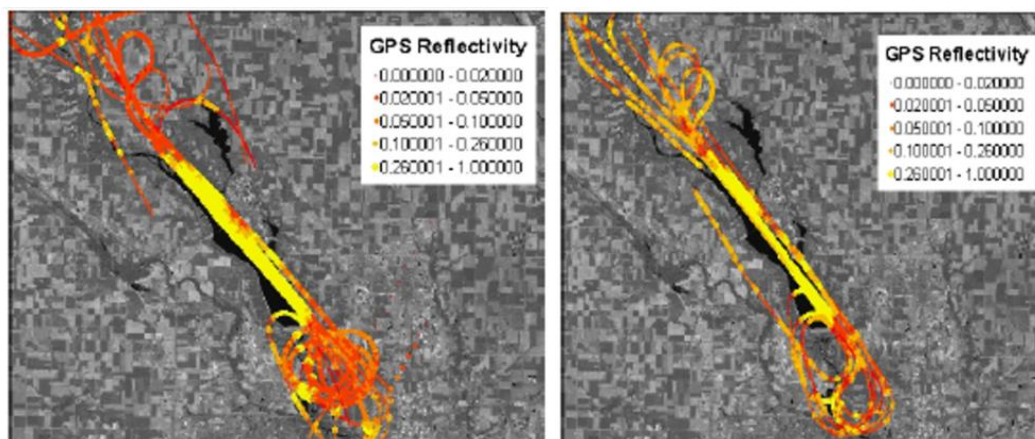
11. ábra Az Aerosonde UAS eszközzel végzett szélsébség mérések adatai 2004.02.27-én [18]

Hazánkban elsősorban a nagyobb tavaink (Balaton, Fertő-tó, Tisza-tó) feletti mérések szolgáltatnának pontosabb szélsébségi adatokat az említett GNSS passzív radar elv és megfelelő UAS egység alkalmazásával, melyek felhasználásával a vízi közlekedés biztonsága is növelhető lenne.



12. ábra Összefüggés a felszínről visszavert GPS jelek erőssége és a talaj felszínének nedvességtartalma között [18]

Egy másik meteorológiai felhasználási lehetőség is rejlik az előzőekben vázolt passzív radar módszerben, ugyanis a földfelszín nedvességtartalmától függően, szintén megváltozik a visszavert GNSS jel karakterisztikája. Arról van szó, hogy a visszavert jel erősségét meghatározza a felszín anyagának fizikai állapota, jelen esetben a víztartalom is (nedvesség hatására megváltozik a talaj dielektromos állandója): a GPS jelek felszínről történő visszaverődésének intenzitása (viszonyítva a beérkező direkt GPS jelek intenzitásához) a talaj felszínének víztartalmáról ad információt, ahogyan a 12. ábrán láthatjuk. Az ábra azt mutatja, hogy amennyiben száraz a talaj, akkor a visszavert GPS jel gyengébb és fordítva.



13. ábra A visszavert GPS jelek intenzitása és a talaj nedvességtartalma közötti kapcsolat az egyik kísérleti mérés során. A bal ábra száraz, a jobb oldali pedig, eső utáni nedves talajt reprezentál. A fekete terület tó [18]

Amennyiben rendelkezünk egy olyan UAS eszközzel, mely egyszerre képes mérni a beérkező direkt és a talajról visszavert GPS jelek intenzitását, akkor lehetőségünk adódik a talaj felső rétegének nedvességtartalmának becslésére, ami agrometeorológiai is szempontból kulcsfontosságú információ. Egy erre vonatkozó kísérlet eredményét láthatjuk az 13. ábrán. Az ábra két képe ugyanazt a területet ábrázolja. A felső képen száraz a talaj, míg az alsón egy eső utáni, átázott talaj látható. A fekete terület egy tó felszínét jelöli, mely feletti mérés kalibrációs célokat szolgált. Az 13. ábra szürke (tehát talajfelszínt reprezentáló) régiója feletti mérésekből látható, hogy a felső (száraz) képen a GPS jelek visszaverődése jóval gyengébbek, mint az alsó (nedves) esetben. Megfigyelhető, hogy mindkét esetben a visszavert jelek a tó felett a legerősebbek [18].

Nyilvánvaló haszonnal járhat tehát pl. egy mezőgazdasági terület szenzorokkal felszerelt UAS eszközzel történő megfigyelése, melynek méréseiből meghatározható az adott kultúra talajának nedvessége és szükség esetén intézkedhetnek annak pótlásáról is (öntözés koordinálása).

Ugyanakkor, egy nagyobb terület felszínének nedvességi viszonyainak ismerete abból a szempontból is fontos, hogy potenciálisan mekkora párolgás várható a talaj közelében, mert ez jelentős hatással van az alacsony magasságban kialakuló felhőzetre és/vagy ködre, egyaránt. Az alacsony stratus/köd prognózisok gyakran azért nem válnak be, mert az itt említett felszíni nedvességről nincs pontos információ a modellek futtatásakor és azok nem képesek figyelembe venni a helyes talajnedvességi értékeket. Ha azonban közel real-time módon – a korábban említett adatasszimiláció során – ezeket az adatokat be tudjuk juttatni a numerikus modellek futtatási ciklusába, ezen a területen is lényeges előrelépés várható.

ÖSSZEGZÉS

A megfigyelések oldaláról vizsgálva a kérdést azt mondhatjuk, hogy a numerikus modellek outputjainak pontosítását tervezetten, adott módszertan alapján végrehajtott, nagyobb számú, megfelelően felszerelt, meteorológiai UAS eszközök alkalmazásával nagymértékben segíthetjük. Ezek az eszközök alkalmasak arra, hogy viszonylag rövid idő alatt, jelentős 3D-s térrészt berepüljenek és közben méréseket hajtsanak végre, lehetőleg pontosan azokon a zónákban, ahol jelentősebb „hézagok” vannak az egyéb megfigyelésekből előállított mezőben. Másrészt a numerikus előrejelzés alapján már előre meghatározhatók olyan kritikus tartományok a légkörben, ahol várhatóan jelentős, rövid élettartamú dinamikus folyamatok indulnak be és ezek, mintegy előzetes vizsgálatára oda lehet repülni és folyamatosan megfigyelni és jelenteni az atmoszféra állapotát. Az így kapott adatokat egy folytonos jellegű adatasszimilációs módszer segítségével (pl. 4-DVAR, nudging stb.) kiválóan fel tudnánk használni a HR numerikus modell pontosításához, ezen keresztül.

A légköri méréseket végrehajtó UAS eszközök rendkívül értékes információt szolgáltatnak arról is, hogy egy adott numerikus modell mennyire van összhangban a tényleges időjárással, így a meteorológus meg tudja becsülni annak „jóságát” és használhatóságát az elkövetkezendő néhány órában. Másrészt, a légkörben zajló mikrofizikai folyamatok, melyek gyors, szignifikáns változást képesek előidézni az atmoszférában, az időjárás megfigyelő UAS eszköz előtt kevésbé maradnak rejtve, ezért alkalmazásukkal lehetővé válik az időben történő esetleges veszélyfigyelmeztetés kiadása és az ennek hatására történő útvonalmódosítások elvégzése is.

Az időjárás-felderítés során a szóban forgó eszközök a repülőterek közelében, az adott megközelítési eljárásokban meghatározott útvonalakon történő repülések alatt, folyamatosan adatokkal látnák el a meteorológiai szolgálatot, melyek így pontos időjárási helyzetképpel rendelkeznének ezek mentén.

További izgalmas meteorológiai alkalmazásokat is bemutattunk, hogy igazoljuk az UAS eszközök felhasználásának időszerűségét, fontosságát, rugalmasságát és nem utolsósorban költségkímélő mivoltát. Ezek közül a valós idejű adatasszimiláció, a légköri akusztikus tomográfia és a GNSS passzív radaros megoldások kerültek előtérbe, melyeket egy-egy kísérleti eredmény részletes bemutatásával illusztráltunk.

Befejezésként annyit kívánunk megjegyezni, hogy rendkívül jelentős szerepet vízionálunk az UAS eszközök hazai meteorológiai alkalmazásának és a magunk részéről megteszünk mindent, hogy a repülésbiztonság meteorológiai oldalról is még magasabb szintre emelkedjen Magyarországon.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Bölöni Gergely: Meteorológiai adatasszimiláció. <http://nimbus.elte.hu/met/BoloniG200309.pdf>. 2003.
- [2] Bottyán Zsolt: International and Hungarian Applications of Unmanned Aircraft Systems in the Meteorological Researches. Repüléstudományi Szemelvények. No. 2, 2017. pp. 51-74. ISBN 978-615-5845-26-0
- [3] Lorenc, A.C., 1986: Analysis methods for numerical weather prediction. Quart. J. R. Meteor. Soc., 114, pp. 205-240.
- [4] Davies, H. C. and Turner, R. E., 1977: Updating prediction models by dynamical relaxation: An examination of the technique. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 103, pp. 225-245.
- [5] Bottyán Zsolt: A közszolgálati célú repülések meteorológiai támogatásáról I. Léggörünk struktúrája, alapfolyamatai repülésmeteorológiai megközelítésben. Repüléstudományi Szemelvények, No. 2, 2017. pp. 7-26. ISBN 978-615-5845-26-0
- [6] Götz Gusztáv (1976): Léggöri folyamatok dinamikus modellezése. Időjárás. 27-41.
- [7] Kullmann L. (2008): Az ALADIN numerikus előrejelző modell a rövid távú előrejelzés szolgálatában. Meteorológiai Tudományos Napok előadás. http://www.met.hu/doc/rendezvenyek/metnapok-2008/07_Kullmann.pdf
- [8] Bottyán Zsolt: A repülésre veszélyes mezo-skálájú meteorológiai jelenségek modellezésének aspektusai – numerikus prognosztikai megközelítés. Repüléstudományi Közlemények, Vol. 21. No. 2, p. 11. 2009.
- [9] Práger Tamás (1992): Numerikus prognosztika. Budapest. Tankönyvkiadó. 1977.
- [10] Baranka Györgyi, Bordás Árpád, Gyuró György, Havasi Ágnes, Leelőssy Ádám, Mészáros Róbert, Szépszó Gabriella, Tasnádi Péter, Weidinger Tamás: Klasszikus dinamikus meteorológiai feladatgyűjtemény II. http://ttkta-mop.elte.hu/online-tananyagok/klasszikus_dinamikus_meteorologia_ii_feladatgyujtemeny/index.html. 2013.
- [11] Bottyán Z, Zénó András Gyöngyösi, Wantuch F, Tuba Z, Kurunczi R, Kardos P, Isteneš Z, Weidinger T, Hadobács K, Szabó Z, Balczó M, Varga Á, Bíróné Kircsi A, Horváth Gy.: Measuring and Modeling of Hazardous Weather Phenomena to Aviation Using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS). Időjárás / Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service 119:(3) pp. 307-335. (2015)
- [12] Bottyán Zsolt: A pilóta nélküli repülőeszközök meteorológiai alkalmazásának lehetőségeiről I.: az időjárás-felderítés. Repüléstudományi Közlemények 28:(2) pp. 57-70. (2016)
- [13] Aeronautical Information Publication (AIP) Hungary. 2008.
- [14] 26/2007. (III. 1.) GKM-HM- KvVM együttes rendelet. https://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=a0700026.gkm
- [15] S. Mayer, A. Sandvik, M., O. Jonassen, J. Reuder: Atmospheric profiling with the UAS SUMO (2012): a new perspective for the evaluation of fine-scale atmospheric models. Meteorol Atmos Phys (2012) 116:15–26. DOI 10.1007/s00703-010-0063-2.
- [16] <http://upload.wikimedia.org/wikipedia/hu/9/98/Scanning.PNG>
- [17] K. Rogers and A. Finn (2013): Three-Dimensional UAV-Based Atmospheric Tomography. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, Vol. 30., 336-344.
- [18] S. J. Katzberg, J. L. Garrison and R. F. Holloway (2012): Reflected GPS and other Signals of Opportunity as Multipurpose Sensors for UAS Applications Multipurpose Sensors for UAS Applications. ICUAS2012, Philadelphia.

**THE IMPORTANCE AND POSSIBILITIES OF APPLICATION OF UNMANNED AIRCRAFT SYSTEMS
IN THE HUNGARIAN AVIATION METEOROLOGICAL SUPPORT**

The result of the data assimilation used in today's modern numerical forecasts depends largely on its methodology, the amount, quality and distribution of the 3D observation data are used. In our work, we briefly present the applied data assimilation techniques and point out the role of observations and their deficiencies, too. We demonstrate that using UAS devices equipped with the appropriate meteorological sensors can improve the accuracy of numeric models and monitor the real-time error of the models as well as enable timely detection of hazardous processes in the atmospheric boundary layer. With these tools, the airborne weather reconnaissance can also be carried out, which provides important information to aviation meteorologists and serves to increase aviation safety. In addition to this, we present the possible meteorological application of UAS devices through real-time data assimilation, atmospheric acoustic tomography and GNSS passive radar applications, too.

Keywords: flight safety, data assimilation, weather reconnaissance, atmospheric tomography, GNSS, UAS.

Bottyán Zsolt (PhD)
tanszékvezető, egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774

Bottyán Zsolt (PhD)
Head of Department, associate professor
National University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Institute of Military Aviation
Department of Aerospace Controller and Pilot Training
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774

A mű a KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 azonosítószámú, „A jó kormányzást megalapozó közszolgálat-fejlesztés” elnevezésű kiemelt projekt keretében működtetett Zrínyi Miklós Habilitációs Program keretében, a Nemzeti Közszolgálati Egyetem felkérésére készült.



http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem_Bottyán_Zs.pdf

ON THE THEORETICAL QUESTIONS OF THE UAS-BASED AIRBORNE WEATHER RECONNAISSANCE

In our work we discussed the general theoretical problems of the airborne weather reconnaissance flights. We gave some predictions to determine the technical and meteorological specifications of such well-usable unmanned aircraft system and its onboard sensors, too. Finally we showed the most important flight manoeuvres which can be applied during the airborne measuring in the lower troposphere and described the more important procedures have to be done before, during and after this kind of flight missions.

Keywords: *unmanned aircraft system, meteorological sensors, flight manoeuvres, flight planning.*

INTRODUCTION

In order to keep the aviation safety in a high level state the state-of-the-art meteorological support has to be based on both appropriate atmospheric measurements and well-developed prognostic methods. The meteorological information has natural errors and the spatial and temporal distribution of them is highly limited. It is specifically true in the case of surface and radiosonde measurements but the surface-based remote sensing procedures (radar, Doppler-radar, LIDAR, wind profiler, etc) also have the mentioned problems. [1] With the other application of the huge amount of data which are measured by meteorological satellites the situation is a little bit better, but there are two important limitations too: the spatial and temporal resolutions of the applied satellite data are 3–4 kilometers and 15–30 minutes, respectively in the case of geostationary satellites. On the other hand the different types of clouds also highly influence the applicabilities of this mentioned satellite data during the aviation meteorological support.

The second important base of the aviation meteorological support is the application of the short-range weather forecasts (nowcasting) during the planning and executing of a given flight mission. Since high spatial and temporal resolution of this products are made by different methods we have to know the limited application of them which often means the significant difference between predicted and actual weather situations [2]. The mentioned difference basically came from the followings:

- in the case of using numerical models the applied parameterisation techniques are not enough appropriate and
- the resolution of applied meteorological data sets (measured and sensed values) in space and time is not good enough to make a sound analysis during the data assimilation procedures.

We also have to note there are some micro- and mezo-scale dangerous weather phenomena (such as windshear, airframe icing, turbulence and gust, etc.) and their forecasts are big challenges during the operational nowcasting. Contrarily, it is important to know where they are and what about their intensities, as well.

Of course in contrast with numerical weather forecasts the statistical ones also have some important limitations for example, „their static behavior” which means their poor accuracy during dynamical

weather situations. Accordingly there is a strong ambition to develop and apply combined (hybrid) prediction methods, for example in the case of the horizontal visibility forecasting. The mentioned hybrid prediction came from the specially combined numerical and statistical forecasts [3][4].

On the basis of the above mentioned facts it is clear that the importance of the exact 3D knowledge about real weather situation nearby the airport with the special regards to rapid and exact sensing of the dangerous weather phenomena during the whole flight. On the other hand there is a very special importance in the meteorological support for public service flights because these flights (military and civilian rescue flights, surveillance and reconnaissance missions during disasters and border patrol flights, etc.) are generally executed very often abruptly and these missions cannot be planned forward in detail. On the basis of these mentioned indefinite things we have to give the most accurate meteorological support for the public service flights because these missions could be postponed in the very bad weather conditions only.

It seems to be clear in case we would like to prepare an appropriate meteorological support system for aviation we have to develop the methods and instruments a flexible, real-time 3D airborne weather reconnaissance system. In our earlier work we showed the best option for this airborne atmospheric measurements is the application of the special unmanned aircraft systems (UASs) with meteorological sensor system are mounted on their board. Nowadays there are such successful applications all over the world [5][6][7][8][9][10]. We know exactly the AMDAR systems which are installed on the commercial aircrafts of the larger airliners. The meteorological data stem from this system play an important role in the operational weather prediction but there are some limitations of them, too (i.e. these measurements join the larger airports and the given timetable of the mentioned airliners only, the data collections often came from the same or similar flight path of the commercial aircrafts) [11]. We also showed the important role of the airborne weather reconnaissance in the refinement of the applied numerical weather predictions [12].

In our work we are going to deal with the theoretical background and important questions of the airborne weather reconnaissance. In the course of it we will suggest some important ideas for the methodology of the mentioned procedures with the special regards to the applied measurement manoeuvres and onboard sensor systems, too. In so many words we are also going to discuss the applicable UASs considering the challenges during their flight and the characteristics of the observable atmospheric phenomena.

ON THE IMPORTANCE OF AIRBORNE WEATHER RECONNAISSANCE

In the earlier period of the Hungarian military aviation people often applied the airborne weather reconnaissance flights in order to gather some important meteorological information about the parts of atmosphere which were interesting in the case of the training flights. These flights played an important role in the operational aviation meteorological support because in this time there were not enough other atmospheric information and measured data from other sources to keep the aviation safety in a high level. In these days the increasing of accessible the higher resolution aviation meteorological information (better ones in their quantity and quality)

and rising the costs of the airborne weather reconnaissance flights mean the mentioned 3D measurement flights are very curious now.

In the Hungarian practice of military aviation the airborne weather reconnaissance flights were supposed to get some important meteorological information about the relevant parts of the airspaces before the beginning of training flights. During the mentioned weather reconnaissance flights the pilots permanently reported the measured and sensed atmospheric data with the exact 3D position by radio. The mentioned reports contained the followings:

- ➔ the shapes and quantities of the clouds, the ceiling and cloud base level and the number of cloud layers;
- ➔ the presence of dangerous meteorological phenomena and their 3D positions;
- ➔ the visibilities of the important orientation points during take off and landing;
- ➔ the values of the temperature, wind speed and wind direction in the given layer of the atmosphere.

After landing with the participation of recon pilots, aviation meteorologist and the commander of training flight they evaluated the measured and sensed data gathered by the pilots and they decided to execute (or not) the proposed training flights, at all [13]. On the other hand we have to note this kind of data acquisitions which were very expensive and the qualities of the gathered meteorological information which was not often enough appropriate because these airplanes were unequipped with the high-quality special meteorological sensor systems, too.

As we mentioned earlier an airborne weather reconnaissance flight with the manned aircraft is very expensive. For example, the predicted cost of a flight with the EUFAR (European Facility for Airborne Research) BAE-146 medium size special meteorological aircraft is about 13,000 EUR hourly, except that the huge amount of its buying price. Moreover this airplane uses about 2000 kg fuel hourly and it is a well-known significant environmental pollution, too. If we assume a two-hour reconnaissance flight with the mentioned aircraft we can calculate about 8,000,000 Ft cost in this case. On the other hand the maintenance costs of the similar aircraft system are also very high and it requires some well-trained persons, special repair instruments, too. There is an other important and problematic fact in the applying such larger, manned meteorological aircraft: this aircrafts must use a given airport or airfield during its missions thus the flexibility of the mentioned meteorological flights are not often sufficient and it means other additional costs for this missions, too.

However in these days – thanks to the results of the worldwide technical revolution – there are real possibilities to application of smaller unmanned aircraft systems for airborne weather reconnaissance because their prices and maintenance costs are low enough and they can use very flexible during their missions [14]. On the basis of the mentioned facts – in order to promote the aviation safety with the special regard to atmospheric dangers – it is seen essential that the application of some cheap UASs which are able to real-time 3D airborne atmospheric monitoring nearby given airports or airfields. In our opinion the applied UAS has to be mounted with an appropriate automatic pilot, a complex special meteorological sensor system and a surface control unit which is able to receive, show and process the measured atmospheric data in (near) real-time mode.

The airborne weather reconnaissance thus basically means a detailed monitoring of a given part of the atmosphere along a pre-determined 3D flight path and time interval. During the mentioned mission the measured data and their positions are received by the surface control unit during the

whole mission. Using the measured and sensed atmospheric data the surface control unit can draw different graphs and cross sections with the special regards to temperature, relative humidity, wind speed and wind direction, too. On the other hand with the gathered meteorological data people are able to evaluate the actual weather situation and they can draw conclusions about the presence, intensity or latter development of dangerous atmospheric phenomena such as turbulence, windshear and airframe icing. It is important to note the mentioned basic atmospheric information will become the significant part of the actual weather briefing immediately, so they are going to be fundamental during the planning and executing of flights, too.

Of course, the above mentioned application of airborne weather reconnaissance flights are not an ad-hoc procedures at all but they have to be well-planned operations and the execution of them is based on a well-developed methodology which has to contain a detailed information about the applied UASs, the special onboard meteorological sensors, the flight planning and execution and the methods of evaluation and processing of measured and sensed data. In the following two chapters we are going to discuss the mentioned questions in detail.

METEOROLOGICAL ASPECTS OF THE AIRBORNE WEATHER RECONNAISSANCE

On the applied onboard meteorological sensor systems

There is a very important question: what kind of meteorological sensors have to be mounted on the board of an airborne weather reconnaissance UAS? It is obvious on the one hand we have to measure the basic state variables of the atmosphere and on the other hand we also have to give exact information about the actual atmospheric motions, too. Accordingly on the board of a weather reconnaissance UAS we have to install some sensors which are able to measure temperature, air pressure and atmospheric humidity (for example relative humidity or dew point temperature) with a given accuracy (these sensors are the basic ones). Obviously the airborne weather measurements during flights happen with various airspeeds thus the mentioned sensors are able to measure the given values of the different state variables with a high frequency. Therefore we feel it necessary to apply such sensors they can work with the frequency interval between 1 Hz and 10 Hz at least. It is very important to know in the case of the special airborne atmospheric measurement (for example during the planetary boundary layer monitoring) we have to apply faster sensors with the frequency of 100 Hz. In addition these sensors often have to use in the atmospheric environment with a wide range of temperature (between -20°C and $+40^{\circ}\text{C}$) thus the working of onboard ones must be guaranteed near this environmental conditions, too.

There are three fundamental methods to determine the main characteristics of the atmospheric motion (wind speed, wind direction and turbulence):

- ➔ the calculations are based on the difference between the motions of aircraft and atmospheric air;
- ➔ application of a special small wind speed and direction measurement device;
- ➔ with the help of a five-hole Pitot-probe [15].

In the case of the first method to determine the wind characteristics we need to use other onboard measured data (GPS positions, airspeed and acceleration values) and with the help of

them we can calculate the 3D wind vector in near real-time. Of course there are some usable calculation methods to prepare the exact wind characteristics [16].



Figure 1. Sonic anemometer is mounted on the nose of the Golden Eagle UAV [17]

Certainly we can apply a special 3D wind measurement instrument (sonic anemometer) or a five-hole Pitot-probe on the board of an aircraft in order to determine the wind vectors directly during the flight. We have to note in the latter case there is a possibility to direct measurement of atmospheric turbulence, too [15]. Nowadays we can use small, lightweight sonic anemometers which can be mounted on the board of a smaller UAS and these sensors were applied in a similar situations. As we can see in Figure 1 a Golden Eagle UAV has the sonic anemometer on its nose [17]. Thanks to the newest developments the smallest sonic anemometer is shorter than 100 mm and not heavier than 0.05 kg thus very applicable on the board of a smaller UAV, too (TriSonica™ Mini Solid State Wind System). This sensor is able to work in a wide range of temperatures (between -25°C and $+80^{\circ}\text{C}$). The signed sonic anemometer can measure the wind speeds and wind directions between 0 and 30 m/s and between 0 and 359 degrees, respectively. The accuracy of the mentioned device is 1 degree in the case of wind direction and 0.5 m/s in the case of the wind speed, thus this is a practical and a well-useable device (Fig. 2).

In our eyes an airborne weather reconnaissance UAS is mounted by the mentioned basic meteorological sensors is able to give us the fundamental informations about the instantaneous state of the atmosphere and its payload is small and light enough to use them in the case of a smaller UAS, too. Of course the application of a five-hole Pitot probe or sonic anemometer can increase the reconnaissance capabilities of the given UAS but the heavier and often larger meteorological payload can modify some important flight characteristics (for example larger weight, smaller altitude and range etc.).

After that we have to discuss an important issue about the measuring accuracy in the case of airborne atmospheric monitoring. In the bases of the earlier scientific researches of airborne weather measurement we can state the sensors are mounted on the board of an aircraft have to give the following accuracies:

- ➔ in the case of temperature measurement the mentioned value will be between 0.1–0.3;
- ➔ during the air pressure and relative humidity sensing we have to apply minimum 0.2 hPa and 3–5% accuracy values, respectively;

- when we determine wind speed and wind direction the necessary accuracy values will have to be 5–10 grad and 1 m/s, respectively.



Figure 2. The TriSonica™ Mini Solid State Wind System made by Applied technologies Inc. [18]

The above mentioned accuracies are in a good agreement with the earlier airborne missions ones, for example in the work of Scott S. G. et., al. 1990 [19].

There is an additional expectation in connection with onboard meteorological sensors: they have to be fast enough to respond the changing of the atmosphere but this attribute often leads to higher prices of them. The fast response working is very important in the case of temperature measurements because this parameter – taking notice of the airspeed of the aircraft – can change abruptly in vertical direction when the aircraft flights across an inversion layer of the troposphere. [20] In Hungary during some earlier experimental airborne measurements we also applied temperature and relative humidity sensors with 1–10 Hz frequency. (Vaisala HMP50 T-RH combined sensors [1 Hz], Texas Instruments TMP102 T sensor [10 Hz] és HIH-4030 RH sensor [10 Hz]) [21]. Certainly these sensors were successfully applied on the other UAS (for example as we can see the HMP50 application in the work of De Cook et., al. 2013. (Fig. 3) [22].



Figure 3. The Vaisala HMP50 combined T-RH sensor on the board of the different meteorological UASs. New-Zealandian (left) and Hungarian experimental applications [21][22]

It is worthy of note the possibility of applying the complete radiosondes like the combined onboard sensor system of the weather surveillance UASs. The radiosondes – which are able to measure the air temperature, air pressure and relative humidity with high accuracy and people generally used them with balloons – can be applied like the atmospheric sensor system on the

board of the mentioned UASs. We think this future experimental applications of radiosondes will play an important role in the airborne weather reconnaissance development (Fig. 4).

The radiosondes have two important advantages because they are lightweight (with 0.1–0.2 kg) and their accuracy is absolutely enough for the atmospheric monitoring. Otherwise in order to receive their atmospheric data we have to apply a special receiver unit during a general radiosonde measurement. In our opinion if we are able to somehow process and integrate the measured weather data gathered by the radiosonde on the board of the aircraft, the radiosondes can be the useful back-up systems of the primary meteorological sensors. In Hungary there were some successful experiments with the application of radiosonde which was mounted on a given meteorological UAS, like the onboard meteorological sensor system [21].



Figure 4. The Graw DFM09 radiosonde and its sensors and antenna [23]

On the basis of the above discussed things we can state that the weight of payload (the complete meteorological sensor system and its accessories) of a weather reconnaissance UAS is about 10–30 N thus the usable fixed- and rotary wing unmanned aircraft needs to be able to carry at least this kind of payload. It is very important to know how we are able to mount this sensors on the board of aircraft with the special regards to position of the center of gravity of the UAS and the airflow of sensors, too.

After that we have to speak about the meteorological datalink between the aircraft and the surface control unit. The users would like to use the atmospheric data immediately accordingly the appropriate solution is the using of a reliable radio connection between the two units. Regarding to the existent datalink between the aircraft and surface control unit (two-way telemetric data connection often in the ISM frequency range) we can use this datalink to transmit the atmospheric data, too. Of course there is an important limitation of this solution: this is the bandwidth of the mentioned datalink. Thus the chosen and applied UAS is going to determine the application of this method of meteorological data transmission. Additionally, in order to give some information about the type of the applicable weather reconnaissance UASs we have to declare the range and duration of their missions, too.

The dimensions of the airborne weather reconnaissance flights

The main task of the airborne weather reconnaissance flights is observing, measuring and sensing of the atmospheric motion systems which belong to meso- and micro-scale ones described by Orlanski (Fig. 5). The mentioned systems (windshear, turbulence and airframe icing which is connected the clouds) are located inside of the blue rectangular. It means their

characteristic horizontal dimensions are about between 100 m and 50 km and their lifetimes are about between seconds and 3 hours. Albeit the important motion systems work in the whole troposphere we only focus on the lower atmospheric layers (approximately in the lower 3000 meters) in our work. In the near zone of an airport this layer is the most important to be observed because the complicated procedures of the take-off, final approach and landing generally happen in this atmospheric region.

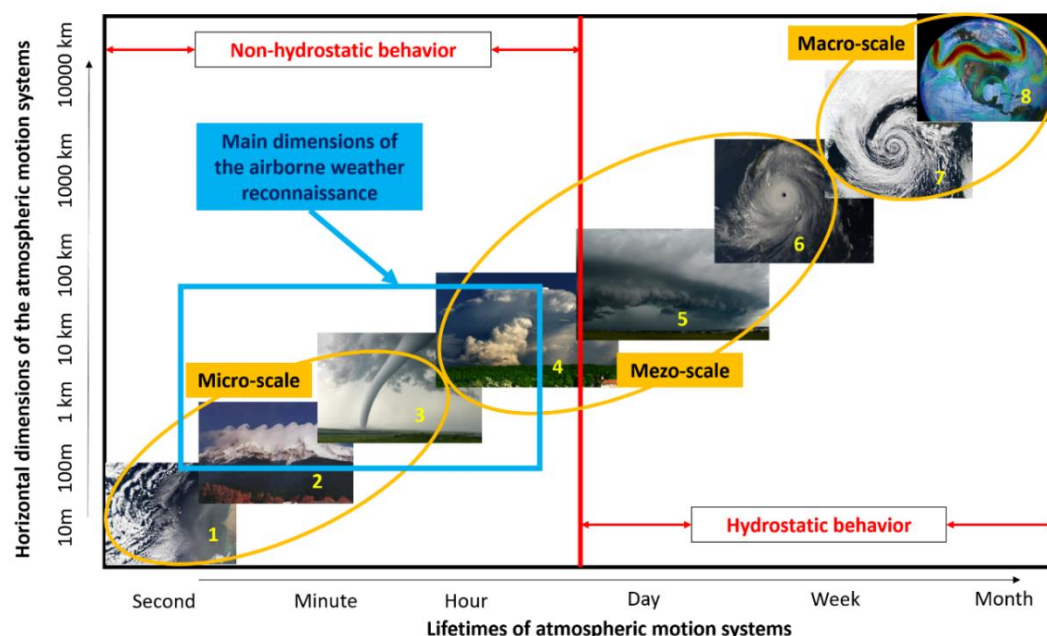


Figure 5. Relationship between the lifetimes and horizontal dimensions of the atmospheric motion systems

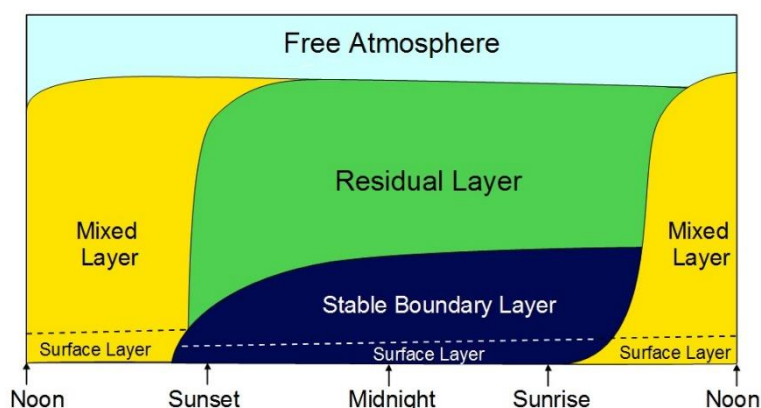


Figure 6. The basic structure of the planetary boundary layer [24]

There is another rational meteorological cause for the upper limit of 3000 meters in the troposphere during the reconnaissance flights: the upper layer of planetary boundary layer (PBL) is generally located significantly below this mentioned 3000 meters height though in winter and summer and day and night the PBL has the different upper limit in the atmosphere. Inside of PBL the surface as the thermal and mechanic forcing appears and its effects modify the free atmospheric motions on the different time-scales. The planetary boundary layer has two main parts:

- ➔ a near-surface layer where the vertical turbulent stream flows are mainly constant and in this layer the vertical profile of the wind speed is approximatively logarithmic;

- an Ekman-layer, where three forces – the pressure gradients force, the Coriolis force and the turbulent friction force which is in proportion to vertical windshear changing – generate the atmospheric airflows.

In the daytime convective PBL the thermal and mechanical forcings, but in the night-time PBL the mechanical turbulence are the most important factors in the form of the vertical distribution of meteorological parameters (Fig. 6). The 3D observation of the PBL, the determination of its upper limit and the measure and sense the atmospheric state in this layer give some significant information for the weather forecasters and modelers, too.

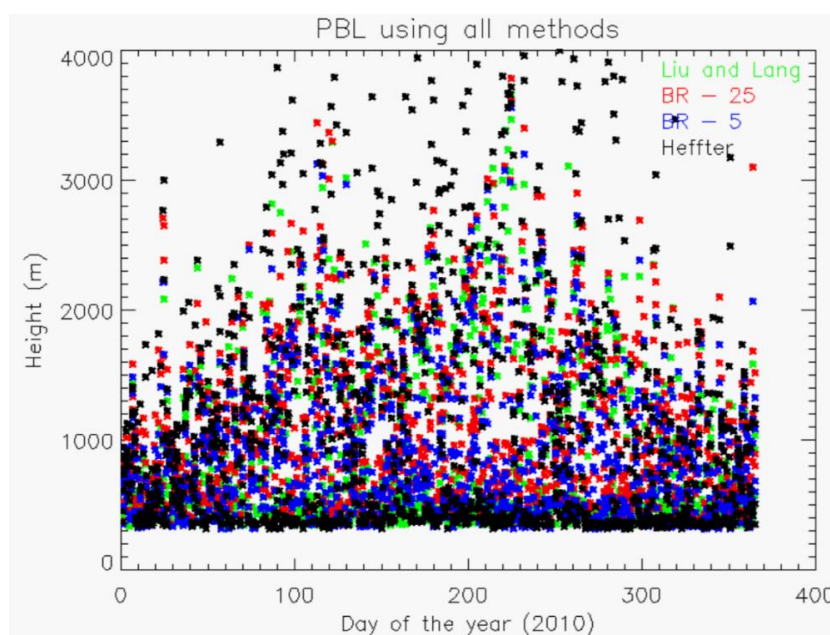


Figure 7. Time series of planetary boundary layer heights during the 2010 year. The height is measured from above sea level (ASL) [25]

After that we have to focus on a very important question: where can we find the top of the planetary boundary layer exactly? There are some different methods to determine the maximum height of the PBL. In our work we show a time series of planetary boundary layer heights during the 2010 year are derived from the worldwide radiosondes data. This PBL height values are computed with the help of different methods which are described in Sivaraman et., al. 2013. (Fig. 7) [25]. As we can see on the Fig 7. during the whole year the PBL heights were mainly below 3000 meters and the mentioned heights were higher in the summer period only. It means the above mentioned upper limit of 3000 meters for the airborne weather reconnaissance flights is absolutely enough to observe the whole PBL.

On the bases of the above mentoned facts a first approximation of the spatial dimensions of the weather reconnaissance flights – in horizontal and vertical directions – are 10–30 km and 0–3 km, respectively. In the case of the prediction of time duration of the mentioned flights we took notice of the characteristics lifetimes of the mezo- and micro-scale atmospheric motion systems thus the needed flight times are between 0 and 3 hours. As it can be seen the spatial and temporal dimensions of the airborne weather reconnaissance flights have been determined and it is based on the environmental and sensor-specific expectations exclusively.

TECHNOLOGICAL QUESTIONS OF THE AIRBORNE WEATHER RECONNAISSANCE

Technological expectations are in connection with the applicable UASs

In the previous chapter we determined the 4D ranges of the airborne weather reconnaissance flights. These ranges are vital/critical for us to be able to choose the most appropriate UAS for such a mission. On the other hand we do not have any information yet about the size and maximum take-off weight of the applicable unmanned aircraft. In order to give an appropriate answer in the mentioned question we have to make a prediction in the case of fixed-wing UAS. Our simple approach is based on the work of Tennekes, 1997 [26]. On the Fig. 8 we can find the „Great Flight Diagram” and this picture show us the general relationship between wing loading and weight of the flying objects. This figure contains the flying objects from insects to the big airplanes and their location shows the strong connection between the mentioned factors. The lower horizontal axis represents the airspeed (V), the upper one shows the wing loading (W/S) and the vertical axis signs the weight (W). It is clear there is a strong stochastic relationship – on the one hand - between the airspeed and weight and – on the other hand – between the wing loading and weight, too. The exact stochastic relationships are the followings:

$$W = 0.5C_L\rho SV^2 \quad (1)$$

$$W = 0.3\rho SV^2 \quad (2)$$

$$\frac{W}{S} = 0.38V^2 \quad (3)$$

$$\frac{W}{S} = k\sqrt[3]{W} \quad (4)$$

$$S = bc \quad (5)$$

where ρ , C_L , S , b , c and k are the air density, the lift force coefficient, the area of wing, the wingspan, the chord of wing and a constant, respectively. The (1) equation represents the equilibrium between the weight and lift force during the steady level flight. The (2) and (3) relationships are the simplified versions of the (1) equation assuming the angle of attack is small (about 6°) and the level of flight is located near the surface. In the case of (4) relationship we can note this is an empirical one, where the k is a constant coefficient but this is varies inside the whole spectra of the sizes. In Tennekes's opinion the value of the k is 0.25 in the case of the seabirds. The smaller UASs have 0.47 value of the k on the base of the work of Pisano and Lawrence [27]. The relationship between the wingspan and the maximum take-off weight (MTOW) can be seen in the (6) equation which is applicable with the larger and piston engine aircrafts [28].

$$S = 1,041W^{0.382} \quad (6)$$

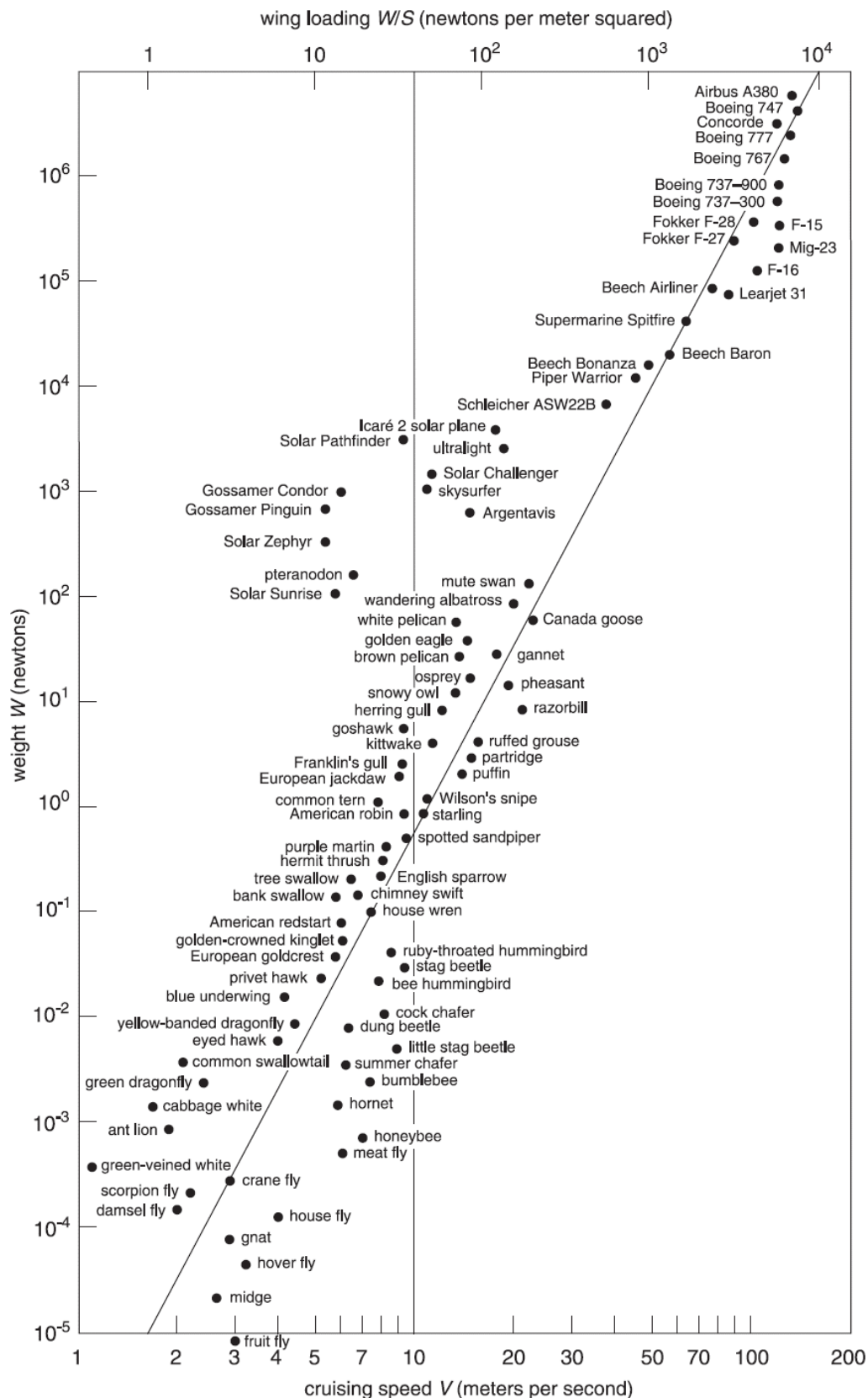


Figure 8. The Great Flight Diagram [26]

It is clear that the weight of an aircraft is a very important factor thus our prediction started from this point, too. In order to determine our unmanned aircraft size we have to take to notice the weight of the payload which are discussed earlier. The meteorological sensor systems have

about 10–30 N weight as we described. The next question is the following: what about the MTOW if we would like to use an unmanned aircraft with the given payload weight? Using the UAS we can find a good approach: the payload generally five-times smaller than the MTOW so it is about 15–25% of the MTOW (for example in the case of ELBIT Skylark-I-LE fixed-wing aircraft this value is 17% and at the Microdrones md4-1000 rotary-wing aircraft it is 22%). After that we are going to apply the 20% value and the 30 N payload in our predictions so the reasonable MTOW will be 150 N. Using the (2), (3), (4), (5) relationships the predicted wingspan is $S=3.0$ meters and with the using of (6) equation the same parameter's value is $S = 5.5$ meters. We can state applying a 30 N payload the necessary wingspan is about 3 and 5 meters if we would like to use a fixed-wing unmanned aircraft.

On the base of (3) it is clear we are able to give an adequate prediction to the usable airspeed of the unmanned aircraft, too. Under the earlier conditions with 30 N payload the calculated cruising airspeed is 25.6 m/s. Using this value of the cruising airspeed the duration of the flight in the case of the maximum range of 30 km is 20 minutes only. It is obvious during a flight missions the airspeed is not a constant value because there are flight phases with a smaller airspeed thus the flight time of the whole mission will be much higher than 20 minutes. We can state the duration of the flight missions will be about minimum 30–40 minutes. The mentioned calculation regards to the fixed-wing unmanned aircraft only.

Of course we can apply an unmanned aircraft like an airborne weather reconnaissance system with a fixed- or rotary-wing, too. The fixed-wing aircraft are able to execute the long range flights along a planned complex 3D flight path with the special manoeuvres and they can make some final approaches to a given airport too. During their missions the heights of flight will be between near surface and about 3000 meters (Fig. 9).



Figure 9. A fixed-wing meteorological UAV with its atmospheric sensors on the ice sheet of Antarctica [29]

It is very important the weather reconnaissance unmanned aircraft have to be mounted onboard automatic pilot system which can manage to the aircraft during the whole mission along the pre-planned flight route with strong stabilities. There is another important expectations against the automatic pilot systems: the 3D flight routes will be easily edited and we are able to upload it rapidly to the board of the aircraft. It is needed because of the pre-planned flight route can be modified by the changing of the given weather situation. The accurate navigation during flight

is based on the high resolution GPS system and the onboard control system will be able to manage the special and/or dangerous flight situations, too. The control system has to permit to a safe descending (for example with the help of a parachute) in the case of a serious malfunction of the system when the aircraft can not keep doing its flying after. On the other hand if the connection between the aircraft and the ground control system lost there will also be an automatic, safe go-home flying function, too.

Primarily the rotary-wing unmanned aircraft can be applied in the measurement of the lower troposphere (below 1000 meters) to determine the atmospheric profiles of the important state variables because this aircrafts are able to fly vertically above a given surface point and during their flight they can measure this values. There is a big advantage of this measurement method: during this vertical flights the rotary-wing aircraft do not disturb the other ones because the horizontal range of their missions is absolutely minimal. However the sounding of the lower troposphere (with its PBL) is very important in summer (with atmospheric convective state) and winter (with mainly stable atmospheric state), too.

Regarding to propulsion of the unmanned aircraft we can apply electric or liquid fuel engines. Taking account of the applicabilities of the modern high capacity batteries the electric propulsion seems to be better than other solutions. Because of the exceeding reliability and high power of the brushless electric motors we think this is a best choice for the propulsion of a weather reconnaissance UAV. To give a high amount of energy for this engines we can use Lithium-Polymer (LiPo) batteries (Fig. 10).



Figure 10. A standard Lithium-Polymer accumulator pack with two cells and its technical specifications on it [30]

The rated voltage of the cells of mentioned LiPo batteries is 3.7 V and we can give the rated voltage of the whole battery from the number of the cascading cells (for example on the Fig. 6 there are two cells so the rated voltage of the battery is 7.4 V). The above mentioned batteries have some advantages and they are the followings:

- ➔ high rating density;
- ➔ long lifetime with the workmanlike usage;
- ➔ the voltage of the battery is balanced;
- ➔ the maximum current intensity is very high;
- ➔ the time of recharging is short enough.

Of course during the usage of the LiPo batteries we have to take notice the next:

- ➔ because of their structure we have to protect them from strong strike. In the case of damage of this batteries they can burst into flames immediately;

- it is important to know we must not charge and discharge them over (the basic rule of thumb: the maximum discharging is about 80% of the capacity of the battery);
- when we would like to store the LiPo batteries during a longer period without using them we can keep their charging level at about 50%.

We also have to note that the inside temperature of these batteries must be below +80 °C (it is about +60 °C surface temperature) otherwise the structure of them is going to be irreversibly damaged. When the environmental temperature is about +20 °C the capacity of the batteries is maximal but with the increasing or decreasing of temperature the capacity of LiPo batteries will be significantly smaller (for example at -20 °C temperature the mentioned capacity is about 60–70 % of the capacity at +20 °C). Using the adequate electric motor and LiPo battery the maximum flight time is about 1.5–2.0 hours and if we apply a strong electric shielding the working of the onboard sensor systems will be well undisturbed. There is an important additional benefit of the electric propulsion: against other engines using the electric one there will not be a strong vibration during flights, at all.

Nowadays there are some small and lightweight UASs which are cheap enough and their flight performance is sufficient to use them for the weather reconnaissance aircraft near the above discussed requirements. Nevertheless there are two additional aspects which are very important to application of the mentioned unmanned aircraft:

- the stability of the applied UAS is based on the relationship between its size and the intensity of expected atmospheric turbulence;
- the used unmanned aircraft must be able to flight in clouds safely.

The questions of the atmospheric turbulence and the flying in the cloud

We also discussed earlier the relationship between the size of atmospheric motion systems and their lifetimes. The evolving horizontal and/or vertical motions in the atmosphere are turbulent ones but of course it depends on their speed and the friction. In the case of this kind of motions the environmental characteristics of the atmosphere (air pressure, velocity, etc.) change abruptly and their changing are absolutely chaotic with the appearing of vortices [31]. In the region of smaller velocities the airstream has laminar flow but with the increasing of the velocity it will be abruptly turbulent one as we can see in Fig. 11.

There are two main types of atmospheric turbulences are based on their formations:

- thermal turbulence: this type of turbulence is based on atmospheric convective processes;
- mechanical turbulence: this type of turbulence is based on atmospheric windshear processes.

Both of them have significant velocities but the thermal turbulence appears rather in the lower troposphere and the mechanical one can be detected in the whole troposphere. We have to note the friction layer near the surface significantly influences the intensity of the turbulences because this layer meets surface obstacles (this is a main cause of the logarithmic increasing of the wind speed with the height). It follows that near the surface we can often observe strong turbulences during the flight.



Figure 11. Laminar and turbulent flows with their vortices [32]

One of the most important expectation against the airborne weather reconnaissance UASs is: the stability of their flights that is they have to keep their pre-planned flight route during their mission. Of course the atmospheric turbulence has an effect on the aircraft and the UAV reacts on it. While the turbulent perturbations are small the aircraft can keep well its balance but when the mentioned effects are strong enough the UAV is not able to manage its state alone: the remote or automatic pilot must take control otherwise the aircraft may remain unstable or crash.

We can represent the degree of atmospheric turbulence with the difference between the average and maximum of windspeed during a given period. It is obvious with the increasing of the average windspeed the airflow will be highly turbulent. If we would like to predict the appropriate size of an unmanned aircraft with the special regard to its stability along the longitudinal axis we have to give a simple solution after.

In our present work the prediction is based on the method of Klipp and Measure. Our calculations regard on the fixed-wing unmanned aircrafts only [33]: „Suppose that force ma corresponded to an uncompensated torque of $\tau = mab/5$, where b is the wingspan, and further assume that the relevant moment of inertia was $I = mb^2/10$ (compare a solid cylinder of diameter d at $md^2/8$). Then angular acceleration α is given by

$$\alpha = \frac{\tau}{I} = \frac{\left(\frac{mab}{5}\right)}{\left(\frac{mb^2}{10}\right)} = 2 \frac{a}{b} \quad (7)$$

So for a $b = 20$ cm wingspan and acceleration $a = g = 9.8$ m/s², $\tau = 98$ radians/s², if which uncompensated for 0.1 s leads to a roll of 28°. Turbulent variations in wind speed and direction also result in changes in the lift force. A resulting linear acceleration of 1g uncompensated for 0.1 s produces a displacement of 4.9 cm. The displacement becomes 4.9 m if the acceleration is uncompensated for a full second.”

On the Fig. 12 we can see the relationship between the wingspan of unmanned aircraft and rolling of the same aircraft. This picture exactly shows the values of the rolling of the aircraft (assuming 1g acceleration and 0.2 s uncompensated period) as a function of wingspan. It is clear with the increasing of the wingspan there is a significant decreasing of the rolling value which is caused by the atmospheric turbulence thus the stability along the longitudinal axis will be much higher.

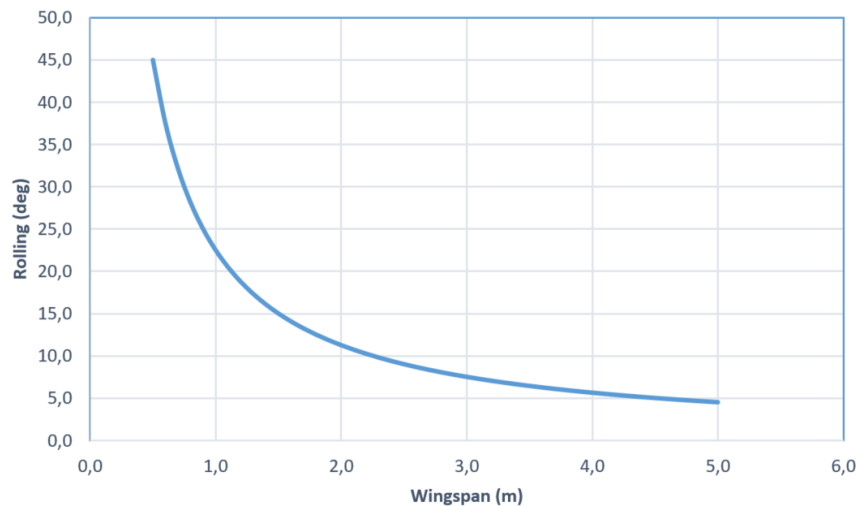


Figure 12. The values of the sudden rolling as a function of wingspan in case of a strong turbulence during UAS flight. The applied acceleration and uncompensated time were 1 g and 0.2 s, respectively

On the base of the mentioned prediction we can state the wingspan of an applicable unmanned aircraft have to be at least 2–4 meters in the interest of the higher stability. Moreover in the range of the mentioned wingspans the unmanned aircraft are capable of flying with 10–30 N payload and they can fly during 1–1.5 hours without landing, too. On the other hand the using of UASs with the smaller wingspan (1 meter or smaller one) is not suitable for weather reconnaissance.

During the airborne weather reconnaissance missions in the clouds the aircraft impinge the small cloud droplets which are in liquid or solid state. Due to this process on the surface of the aircraft we can observe a thin liquid water layer. This layer can not significantly influence the flying itself but in that case the water can get inside the fuselage and can cause strong corrosion effect. Hence we have to apply a strong lining procedure on the surface of the fuselage. This is also important in the case of protection of the onboard electronic equipments, too.

During the flight in the clouds we can often observe supercooled liquid droplets if at the flying level the ambient temperature is below 0 °C. In this atmospheric situation on the surface of our aircraft we can find ice contamination. Because of the lack of anti-icing equipment on the board of the unmanned aircraft it is a highly dangerous situation. Unfortunately the shape of the leading edge of these unmanned aircraft (with high curvature) are suitable for help this icing process well. During such icing processes the amount of accreted ice will be huge on the fuselage. The order of magnitude of weight of accreted ice will be the similar to the order of magnitude of the aircraft weight, after 15–30 minutes [34]. In order to avoid such dangerous weather situations we always have to analyse in detail the atmospheric conditions prior to take-off.

Finally we also have to note there are strong vertical motions inside the convective clouds with the 5 – 10 m/s velocities but in the case of thunderstorms it can be 30 m/s with significant turbulence and vortices, too. Thus with the unmanned aircraft must not fly into this kind of clouds because their structure can be damaged and they may crash. This kind of aircraft have large wing area related to their fuselage so the mentioned strong motions can break off the wing during the penetration of a thunderstorm.

THE APPLICABLE AIRBORNE MEASUREMENTS MANOEUVERS AND FLIGHT PLANNING

The applied flight manoeuvres during the airborne atmospheric measurements

During a weather reconnaissance flight a given applied unmanned aircraft have to execute its mission along a pre-determined 3D flight route. Depending on the types of measurements we need to use some special flight manoeuvres in the lower troposphere which are the followings:

- straight level run;
- ascending/descending profile;
- missed approach near the airports and airfields;
- stepped profile descent;
- sawtooth profile;
- combined L pattern flight;
- racetrack flight;
- reciprocal runs.

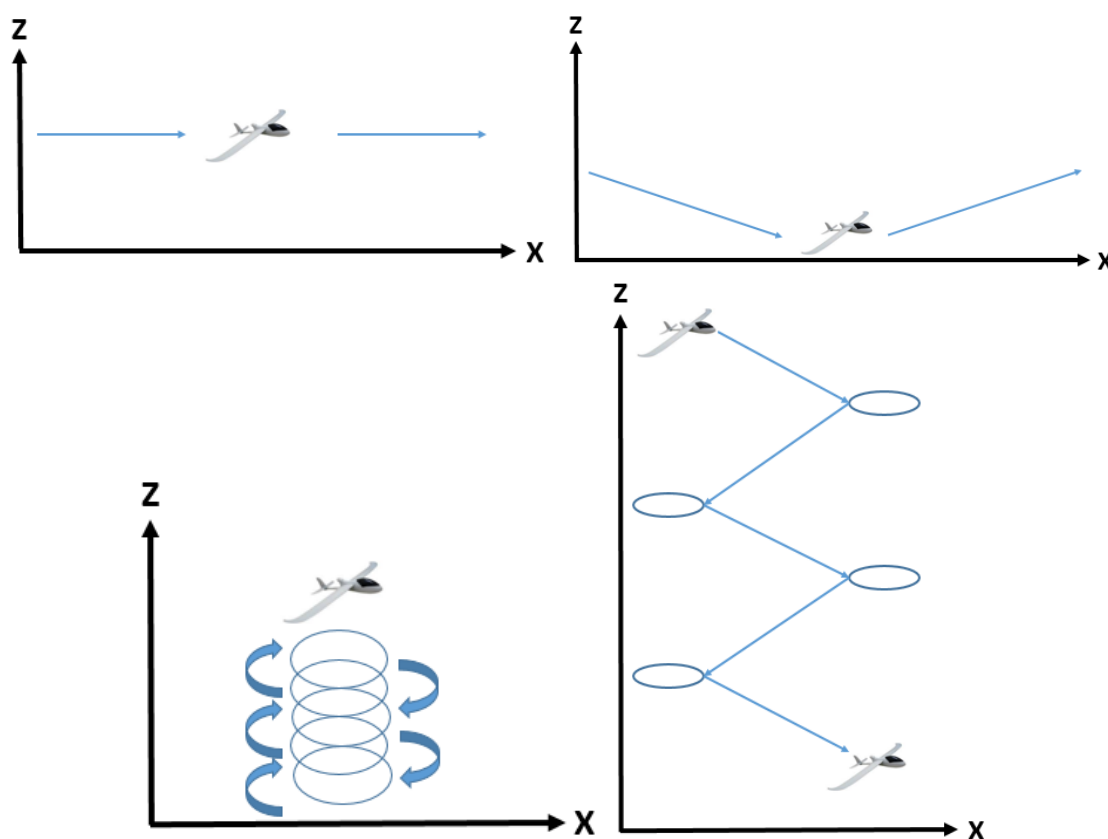


Figure 13. The applied measurements flight manoeuvres during airborne weather reconnaissance. Upper left: straight level run; Upper right: missed approach; Bottom left: ascending/descending profile; Bottom right: stepped profile descent

The straight level run flight mode is suitable to determine the physical state of a given atmospheric layer. During this manoeuvre the airspeed is generally constant. Using this flight mode (because we have enough time to investigate his layer) we are able to determine the average values of the state variables at this level, too (Fig 13.).

The knowledge of the vertical profiles of the basic atmospheric parameters play an important role in the making more accurate predictions about the convection. Because of this fact during an weather reconnaissance flights we often have to apply such manoeuvres can be seen on the bottom left of Fig. 13. These are ascending and descending spiral motions with an arbitrary vertical speeds. In the case of an ascending spiral motions we often use 3–5 m/s vertical speed because of this ascending has the same characteristics like radiosondes' ones (thus the measured data which are derived by aircraft and radiosondes will be comparable each other). Near the airports where the air traffic is more intensive flight patterns are often used such as the missed approach and stepped profile descent (Fig. 13). Using the latter three measurement types the unmanned aircrafts are able to exactly determine the atmospheric profiles and vertical gradients of the given atmospheric parameters during the flight.

There is an essential role of the sawtooth profile among the mentioned flight manoeuvres with its special shape (Fig. 14).

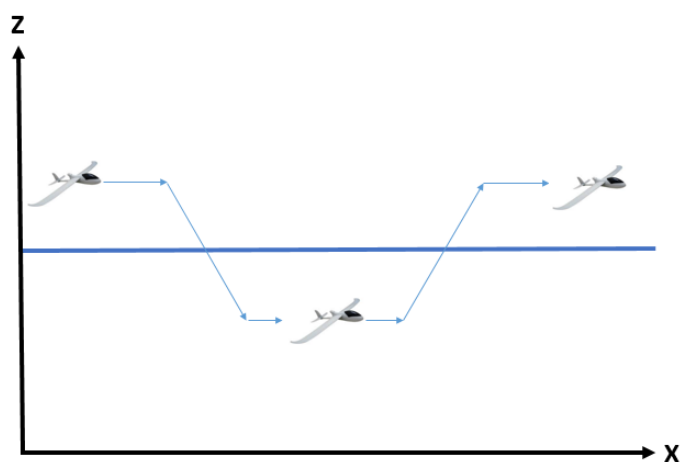


Figure 14. The sawtooth profile measurement technique

This little bit complicated manoeuvre is applied when people would like to measure the atmospheric layers above and below a given important level. There are three very important layers when we can use this sawtooth profile successfully which are the followings:

- thermal inversion;
- planetary boundary layer (PBL)
- the freezing level (0 °C temperature height).

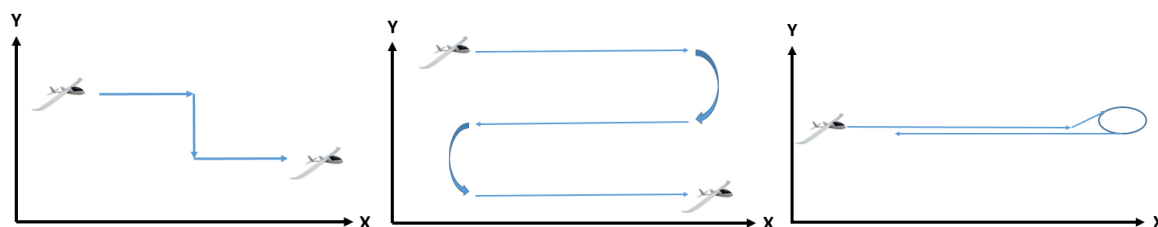


Figure 15. Left: combined L pattern flight; Center: racetrack flight; Right: reciprocal runs

If we would like to measure in a given, constant height of the troposphere but over the large surface area we can apply the combined L pattern flight, the racetrack flight and the reciprocal runs manoeuvres (Fig. 15). These flight patterns are also applicable in the case of the airborne photometry.

On the planning and executing of the airborne weather reconnaissance flights

The airborne weather reconnaissance flights are not ad-hoc ones thus they have to be well-prepared. In our recent work we discuss this question but now we do not give a detailed information about it because in our later work we are going to do it. The whole flight support contains the planning and executing of the flight itself and the evaluating of the measurements and telemetric data are gathered by the aircraft during the missions. The mentioned problem is described in the work of C. D. Benedetto et. al. [35].

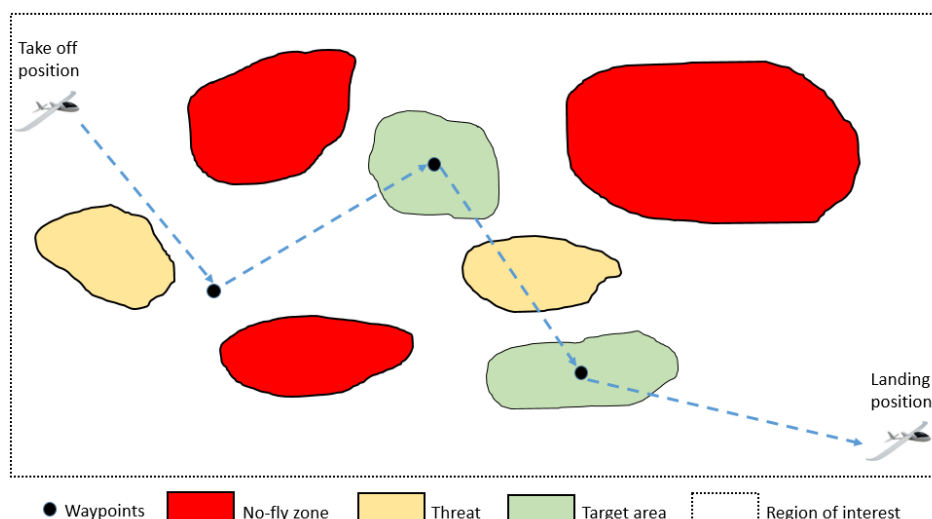


Figure 16. Two-dimensional schematic picture of a given UAS flight route during an airborne weather reconnaissance. Source: modified by the author after [35]

The pre-planning process of the flight have to contain the following procedures:

- ➔ the marking of the region of interest (ROI) zone, the target areas, the take-off and landing positions inside the ROI and the exact time of the take-off;
- ➔ the getting in of the necessary flight permissions over the ROI (for example in these days, in Hungary we can fly with an UAS inside a segregated airspace only);
- ➔ the determination of the No-fly and other dangerous zones;
- ➔ the specifying the measurement and sensing types are applied during the flight and the selection of the applicable sensor systems;
- ➔ the determination of the whole flight route with its flight time interval and the giving of the points of the flight path;
- ➔ the describing of the needed flight procedures in the case of emergencies.

Tasks prior to take off are the next ones:

- ➔ we have to prepare our aircraft systems to flight and this procedure is based on their user manual;
- ➔ we have to verify the fuel quantity (in the case of electrical propulsion it means the checking the battery charging);
- ➔ we have to upload the points of flight route to the automatic pilot system memory and we have to check the consistency of them;
- ➔ we have to verify the radio connection between the control system and aircraft;
- ➔ we have to analyse the given weather situation and have to make a decision in connection with the beginning of the flight.

After a successful flight it is needed to evaluate the measured and telemetric data of the aircraft, too. The given experiences can give good possibilities in the planning and executing the airborne weather reconnaissance flights next time.

SUMMARY

In our work we discussed the general theoretical problems of the weather reconnaissance flights. We found out that the state-of-the-art meteorological support belongs to public service flights have to contain the airborne weather reconnaissance information which can give the following advantages:

- ➔ this data originated from the board of an aircraft can help to improve the quality of our numerical weather products;
- ➔ the measured and sensed data are able to give exact information about development and locations of the dangerous weather phenomena;
- ➔ there is a real time possibility to compare the predicted and forecasted data along the whole flight path.

We also stated the expectations in connection with the meteorological sensor system of a weather reconnaissance aircraft. It seems to be a good decision applying the following parameters: the measurements frequency can be 10 Hz (sometimes 100 Hz) the accuracies are 0.1–0.3 °C, 0.2 hPa and 3–5% in the cases of temperature, air pressure and relative humidity, respectively. During the wind measurements the accuracy of the wind direction and wind speed is 5–10 grad and 1 m/s, respectively. The predicted weight of used sensor system and its accessories is about between 10 and 30 N.

On the base of our investigation the physical dimensions of the mentioned flights are 20–30 km in horizontal and 0–3 km in vertical ranges and the minimum needed flight time is about 0–3 hours. We can suggest for the wingspan of the applicable UAV about 3–5 meters and in our opinion the best choice is: an electric propulsion with at least 1 kW engine power and 18–25 Ah capacity of LiPo battery. Using some scientific work and our calculation we stated if the wingspan is 2–4 meters the used unmanned aircraft has enough stability along its longitudinal axis during the flight.

Finally we showed the most important flight manoeuvres which can be applied in the airborne measuring of the lower troposphere and also described the more important procedures have to be done before, during and after such kind of flight missions, too.

REFERENCES

- [1] Bottyán Z.: International and Hungarian Applications of Unmanned Aircraft Systems in the Meteorological Researches. Repüléstudományi Szemelvények. No. 2, 2017. pp. 51-74. ISBN 978-615-5845-26-0
- [2] Bottyán Zs.: A repülésre veszélyes mezo-skálájú meteorológiai jelenségek modellezésének aspektusai: Numerikus prognosztikai megközelítés. Repüléstudományi Közlemények, Vol. 21, No. 2, p. 11, 2009. (in Hungarian)
- [3] Bottyán Z, Tuba Z, Gyöngyösi A. Z. Weather Forecasting System for the Unmanned Aircraft Systems (UAS) Missions with the Special Regard to Visibility Prediction, in Hungary. In: László Náday, József Padányi (Ed.) Critical Infrastructure Protection Research: Results of the First Critical Infrastructure Protection Research Project in Hungary. 184 p. Zürich: Springer International Publishing, 2016. pp. 23-34. (Topics in Intelligent Engineering and Informatics; 12.) (ISBN:978-3-319-28090-5)

- [4] Tuba Z. and Bottyán Z.: Fuzzy logic-based analogue forecasting and hybrid modelling of horizontal visibility. *Meteorology and Atmospheric Physics*. pp. 1-13. 2017. DOI: <http://dx.doi.org/10.1007/s00703-017-0513-1>.
- [5] S. MAYER, A. SANDVIK, M., O. JONASSEN, J. REUDER: Atmospheric profiling with the UAS SUMO: a new perspective for the evaluation of fine-scale atmospheric models. *Meteorology and Atmospheric Physics*, (2012) 116 pp.15–26. DOI 10.1007/s00703-010-0063-2.
- [6] J. A. Curry, J. Maslanik, G. Holland, and J. Pinto (2004): Applications of Aerosondes in the Arctic. *Bulletin of American Meteorological Society*. 2004. DOI: 10.1175/BAMS-85-12-1855.
- [7] S. L. Knuth, J. J. Cassano, J. A. Maslanik, P. D. Herrmann, P. A. Kernebone, R. I. Crocker and N. J. Logan. 2013: Unmanned aircraft system measurements of the atmospheric boundary layer over Terra Nova Bay, Antarctica. *Earth System Science Data*, Vol. 5. pp. 57-69.
- [8] T. Spiess, J. Bange, M. Buschmann and P. Vörsmann (2007): First application of the meteorological Mini-UAV 'M2AV'. *Meteorologische Zeitschrift*, Vol. 16, No. 2, 159-169 (April 2007).
- [9] Lin, P-H and Lee, C-S. (2008): The Eyewall-Penetration Reconnaissance Observation of Typhoon Longwang (2005) with Unmanned Aerial Vehicle, Aerosonde. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*. Vol. 25., pp. 15-25.
- [10] Marius, O.J, Ólafsson, H., Ágústsson, H., Rögnvaldsson, Ó., and Reuder, J., 2012: Improving High-Resolution Numerical Weather Simulations by Assimilating Data from an Unmanned Aerial System. *Monthly Weather Review*. Vol. 140, 3734–3756.
- [11] Tuba Zoltán, Kardos Péter, Szabó Péter: AMDAR adatok lehetséges felhasználása a repülésmeteorológiai előrejelzésben. *Repüléstudományi Közlemények*, Szolnok, 2016/2, pp. 165–178. (in Hungarian)
- [12] Bottyán Zs.: Az UAS eszközök időjárás megfigyelésre történő alkalmazásának fontossága és hazai lehetőségei. *Repüléstudományi Szemelvények*. No. 2, 2017. pp. 75-95. ISBN 978-615-5845-26-0. (in Hungarian)
- [13] Utasítás a repülés végrehajtására (URV-71). A Honvédelmi Minisztérium Kiadása. Budapest, 1973. (in Hungarian)
- [14] Bottyán Zsolt: A pilóta nélküli repülőeszközök meteorológiai alkalmazásának lehetőségeiről I. Az időjárás-felderítés. *Repüléstudományi Közlemények*, Vol. 28. No. 2. pp. 57-70. (in Hungarian)
- [15] E. N. Brown, C. A. Friehe, and D. H. Lenschow: The Use of Pressure Fluctuations on the Nose of an Aircraft for Measuring Air Motion. *Journal of Climate and Applied Meteorology*, Vol. 22, pp. 171-180. 1983.
- [16] A. van den Kroonenberg, T. Martin, M. Buschmann, J. Bange and P. Vörsmann: Measuring the Wind Vector Using the Autonomous Mini Aerial Vehicle M²AV. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 25, pp. 1969-1982. 2008.
- [17] R. J. Barthelmie, P. Cripp, H. Wang, C. M. Smith, R. Krishnamurthy, A. Choukulkar, R. Calhoun, D. Valyou, P. Marzocc, D. Matthiesen, G. Brown, and S. C. Pryor: 3d Wind and Turbulence Characteristics of the Atmospheric Boundary Layer. *Bulletin of American Meteorological Society*, Vol. pp. 743-756. 2014.
- [18] <http://www.apptech.com/wp-content/uploads/2016/09/Trisonica-Mini-300x300.jpg>
- [19] Stan G. Scott, T. Paul Bui, and K. Roland Chan: The Meteorological Measurement System on the NASA ER-2 Aircraft. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 7, No. 4, pp. 525-540. 1990.
- [20] C. A. Friehe and D. Khelif: Fast-Response Aircraft Temperature Sensors. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, Vol. 9, pp. 784-795. 1993.
- [21] Bottyán Zs. et al.: Measuring and Modeling of Hazardous Weather Phenomena to Aviation Using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS). *Időjárás / Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service* 119:(3) pp. 307-335. 2015.
- [22] DE Cook, PA Strong, SA Garrett and RE Marshall: A small unmanned aerial system (UAS) for coastal atmospheric research: preliminary results from New Zealand. *Journal of the Royal Society of New Zealand*, Vol. 43, No. 2, pp. 108-115, 2013. <http://dx.doi.org/10.1080/03036758.2012.695280>
- [23] http://www.graw.de/fileadmin/cms_upload/Images/Radiosonde_DFM09_1024x768_72dpi.png
- [24] <http://elte.prompt.hu/sites/default/files/tananyagok/AtmosphericChemistry/images/537c5328.jpg>
- [25] C Sivaraman, S McFarlane, E Chapman, M Jensen, T Toto, S Liu and M Fischer: Planetary Boundary Layer Height (PBL) Value Added Product (VAP): Radiosonde Retrievals. DOE/SC-ARM/TR-132. 2013. pp. 1-36. https://www.arm.gov/publications/tech_reports/doe-sc-arm-tr-132.pdf
- [26] H. Tennekes, *The Simple Science of Flight - From Insects to Jumbo Jets*. MIT Press, 1997. https://mitpress.mit.edu/sites/default/files/titles/content/9780262513135_sch_0001.pdf
- [27] William J. Pisano and Dale A. Lawrence: Control Limitations of Small Unmanned Aerial Vehicles in Turbulent Environments. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference 10 - 13 August 2009, Chicago, Illinois. <http://www.enu.kz/repository/2009/AIAA-2009-5909.pdf>
- [28] UAV Design Guidelines: http://www.barnardmicrosystems.com/UAV/uav_design/guidelines.html

- [29] <http://cires.colorado.edu/sites/default/files/people/cassanoplane.jpg>
- [30] <https://static1.squarespace.com/static/5005ba51c4aa8b4d97619d5f/t/56f6ed03f699bbc5383d78ad/1459023114287/>
- [31] Fedorovich, E., Rotunno, R. and Stevens, B.: Atmospheric Turbulence and Mesoscale Meteorology. Cambridge University Press, Cambridge, 2004.
- [32] <https://s-media-cache-ak0.pinimg.com/736x/6b/38/67/6b3867a9c4cf0ec6e69aa3a8db6dfa73--science-toys-science-fair.jpg>
- [33] Cheryl L. Klipp and Edward Measure: Urban Turbulence and Wind Gusts for Micro Air Vehicle Bio-inspired Designs. Army Research Laboratory. ARL-TR-5492. 2011. pp. 1-28.
- [34] Bottyán Zsolt: In-flight icing characteristics of unmanned aerial vehicles during special atmospheric condition over the carpathian-basin. Acta Geographica Debrecina Landscape and Environment 7:(2) pp. 74-80. (2014)
- [35] Carlo Di Benedetto, Domenico Pascarella, Gabriella Gigante, Salvatore Luongo, Angela Vozella and Francesco Martone: Optimized Preflight Planning for Successful Surveillance Missions of Unmanned Aerial Vehicles. International Journal on Advances in Intelligent Systems, Vol. 10, No. 1-2, pp. 14-26. (2017)

AZ UAS-ALAPÚ LÉGI IDŐJÁRÁS-FELDERÍTÉS ELMÉLETI KÉRDÉSEIRŐL

Munkánk során áttekintettük az időjárás-felderítő repülések általános elméleti problémáit. Becslést adtunk a feladatra jól alkalmazható pilóta nélküli repülőgépek technikai paramétereire és az alkalmazandó meteorológiai szenzorrendszerek specifikációjára. Végül megmutattuk a legfontosabb repülési manővereket, amelyek az alsó troposzféra repülőgépes mérése során alkalmazhatók, és meghatároztuk, milyen fontosabb eljárásokat kell elvégezni az ilyen repülési küldetések előtt, alatt és után.

Kulcsszavak: pilóta nélküli légijármű-rendszer, meteorológiai érzékelők, repülési manőverek, repüléstervezés

Bottyán Zsolt (PhD)
tanszékvezető, egyetemi docens
Nemzeti Közszerzői Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztoképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774

Bottyán Zsolt (PhD)
Head of department, associate professor
National University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Institute of Military Aviation
Department of Aerospace Controller and Pilot Training
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774

The work was created in commission of the National University of Public Service under the priority project KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 titled „Public Service Development Establishing Good Governance” in the Miklós Zrínyi Habilitation Program.



http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem_Bottyán_Zs.pdf

AJÁNLÁSOK A HAZAI KÖZFELADATOT ELLÁTÓ REPÜLÉSEK METEOROLÓGIAI BIZTOSÍTÁSÁHOZ

A közfeladatot ellátó repülések időjárás oldalról történő meteorológiai támogatása számos szakmai kihívást jelentő munka. Munkánkban meghatároztuk azokat a fizikai dimenziókat, melyeken belül a fent említett repüléseket várhatóan végre kell hajtani, valamint azon repülőeszközök körét, melyek részt vesznek ezekben a repülésekben. Bemutattuk, hogy a repülés szempontjából kiemelten fontos látástávolság becslését, hogyan lehet megvalósítani analóg, numerikus és hibrid megközelítésű prognózissal. Tanulmányunkban részletesen kitértünk a turbulencia, a szélnyírás, a felületi jegesedés valamint a zivatarok kialakulásához kedvező időjárási helyzet prognosztikai lehetőségeire. Külön említést tettünk arra vonatkozóan, hogy célszerű lenne egy meteorológiai UAS-flotta kialakítása és ennek tervszerű, adott módszertan alapján történő alkalmazása a közfeladatot ellátó repülések meteorológiai biztosításának rendszerén belül.

Kulcsszavak: meteorológiai támogatás, hibrid modell, látástávolság, turbulencia, jegesedés, zivatar prognóza, UAS eszköz

BEVEZETÉS

A légiközlekedés biztonsági kockázatai között – az emberi tényezőt leszámítva – első helyen a természet által generált veszélyes szituációk találhatók, melyek lényegében a légkör mindenkor állapotaival és annak folyamataival állnak szoros kapcsolatban. Korábbi munkánkban vizsgáltuk ezeket és megállapítottuk, hogy az adott időjárási helyzetekhez köthető jelenségek, folyamatok, a repülés teljes vertikumára hatással lehetnek, azaz befolyásolhatják a repülést lehetővé tevő fizikai erőhatásokat, a repülés alatti navigációs és kommunikációs folyamatot, valamint magára a repülés során elvégzendő feladat végrehajtását, egyaránt [1]. Pontosan az előzőekben említett okok miatt, egyrészt, a repüléseket meteorológiai támogatás nélkül végrehajtani nem lehet, másrészt minden repülési feladathoz hozzá kell rendelni egy ún. időjárási minimumot, melyek alkalmazásával a repülésbiztonság az elvárt szinten tartható.

Az időjárási minimumok meghatározása és az időjárás mindenkori alakulása együttesen a repülésekre gyakran erősen korlátozó feltételeket szab, ami a rendkívül fontos repülési feladatok végrehajtását is gátolhatja. Ilyen jellegű repülések közé tartoznak az állami célú légi közlekedési eszközökkel végrehajtott feladatok, melyekre vonatkozó szabályokat a 3/2006 HM rendelet szabályozza [2]. A rendeletben, az állami célú légi közlekedés rendeltetése szerinti felosztása több, olyan közfeladatnak minősülő repülési tevékenységet is említ melyeknek a végrehajtása adott helyzetben rendkívül indokolt:

- ➔ kutató-mentő (SAR) repülés;
- ➔ különleges műveleti, illetve terrorista ellenes műveletet végrehajtó erő repülése;
- ➔ rendvédelmi célú repülés;
- ➔ katasztrófavédelmi feladatokkal kapcsolatos repülés;
- ➔ és nem utolsósorban napjaink egyik kiemelten fontos repülési feladata, a határőrizeti repülés.

A fent említett repülések meteorológiai támogatása tehát kiemelten fontos feladat, hiszen ezek az ország védelmével, a rend fenntartásával, emberi életek és anyagi javak mentésével kapcsolatban kerülnek végrehajtásra. A továbbiakban ezeket a repüléseket, *közfeladatot ellátó repüléseknek* fogjuk nevezni. A meteorológiai támogatás fontossága mellett azonban – éppen az említett repülések kiemelt szerepe, gyakran előre nem tervezhető végrehajtása miatt – ennek nehézségét és komoly felelősségét is ki kell emelnünk.

Munkánkban a fentebb említett repülések meteorológiai támogatásával kapcsolatban előforduló szakmai kihívásokat kívánjuk áttekinteni és az ezekre adható válaszokat bemutatni.

A KÖZFELADATOT ELLÁTÓ REPÜLÉSEK METEOROLÓGIAI TÁMOGATÁSÁNAK KIHÍVÁSAI

A közfeladatot ellátó repülések fizikai dimenziói

A Bevezetésben felsorolt repülések meteorológiai támogatásának átgondolásakor először a szóban forgó feladatok térbeli és időbeli potenciális dimenzióit szükséges áttekintnünk. Ez azért szükséges, mert ez alapján kaphatunk képet azokról a légköri folyamatokról, jelenségekről melyek leginkább veszélyeztetik ezeket a repülési feladatokat és egyúttal meg is határozhatjuk azt az elvégzendő szakmai munkát (ami első sorban a szóban forgó jelenségek előrejelzését foglalja magában), melynek segítségével az adott meteorológiai támogatás alkalmas lesz az ilyen típusú repülések biztosítására.

A közfeladatot ellátó repülésekre jellemző, hogy a legtöbb esetben horizontális kiterjedésük nem haladja meg Hazánk földrajzi dimenzióit, azaz mintegy 100 km-es, de néha csak 10 km-es nagyságrendben jelennek meg. Az említett repülések általában részben vagy teljes egészében kis magasságúak és/vagy földközeliak, hiszen a feladatuk jellegéből adódóan valamilyen földfelszíni tevékenységhez kapcsolódnak. Amennyiben *földközeli repülésről* van szó a természetes vagy mesterséges akadályok feletti valóságos repülési magasság 330 láb (100 m AGL) és alatta történő mozgást feltételez, míg a *kismagasságú repülés* a földközeli magasság felső határától 2000 láb [600 m] magasságig terjed, mindkettő *kissebességű* haladás mellett (250 kts. azaz 460 km/h és az alatti sebesség esetén) [2].

Az időben történő mozgások analízise azt mutatja, hogy (amennyiben a kissebességű repülést és az említett horizontális kiterjedést vesszük alapul) ezeknek a repülési feladatoknak az időtartama általában 1–4 óra vagy esetleg kevesebb. Ugyanakkor, meg kell jegyeznünk, hogy a közfeladatot ellátó repülések nappal és éjszaka is végrehajtásra kerülnek, tehát a meteorológiai támogatásnak ezt a tényt is figyelembe kell vennie.

A közfeladatot ellátó repülések során alkalmazott repülőeszközök

A repülések során többféle méretű és eltérő műszaki megvalósítással rendelkező repülőeszközt használhatunk, amelyek ismerete azért fontos, mert az ezekre történő adott légköri hatások eltérő eredményeket jelentenek a mozgásuk és a feladatuk végrehajtása során. A repülőeszközök alábbi csoportosítását az általunk fontosnak tartott meteorológiai szempontok szerint végeztük el, így a következő osztályokat vizsgáljuk:

→ merev- vagy forgószárnyas;

- ➔ karakterisztikus méret (feszítávolság, illetve rotorátmérő) és maximális felszálló tömeg (Maximum Take-off Weight, MTOW);
- ➔ személyzettel rendelkező vagy pilóta nélküli (Unmanned Aircraft System, UAS);
- ➔ fegyverzettel ellátott vagy anélküli;

Jóllehet a merev- és forgószárnyas eszközök repülésének alapját ugyanaz a fizikai törvény (Bernoulli - törvénye) teszi lehetővé, a mozgáshoz szükséges emelő erő előállítását egészen más műszaki megvalósítással érik el. A merevszárnyas eszköz esetében a levegőhöz viszonyított mozgási sebesség a repülőgép minden szerkezeti eleme esetén ugyanaz az érték, a forgószárnyas repülőeszköznél ez távolról sem igaz! Ez utóbbinál a forgószárnyak esetében lényegesen nagyobb áramlási sebességek is előfordulnak annál, mint ami magának az eszköznek a haladási sebessége (ami egyébként közel nulla is lehet pl. függés esetén). Ez utóbbi állítás igaz egyébként, a légcsavarral felszerelt merevszárnyas légijárművek esetén is. A két különböző műszaki megvalósítás eltérő fel- és leszállási módokat határoz meg, melynek során a repülőgépeket ért légköri hatások is eltérőek lesznek pl. a stabilitás fenntartása, a jegesedési potenciál, a széllekedések és a fellépő turbulencia stb. szempontjából.

A szóban forgó repülőeszközök karakterisztikus mérete és MTOW értéke szintén fontos információ, hiszen az atmoszférában történő repülések stabilitása jelentős mértékben változik ezek értékének függvényében. Korábbi munkánkban már tárgyaltuk a merevszárnyas repülőgépek esetében fellépő hossztengety-menti stabilitás és feszítávolság, valamint a légköri turbulencia kapcsolatát [3]. Láthattuk, hogy a feszítávolság növekedése drasztikusan növeli a merevszárnyas eszköz stabilitását, adott légköri turbulencia mellett. Az is világossá válik a szóban forgó tanulmány alapján, hogy a repülőeszközök szárnyterhelési tényezője (Wing Loading), amely a súly és a szárnyfelület hányadosa, szintén jelentős mértékben befolyásolja a légköri mozgásokkal, első sorban a turbulenciával szembeni stabilitást.



1. ábra Az Elbit cég SKYLARK I-LE UAS eszköze indítás előtt [8]

Napjainkban már nélkülözhetetlen a pilóta nélküli repülőeszközök (UAS) alkalmazása a közfeladatot ellátó repülések során, így hazánkban is több alkalommal történt bevetésük pl. kutatás-mentési, katasztrófa- és határvédelmi feladatok során [4][5]. A hazánkban alkalmazott ilyen eszközök kis mérettel és alacsony MTOW értékkel rendelkeznek, ugyanakkor merev- és forgószárnyas változatban is előfordulnak. Ki kell emelni a Magyar Honvédségben rendszeresített

SKYLARK I-LE merevszárnyú UAS eszközt, melyet több céllal sikeresen alkalmaztak már hazánkban és missziós területeken is [6]. Az adott eszköz fesztávolsága mintegy 3 méter, maximális felszálló súlya pedig 70–75 N, konfigurációtól függően (1. ábra) [7].

A személyzettel repülő eszközök mérete és maximális felszálló tömege lényegesen nagyobb, mint a fentebb említett UAS repülőgép esetében, hiszen pl. a Magyar Honvédség által rendszeresített Mi-8 és Mi-17 közepes szállító helikopterek MTOW értéke 120 000 N és 130 000 N, forgószárnyainak átmérője pedig 21,3 méter [9][10]. A szintén közszolgálati feladatok végrehajtására is alkalmas AS-350B típusú helikopter kisebb, mint az említett Mi-8/17-es légijárművek, hiszen maximális felszálló súlya 23 000 N és a rotor átmérője is csak 10,69 méter (2. ábra) [11].



2. ábra A Magyar Honvédségben rendszeresített Mi-17-es (bal oldali kép) és AS 350B (jobb oldali kép) típusú helikopterek [12][13]

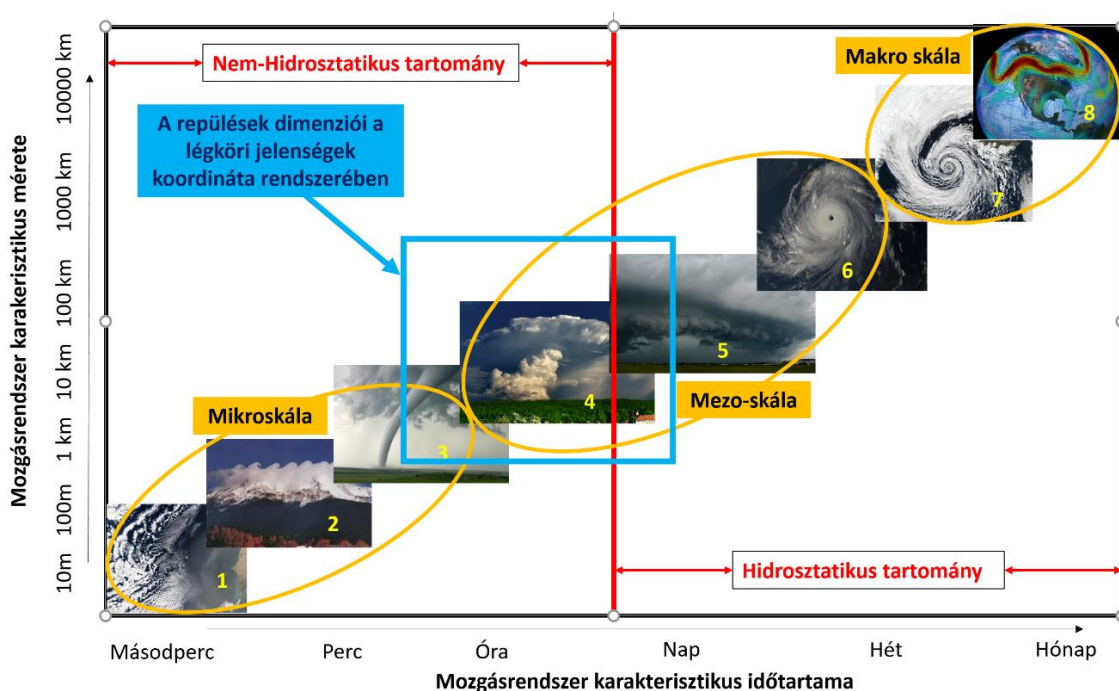
A közfeladatot ellátó repülések során tehát olyan légijárművek meteorológiai biztosításáról kell gondoskodnunk, melyek MTOW értékei jó közelítéssel a 10 és 200 000 N közé esnek, míg a karakterisztikus méretüket tekintve 1 és 30 méter között helyezkednek el. A tágabb intervallumok alkalmazása során figyelembe vettük az esetleges beszerzendő további repülőeszközök lehetséges szóban forgó értékeit is.

Különleges helyzetekben előfordulhat, hogy fegyverzettel ellátott repülőeszközöket is alkalmazunk. Ebben az esetben különösen figyelemmel kell lennünk a fegyverzet esetleges alkalmazásának meteorológiai körülményeire is, természetesen a repülés biztonságának fenntartása mellett. Ez lényegileg az atmoszféra átlátszóságát befolyásoló tényezőkre terjed ki speciálisan, valamint a repülőgép alkalmazásakor fennálló és/vagy várható szélviszonyokra.

A közfeladatokat ellátó repülések meteorológiai biztosításának speciális kérdései

A közfeladatot ellátó repülések jellegéből fakadóan számos speciális kihívás jelentkezik a meteorológiai biztosítás terén is. Elsőként azokat a légköri folyamatokat kell azonosítanunk, melyek kialakulása, élettartama összemérhető a szóban forgó repülések térbeli és időbeli dimenzióival. Ehhez a kaotikus viselkedést mutató légkör valamiféle alapvető tulajdonságát kell figyelembe vennünk, melyet először *Orlanski* írt le és korábbi munkánkban már utaltunk rá (3. ábra) [14]. Az ábrán kék négyszög jelzi a közszolgálati repülések korábban meghatározott fizikai dimenzióit, melynek segítségével megállapíthatjuk, hogy elsősorban a mezo-tartományú mozgásrendszerek azok, amikre koncentrálnunk kell a meteorológiai támogatás során, de a mikro tartományban zajló folyamatok is fontosak számunkra.

Korábbi munkánkban már láttuk, hogy a légkör vertikálisan alapvetően stabilis állapotban van (azaz, a függőleges mozgások nagyságrendje a vízszintes áramlásokéhoz képest jóval kisebb), de főképpen a nyári félévben gyakran találkozunk ennek ellenkezőjével is [1]. A nyári félévben tehát a konvektív mozgások által kifejlődő mozgásrendszerek alapvetően meghatározzák az időjárás alakulását. Elmondhatjuk tehát, hogy a légköri konvektív folyamatok által létrejövő zivatarok, zivatar-láncok (squall-line) és a zivatarhoz kapcsolódó egyéb jelenségek (felületi jegesedés, turbulencia, szélnyírás, szellőkés, downburst, stb.) megfigyelésével és előrejelzésével, kiemelten szükséges foglalkoznunk.



3. ábra Légkörünk alapvető mozgásrendszereinek elhelyezkedése az időtartam és élettartam koordináta rendszerben [14]

A téli félév alapvetően stabilis légköri állapotot hoz magával és ebben az esetben – az alacsony hőmérséklet miatt – a talaj közelében is gyakori felhőképződés zajlik, mely felhőzet alapja sokszor rendkívül alacsonyan helyezkedik el, sőt akár a felszínig is érhet (köd, erős párásság). A Kárpát-medence egyedi földrajzi fekvéséből és orográfiai viszonyaiból adódóan, gyakran tapasztalhatunk a téli félévben több napos (akár 2–3 hetes), igen alacsony felhőalappal rendelkező, nagy térségre (akár 100–200 000 km²-re) kiterjedő, időjárási szituációt, melyet vertikálisan egy erős hőmérsékleti inverzió jellemez [15]. Az ebben a nyugodt meteorológiai helyzetben zajló mikro-léptékű folyamatok becslése a repülésmeteorológia egyik legnagyobb kihívása, amivel szintén foglalkoznunk szükséges a biztonságos repülések végrehajtása érdekében.

A szóban forgó repülések során – és ez különösen igaz a közfeladatot ellátó repülések esetén – rendkívül fontos a repülőgép fedélzetéről történő földfelszíni megfigyelés, ami csak abban az esetben végezhető el, ha a légkör sugárzás-átbocsátó képessége elegendő mértékű ehhez. Éppen ezért az atmoszférikus látástávolság mindenkor ismerete és predikciója szintén fontos momentum a meteorológiai támogatás esetében. A látástávolság problémáját egy korábbi munkánkban vizsgáltuk, itt most csak utalunk erre [16]. Mindazonáltal, a látástávolság értéke a repülőeszközök esetén nem csak a fedélzetről történő megfigyelés szempontjából lényeges, hanem a fel- és

leszálláshoz használt repülőtereken is. Tekintve, hogy az alacsony látástávolságot a legtöbbször a légkörben zajló kondenzációs folyamatok okozzák, a felhő- és csapadékképződés előrejelzése is alapvető feladatunk. Különösen fontos az alacsony magasságon előforduló felhőzet prognózisa, hiszen a közfeladatot ellátó repülések – ahogyan korábban jeleztük – gyakran kis magasságban történnek és ilyenkor a legnagyobb veszélye a tereptárgynak ütközésnek és a térbeli tájékozódás elvesztésének, egyaránt.

A közfeladatot ellátó repülések egy rendkívül fontos aspektusa, hogy gyakran váratlanul, előre nem tervezett időpontban és helyen kell, hogy megvalósuljanak, ugyanakkor a repülések szükségessége megkérdőjelezhetetlen. Gondoljunk csak a légi-kutatás mentési, rendvédelmi vagy katasztrófa elhárítási légi cselekményekre. Az ilyen típusú repülések korlátozása – amennyiben a repülőgép és a személyzet készen áll a feladatra – csak abban az esetben indokolt, ha a jelenlegi és/vagy a várható időjárás nem teszi lehetővé a repülés végrehajtását a repülőtéren illetve a tervezett útvonalon. Éppen ezért a korszerű repülésmeteorológiai támogatásnak alkalmasnak kell lennie a lehető legnagyobb pontosság mellett történő időjárás-előrejelzésre, és a feladatot érintő útvonalra érvényes speciális prognózisok elkészítésére, egyaránt. Ez utóbbinak magában kell foglalnia – a várható időjárásra vonatkozó becslések alapján – útvonalak meteorológiai rizikófaktorok figyelembe vételével történő kijelölésének lehetőségét, azaz útvonal-optimalizációt is, amennyiben az időjárás alakulása szempontjából ez releváns.

A meteorológiai támogatásnak csak az egyik fontos pillére a korszerű és megbízható időjárás előrejelzési technikák alkalmazása. Az előállított meteorológiai információ megfelelően informatív, jól érthető, világos formában történő gyors eljuttatása a személyzethez legalább ilyen lényeges momentum. Ezért az a véleményünk, hogy a meteorológiai támogatás részeként működtetni szükséges egy olyan web-alapú felületet, ahol – alapvetően a numerikus modellek teljesítményének figyelembe vételével legalább 10–15 perces frissítéssel – a rendelkezésre álló csillagászati és meteorológiai információ elérhető a személyzet számára, akár mobiltelefonon is (mobil applikáció segítségével). Egy ilyen korszerű tájékoztató rendszer kidolgozása, a jövő egyik fontos feladata számunkra.

Az elvárt nagy térbeli és időbeli felbontású, egyben elegendően pontos időjárási prognózisok elkészítése és publikálása nagyon komoly szakmai háttérrel feltételez, melynek alapvető elemei a különböző elven működő (statisztikus, numerikus és hibrid) időjárás előrejelzési modellek. Az adott modellek meteorológiai támogatásban történő fejlesztése, alkalmazása és verifikációja kísérleti jelleggel jelenleg is folyik [17]. Az már most világosan látszik, hogy pl. a látástávolság előrejelzése legjobban a kombinált (hibrid) módszerrel valósítható meg [18][19]. Ugyanakkor a numerikus prognosztikai és a statisztikus alapon történő predikció külön-külön is értékes eredményeket produkálhat, így alkalmazásuk megkerülhetetlen. Meg kell jegyeznünk, hogy a két alapvetően eltérő filozófiájú modell típus alkalmazása jól kiegészítheti egymást, hiszen a numerikus alapú előrejelzések a dinamikus időjárású helyzetekben, míg a statisztikus inkább a statikusban mutat jobb teljesítményt.

Ugyanakkor arra is rámutattunk korábbi munkánkban, hogy a nagy felbontású numerikus időjárás előrejelzés egyik korlátja, hogy – alapvetően a planetáris határrétegből – nem tudunk elegendő mennyiségű és megfelelő minőségű 3 dimenziós meteorológiai információt asszimilálni

ezekbe a modellekbe [20]. E nélkül viszont a prognózisok pontossága alapvetően nem növelhető. Valójában két lehetőség mutatkozik a valós idejű adatok számának növelésére, ami kiemondottan a mezo- és mikro-tartományú folyamatok előrejelzéséhez elengedhetetlenül szükséges: egyrészt a polgári – első sorban a nagy repülőgépekkel rendelkező légitársaságok által végrehajtott – repülések során keletkezett AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay) adatok felhasználása, másrészt meteorológiai szenzorokkal felszerelt pilótás és pilóta nélküli repülőgépek (UAS) tervszerű alkalmazásából származó adatok bedolgozása [21].

A fentiek alapján egyértelmű, hogy a korszerű repülésmeteorológiai támogatás nem nélkülözheti a rendszerbe integrált meteorológiai céllal üzemeltetett UAS eszközöket [3]. Azt is látni kell azonban, hogy a szóban forgó eszközök alkalmazása tervszerűen kell, hogy megtörténjen, ezért a hatékony és biztonságos alkalmazásukra vonatkozóan egy későbbi munkánkban ajánlásokat fogunk megfogalmazni.

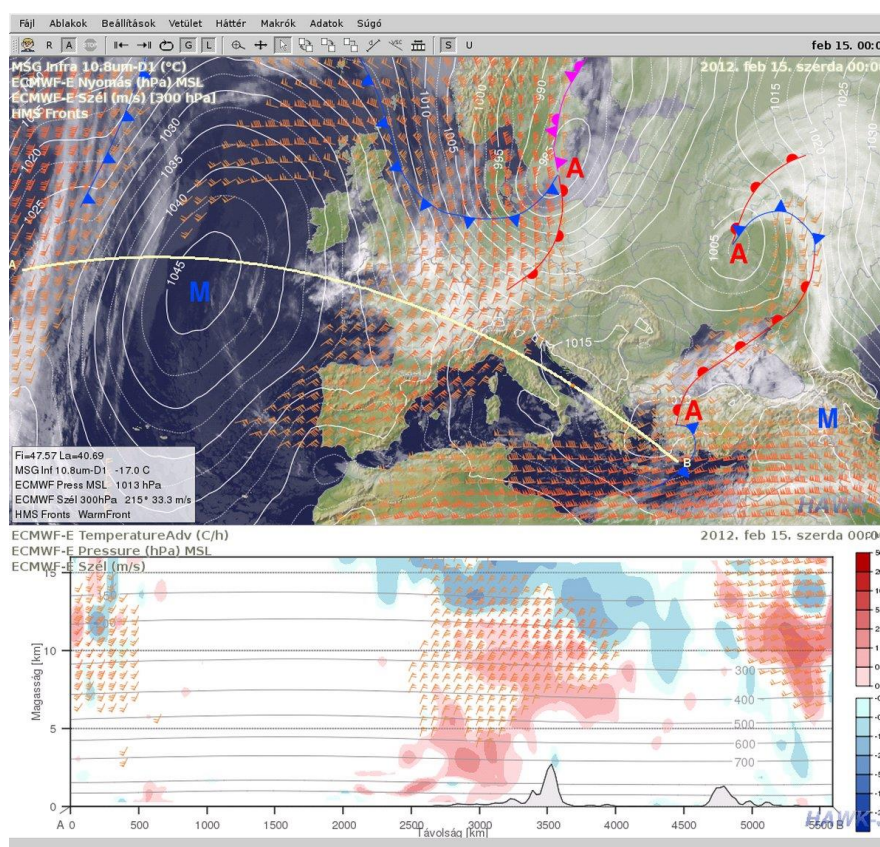
A KÖZFELADATOT ELLÁTÓ REPÜLÉSEK METEOROLÓGIAI TÁMOGATÁSÁNAK ALAPELEMEI

A jelenlegi meteorológiai támogatás áttekintése

Jelenleg a honvédelmi célú (beleértve a katonai légi kutató mentőszolgálatot is) repülések meteorológiai támogatását a Magyar Honvédség Összhaderőnemi Parancsnokság és a Geoinformációs Szolgálat alá rendelt meteorológiai szervezetek végzik. A katonai repülőtereken és az MH LVIK-nél egy-egy meteorológiai csoport látja el a katonai repülések meteorológiai támogatását az MH GEOSZ szakirányú szolgálatával együtt. A támogatáshoz szükséges meteorológiai információ (földfelszíni mérések, rádiószonda adatok, távérzékelési produktumok és numerikus modell outputok, stb.) nagyrészt az Országos Meteorológiai Szolgálattól (OMSZ) érkezik. A három katonai repülőtéren telepített komplex repülésmeteorológiai mérő- és észlelőrendszert is az OMSZ üzemelteti és tartja karban. A repülőterekre (Szolnok, Kecskemét és Pápa) kiadott rövid (9 órás) és hosszú (24 órás) TAF előrejelzések (alapesetben) helyben készülnek, a fentebb említett információk figyelembe vételével. A katonai meteorológiai szolgálatok szakmai munkáját a MH GEOSZ által készített és a Honvéd Vezérkar Főnöke által jóváhagyott kiadványban leírtak szabályozzák [22].

A honvédségi meteorológiai támogatás során felhasznált mérési, észlelési és modell adatokhoz történő hozzáférés az OMSZ Hawk grafikus rendszerén keresztül biztosítva van, de a szóban forgó rendszert most csak a meteorológiai csoportoknál lehet elérni (így jelenleg felhasználása a meteorológiai tájékoztatók szempontjából erősen korlátozott pl. a hajózó személyzet számára) (4. ábra). [23] A mérési és észlelési adatok mennyisége és minősége megfelelő, de – első sorban a lokális planetáris határrejteget illetően – ezek térben és időben történő eloszlása nem kielégítő, különösen a mezo- és mikro-skála határán előforduló jelenségek (pl. konvektív folyamatokhoz, kisugárzási ködökhöz és hőmérsékleti inverziókhoz kapcsolódó folyamatok) szempontjából nézve. Meg kell említeni, hogy a repülőtereken a konvektív folyamatok megfigyelésére rendelkezésre áll a szovjet gyártmányú nagy hatótávolságú MRL-5-ös meteorológiai lokátor, mely digitalizálva, részben modernizálva, segítséget nyújt a szolgálatoknak a munkában. Ugyanakkor szólni kell róla, hogy egyre nehezebb az alkatrészeket beszerezni hozzá és üzemeltetése

(felépítéséből adódóan is) rendkívül gazdaságtalan, így – véleményünk szerint – cseréje indokolt. Ezzel együtt, használatával a nyári időszak zivataros helyzetének követése a legtöbb esetben még az esetleges üzemszünet alatt is részben megoldott, már csak azért is, mert az OMSZ saját radarhálózata bővült, az adatfeldolgozás ideje is lecsökkent, így 10–12 perces időbeli felbontással van elérhető országos kompozit radarkép a repülőtereken. A téli félév alacsony felhőzetének és a nyári zivatarok megfigyelésére is alkalmasak a EUMETSAT meteorológiai műholdas produktumai. Különösen fontosak az ún. kompozit műholdas felvételek és az ún. SAF produktumok, melyek térbeli és időbeli felbontása az erősebb konvektív mozgások és az áramlási ködök nyomon követésére is alkalmasak, de akár adott magasságban előforduló szelekről stb. is tájékoztatnak [24]. Végül szólnunk kell az OMSZ saját villám-lokalizációs rendszeréről (SAFIR) is, mely szintén a nyári félévben segíti a meteorológusok munkáját [25]. Ennek a rendszernek az adatai is az említett Hawk munkaállomásokon keresztül férhetők hozzá.



4. ábra Az országos Meteorológiai Szolgálat Hawk grafikus megjelenítő rendszerének vizuális produktuma [23]

A prognosztikai produktumok területén jelenleg a katonai repülésmeteorológiai támogatás az OMSZ-tól kapott kész, numerikus prognózisok outputjaira támaszkodik, melyek azonban alapvetően nem, vagy csak kismértékben utófeldolgozottak. Ebből adódóan számos, repülésre veszélyes meteorológiai jelenség előrejelzésére közvetlenül nem, csak a szolgálatban dolgozó meteorológus hozzáadott szakmai tapasztalata alapján van lehetőség. Munkánkban javaslatot teszünk az utófeldolgozás módjaira és lehetőségeire is, tekintve, hogy különös tekintettel a közfeladatot ellátó repülések jellegére, az így előállított produktumok megkönnyítik a meteorológusok dolgát és gyorsítják a szakszerű meteorológiai tájékoztatást, egyaránt.

Az OMSZ numerikus előrejelzései az Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) globális modelljét használják, mint kezdeti és peremfeltételt adó produktumokat. Az ALADIN (Aire Limitée Adaptation dynamique Développement InterNational), és AROME (Applications of Research to Operations at MEscale) regionális, mezo-skálájú numerikus modellek által szolgáltatott numerikus előrejelzéseket használják az OMSZ-nál és az AROME modell adatok bizonyos része a katonai meteorológiai szolgálatokhoz is eljutnak [26]. E mellett az OMSZ üzemeltet WRF (Weather Research and Forecasting) mezo-léptékű numerikus modellt is, melynek outputjai szintén elérhetőek a katonai repülésmeteorológiai támogatás során.

Meg kell azonban jegyeznünk, hogy napjainkban a katonai meteorológiai támogatásból teljes mértékben hiányoznak a statisztikus alapú és a kombinált (hibrid) előrejelzések annak ellenére, hogy a klíma adatok a legtöbb mérőállomásról (tehát repülőterekről is) rendelkezésre állnak. Ezeknek a statisztikus alapú prognosztikai eljárásoknak nagyon fontos szerepük lehet abban az esetben, ha a légköri állapot megváltozását alapvetően a lokális folyamatok kormányozzák, tehát előtérbe kerülnek a helyi környezeti inhomogenitások okozta hatások az alsó troposzférában. A legtöbbször ezek a légköri szituációk anticiklonális hatás alatt figyelhetők meg és télen az alacsony látástávolság és felhőalap kialakulását is elősegítik. Ilyenkor gyakran a numerikus alapú előrejelzések nem képesek kellő pontossággal előre jelezni az időjárás alakulását, így a statisztikus módszer az egyetlen megoldás a problémára, az előrejelző szakmai tudása és tapasztalata mellett. Jelen tanulmányban tesszünk javaslatot ilyen típusú prognosztikai módszerek alkalmazására is.

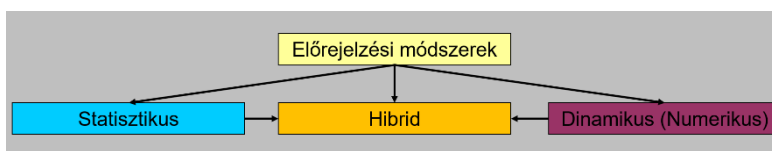
Jóllehet korábban a repülések meteorológiai biztosításának fontos eszköze volt a légi időjárás-felderítés, mára ez a típusú repülés igen ritkán vagy teljes mértékben hiányzik a támogatásból [27]. Ebből adódóan, a repülések során tapasztalt időjárási helyzetről általában csak ad-hoc jellegű információ jut el az operatív meteorológiai szolgálatokhoz, így ezek semmiképpen nem tekinthetők tervezett légi időjárás-felderítésnek. A közfeladatot ellátó repülések támogatásából azonban nem hiányozhat ez a fajta információ-szerzés, hiszen pontosan a planetáris határrétegből származó mérések és megfigyelések döntően javíthatják az előrejelzések pontosságát, ahogyan erre már utaltunk. Ráadásul a pilóta nélküli repülőgépek alkalmazásával a költségek jelentősen csökkenthetők az ilyen típusú repülések esetében és az autonóm üzemű repülések pedig a tervezésben és a gyors, pontos végrehajtásban játszhatnak kiemelkedő szerepet. Tekintettel a kérdés fontosságára, egy későbbi munkánkban ki fogunk térni az UAS alapú légi időjárás-felderítés módszertanának áttekintésére is.

Az alkalmazandó statisztikus alapú időjárás előrejelző modellekről

A repülésre leginkább veszélyes meteorológiai folyamatok – mint korábban utaltunk rá – a mezo- (és részben mikro-) skálán jelennek meg, melyeknek számszerű előrejelzése a *nowcasting* folyamat alapvető eleme (3. ábra). A közfeladatot ellátó repülések biztonságának magas szinten tartása szükségessé teszi, hogy nagy tér- és időbeli felbontás mellett, jelentős biztonsággal történjen meg az időjárás előrejelzése, különös tekintettel a veszélyes meteorológiai folyamatok előfordulására és a speciális repülési feladatok adta egyéb igényekre vonatkozóan. Ennek alapvető feltétele, hogy minden lehetséges módon elérhető prognosztikai módszert

alkalmazzunk és – amennyiben szükséges – dolgozzunk ki hozzájuk olyan utófeldolgozási eljárásokat, hogy lehetővé váljon a szóban forgó veszélyes időjárási jelenségek, folyamatok közvetlen (direkt módú) előrejelzése.

A légköri állapotváltozások predikciójának alapvetően három olyan módja van, amelyek jelentősen különböznek a probléma megközelítésében és előnyük, valamint hátrányuk egyaránt ismertek a szakemberek számára (5. ábra).



5. ábra Az időjárás előrejelzésének alkalmazott elvi módszerei (a szerző által készített ábra)

A statisztikus alapú prognózisok a légköri viselkedés korábban történő megfigyeléséből, méréseiből származó adatok feldolgozásán alapulnak, így elvileg sincs arra szükségünk az ilyen típusú előrejelzések készítésekor, hogy részletesen ismerjük az atmoszféra változása mögött rejlő fizikai összefüggéseket. A már meglévő nagy mennyiségű klimatikus adatok matematikai statisztikai elemzésével feltárhatjuk azokat a – gyakran nemlineáris - sztochasztikus kapcsolatokat, melyek segítségével képesek vagyunk becsléseket adni bizonyos légköri tulajdonság, állapot megváltozására. A statisztikus alapú predikció előnyei az alábbiak:

- ➔ egyszerűen előállítható jól kezelhető produktumok;
- ➔ a felhasznált klimatikus adatbázis egyszerűen bővíthető és flexibilis jellegű;
- ➔ idővel (az adatbázis bővülésével) a prognózisok beválása növekszik;
- ➔ nem igényli az éghajlati rendszerben ható fizika részletes ismeretét;
- ➔ ha a numerikus modell valamiért nem elég pontos vagy nem áll rendelkezésre, akkor nagy segítség a végső prognosztikai döntés meghozatalában;
- ➔ könnyen és gyorsan implementálható bárhová, ahonnan vannak megfelelő pontosságú és hosszúságú klimatikus adatok.

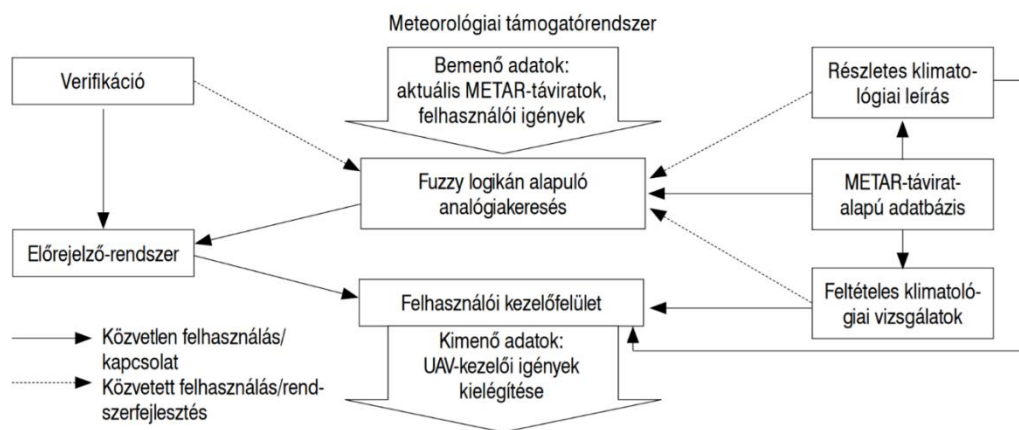
Ugyanakkor, számos olyan tulajdonsága is van ezeknek az előrejelzési módszereknek, amelyek miatt csak korlátozott mértékben alkalmazhatóak bizonyos körülmények között:

- ➔ a szóban forgó prognózisok produktumai statikusak (nem tudják kellő módon kezelni a dinamikát);
- ➔ használatuk nagy mennyiségű adat feldolgozását és adatbázisba szervezését igényli;
- ➔ az időjárásban néha előforduló szélsőségeket nem lehet jól lekövetni velük (a szélsőséges időjárás általában ritkán fordul elő, így az adatbázisban kevés ilyen eset lesz reprezentálva);
- ➔ az éghajlat bizonyos irányú (pl. jelenlegi antropogén eredetű) változásait csak lassan képesek követni az így készült prognózisok.

A statisztikus modellek között talán a legfontosabb és leginkább alkalmazott eljárás, amikor az időjárás előrejelzés korábban már előfordult, a jelenlegihez nagyban hasonló helyzetek keresésén és ezek múltban történt fejlődésének aktualizálásán alapul. Ezt az eljárást, analóg időjárási helyzeteken alapuló prognózisnak hívjuk és sikeresen alkalmazható számos, repülésmeteorológiában is fontos paraméter (látástávolság, felhőalap magassága, felületi jegesedés stb.) előrejelzésére is [28][29][30]. Korábbi kutatásaink során a horizontális látástávolság analóg alapú előrejelzésének

módszerét dolgoztuk ki a hazai nagyobb repülőterek körzetére történő meteorológiai támogatás részeként, melynek részletes verifikációját is elvégeztük.

Munkánkhoz az alapot a négy nagy hazai repülőtér (LHBP, LHSN, LHKE, LHPA) 2005 óta összegyűjtött repülésmeteorológiai táviratok összessége, mint klíma-jellegű adatbázis adta. Tekintve, hogy ezek a táviratok fél órás időlépcsőben kiadásra kerülnek és kimondottan repülés-meteorológiai paraméterekre (szél, látástávolság, időjárási jelenség, felhőzet, hőmérséklet, harmatpont, ONH légnyomás) szolgáltatnak információt, rendkívül alkalmasnak bizonyultak számunkra is, de korábbi, nemzetközi alkalmazásuk is ismert [30]. A feladatunk az volt, hogy ezeket az adatokat összegyűjtsük, ellenőrizzük és adatbázisba szervezzük, majd ezt az adatbázis folyamatosan karban tartjuk és bővítjük az idő múlásával [31]. Ezután következett az egyik legfontosabb munka, miszerint építsünk fel egy metrikát az adott időjárási helyzethez hasonló, korábban előfordult esetek kiválasztásához. Az adott hasonlósági metrika kidolgozását számos repülésmeteorológiai szakember személyes véleményének figyelembe vételével, valamint az AHP módszer alkalmazásával végeztük el, felhasználva még a fuzzy halmazelmélet adta lehetőségeket is [32]. Az így előállt hasonlósági metrika alkalmazása megteremti a lehetőséget annak, hogy az éppen adott időjárási helyzetnek megfelelő METAR táviratban kiadott információkhoz keressünk hasonló eseteket a múltban. Amennyiben van kellő számú és elegendően jól hasonló ilyen eset, akkor ezek – a múltban történő fejlődésük ismerete alapján – felhasználhatók előrejelzésre az éppen aktuális időjárási helyzet további fejlődésének prognosztikájához. [19] Az analóg időjárási helyzetek keresésén alapuló prognózis a látástávolság esetében igen jó eredményeket adott az esettanulmányokon keresztül és a verifikációs vizsgálatok során, egyaránt, így operatív alkalmazása a közfeladatokat ellátó repülések során indokolt lenne [18][33]. A szóban forgó statisztikai prognosztikai eljárás blokk vázlatát a 6. ábrán láthatjuk.



6. ábra Az UAS repülések meteorológiai támogatórendszerének statisztikus alapokon nyugvó moduljának felépítése [28]

Ahogy a fenti 6. ábrán is látható, az analógiás módszer alkalmazása egy komplex meteorológiai támogató rendszeren belül rendkívül indokolt azzal együtt, hogy a módszerhez szükséges adatbázisból számos egyéb repülésmeteorológiai feltételes valószínűségi alapon történő dinamikus táblát, előrejelzést is előállíthatunk valamint az adott repülőtérre vonatkozó klimatológiai ismeretek is kinyerhetők innen.

Természetesen fontos, hogy ezek a statisztikus alapú előrejelzések flexibilisen legyenek elérhetőek és az adott időpontban, az adott időjárási helyzetben tetszőleges látástávolsági feltétel megadása is lehetővé váljon, hiszen a különböző légijárműveknek más-más látástávolsági határértékük van az alkalmazásuk során, ahogyan pl. a 7. ábrán látható felületen ezt megtehetjük. Lényeges továbbá, hogy megadhassunk tetszőleges látástávolság intervallumot és a rendszer legalább 6-9 órára előre meg tudja adni annak valószínűségét, hogy mi az esély arra, hogy adott időpontban a kérdéses paraméter az adott tartományba fog esni. A szóban forgó ábrán egy adott repülőtérre vonatkozó analóg látástávolság előrejelzés látható 9 órára előre, 1 óra időfelbontással. A halvány piros háttérben az előrejelzett látástávolság értékek tűnnek elő méterben, a fehér háttér az ICAO szabvány látástávolság határértékek közötti előfordulás, míg a sárga pedig a felhasználó által előre kiválasztott tetszőleges intervallumba esés valószínűségét mutatja.

Forecast	t+0 800	t+1 600	t+2 800	t+3 800	t+4 800	t+5 600	t+6 400	t+7 400	t+8 400	t+9 700
Frequency	t+0	t+1	t+2	t+3	t+4	t+5	t+6	t+7	t+8	t+9
0- 800m	0.13	0.37	0.33	0.30	0.33	0.40	0.43	0.40	0.43	0.37
800-1500m	0.87	0.33	0.27	0.23	0.13	0.10	0.10	0.17	0.13	0.20
1500-3000m	0.00	0.20	0.30	0.30	0.33	0.17	0.17	0.10	0.10	0.07
3000-5000m	0.00	0.07	0.07	0.07	0.10	0.17	0.13	0.13	0.10	0.07
5000-8000m	0.00	0.03	0.00	0.07	0.03	0.07	0.07	0.07	0.10	0.17
8000- m	0.00	0.00	0.03	0.03	0.07	0.10	0.10	0.13	0.13	0.13
In range:	t+0	t+1	t+2	t+3	t+4	t+5	t+6	t+7	t+8	t+9
1000-3000m		0.27	0.40	0.40	0.37	0.23	0.20	0.13	0.13	0.20

7. ábra Egy lehetséges megjelenítési módja az adott helyen várható látástávolság előrejelzésnek (a szerző által készített ábra)

Az alkalmazandó numerikus alapú időjárás előrejelző modellekről

Azt látnunk kell, hogy a mai korszerű repülésmeteorológiai támogatás alapvetően numerikus időjárás előrejelző modellek használatán alapul. A numerikus módon történő prognosztizálásnak számos előnye van, melyek a következőkben foglalhatók össze:

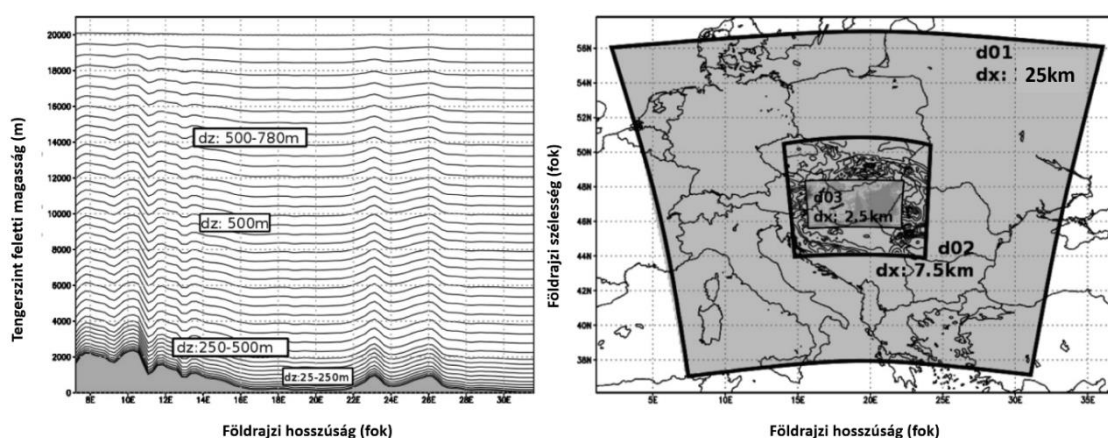
- ➔ térben és időben nagy felbontással alkalmazható módszer az adott prognosztikai tartományon belül;
- ➔ igen sok állapotjelző prognosztizálható (így speciális igények is kielégíthetők az előrejelzés során);
- ➔ sokféle kimenet (output) készíthető az utófeldolgozás során;
- ➔ az időjárási szélsőségeket is jól lekövethetjük velük;
- ➔ az éghajlat-ingadozások nem rontják el az eredményt;
- ➔ nagyon könnyen vizualizálhatóak a kapott eredmények.

Másrészről azonban vannak korlátai ennek az előrejelzési módnak is:

- ➔ nagy és folyamatos számításigény;
- ➔ nagy mennyiségű adat feldolgozását igényli a prognózisok előállításához (kezdeti- és peremfeltételek, adatasszimiláció);
- ➔ bonyolult parametrizációs technikát igényel (amelyek gyakran statisztikus megközelítésből származnak);

- nagy pontosságú statikus adatbázist igényel a prognosztikai tartományon belül (pl. növényzet borítás, talajtípus eloszlás, a felszín fizikai konstansainak helyi ismerete stb.)

A numerikus modellek alkalmazása a közfeladatot ellátó repülések biztosítása során alapvető fontosságú, azonban a korábbi fejezetekben leírtak alapján, jelentős előkészítő munkákat szükséges elvégezni. Jelen tanulmányban a WRF modell rendszer alkalmazásán keresztül mutatjuk be egy repüléstámogató rendszer numerikus prognosztikai alapjait [34]. A szóban forgó repülések térbeli és időbeli dimenzióit figyelembe véve, arra van szükségünk, hogy Magyarország területére képesek legyünk nagy térbeli és időbeli felbontásban numerikus prognózis készítésére. Ebből az adódik, hogy – figyelembe véve az ilyen típusú előrejelzésekre vonatkozó kritériumokat, előírásokat – célszerűen egy többszörös, teleszkopikus beágyazású rendszert szükséges implementálni. Az előzetes számításaink szerint egy ilyen modell beállítás az alábbi módon beágyazott tartományokat (domain) tartalmazhatja (8. ábra, jobb oldali kép).



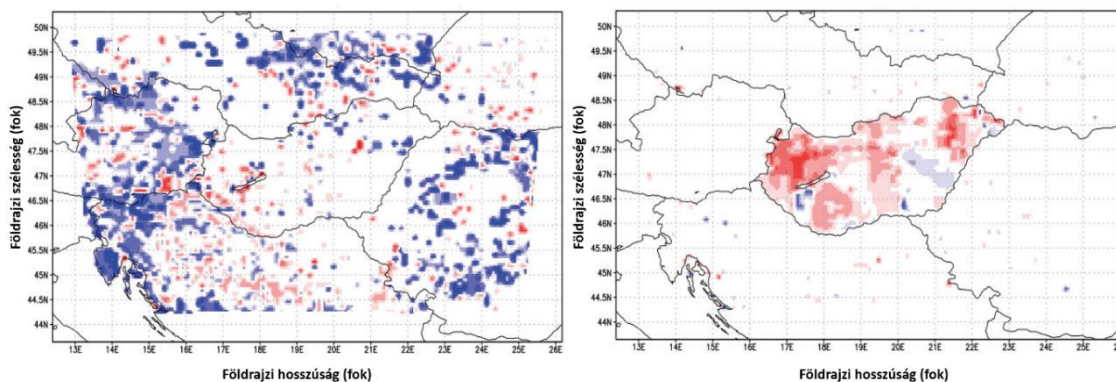
8. ábra Egy alkalmazható domain-konfiguráció a WRF numerikus modell futtatása során. Jobb oldalon a beágyazott tartományok elhelyezkedése, a bal oldalon pedig a felszín követő vertikális rétegek láthatók [35]

Természetesen a fenti konfiguráció kidolgozásakor figyelembe kellett vennünk, hogy a horizontális és vertikális térbeli felbontás elegendő legyen, a kívánt pontosságú prognózisok elkészítéséhez. Ez azt jelenti, hogy pl. a d3 tartományban az alkalmazott vízszintes rácsfelbontás már 2,5 km és függőlegesen 44 szintben kerül kiszámításra minden prognosztikai változó értéke.

Az alkalmazható statikus modell adatbázis nem elegendő pontosságú a finom felbontású numerikus outputok készítéséhez, ezért az eredeti USGS (Unites States Geological Service) által elérhető terület hasznosítási adatbázist a CORINE 2000 lényegesen finomabb felbontású adataival cseréltük ki a teljes prognosztikai tartományon belül. A talaj típus adatok esetén a FAO (Food and Agriculture Organization) adatok helyett, a DKSIS (Digital Kreybig Soil Information System) által elérhető hazai információkkal dolgoztunk (9. ábra) Az ábrán jól láthatóak a különbségek az eredeti, illetve az általunk alkalmazott statikus adatok között.

Beszélnünk kell még az alkalmazott parametrizációs sémák kiválasztásáról és a végül alkalmazott parametrizáció kombinációról. Munkánk során – tekintve, hogy repüléstámogatást kívánunk megvalósítani – előzetesen áttekintettük a 2012. év repülésmeteorológiai szempontból „nehéz” időjárási helyzeteket és 9 meteorológiai szempontból kritikus szituációt kiemeltünk ezek közül. Sikerült beszerezni ezekhez az időjárási helyzetekhez az OMSZ által mért adatokat

és a logikailag összeköthető parametrizációs sémák adta kombinációkra elvégeztünk teszt-futtatásokat azért, hogy a kapott előrejelzéseket verifikálni tudjuk a 9 kiemelt időjárási helyzet részletes adataival. Meghatároztunk egy legjobban teljesítő parametrizációs kombinációt és azt használjuk a WRF alapú numerikus előrejelzések készítéséhez [35]



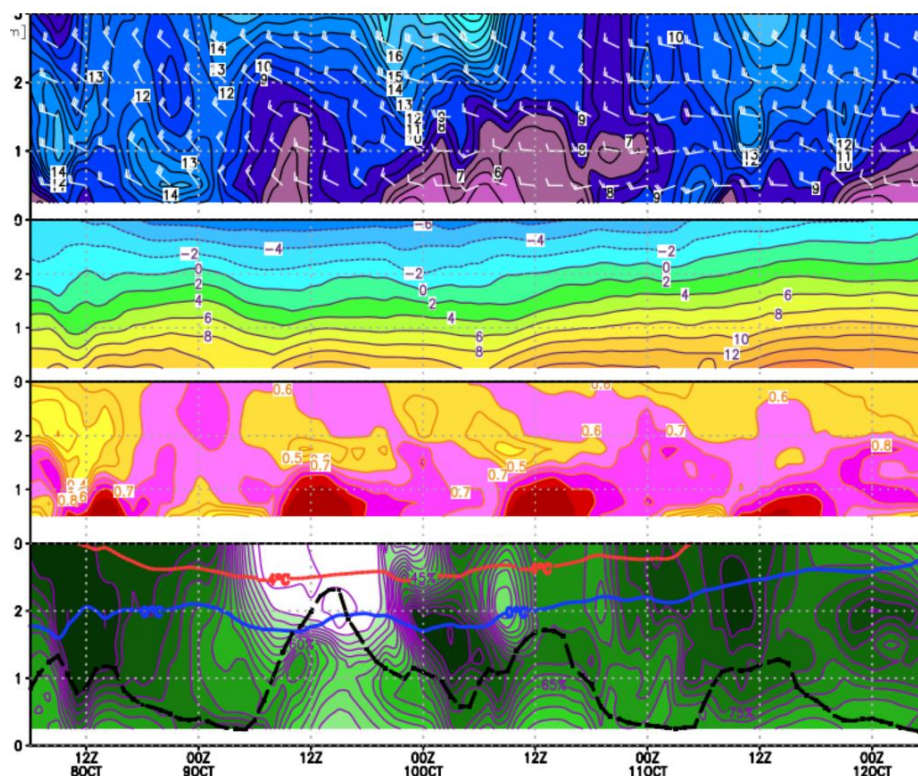
9. ábra A területhasznosítási és a talajtípus adatok módosításából adódó különbségek az alkalmazott WRF numerikus modell esetében. Bal oldal: USGS-CORINE különbségek területi eloszlása a prognosztikai tartományban. Jobb oldal: FAO-DKIS különbségek területi eloszlása hazánk területén [35]

Kezdetben, a modellhez kezdeti- és peremfeltételként az amerikai GFS globális numerikus modell $0,5^\circ \times 0,5^\circ$ -os felbontású előrejelzéseinek európai kivágatát alkalmaztuk és skáláztuk le az említett WRF prognosztikai tartományra, de már hozzáférhető a $0,25^\circ \times 0,25^\circ$ -os GFS output is, így jelenleg ezzel dolgozunk. A modell naponta négyszer fut (00, 06, 12 és 18 UTC-kor) és 96 óra időtartamra készít előrejelzéseket.

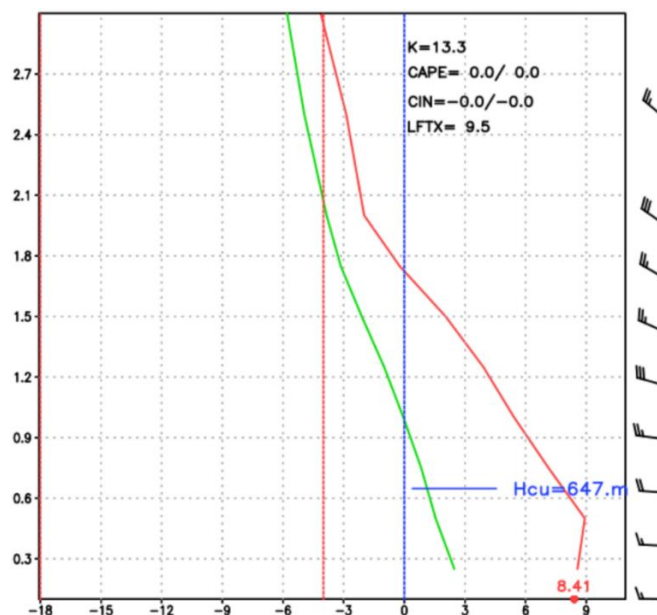
A kapott numerikus előrejelzési adatok szemléletes, felxibilis, felhasználóbarát grafikai megjelenítés is lényeges momentum, ezért számos lehetőséget kell nyújtania egy meteorológiai támogató rendszernek ezen a területen is. Alapvető elvárás, hogy az alábbi típusú megjelenítések elérhetőek legyenek benne:

- ➔ idősor jellegű (egy adott paraméter, egy adott helyre, időben történő megjelenítése);
- ➔ meteogramm jellegű (egy adott paraméter egy adott helyre, időben és magassági eloszlásban egyidejű megjelenítése);
- ➔ térképi jellegű (egy adott paraméter, adott szintben és időpontban történő területi eloszlásának megjelenítése);
- ➔ táblázatos jellegű (egy vagy több paraméter, egy adott helyen és időben történő karakteres megjelenítése);
- ➔ animált megjelenítési mód (pl. térképi megjelenítésnél az idő léptetésével mozgófilmszerű bemutatás lehetősége);
- ➔ kombinált animáció lehetősége (több paraméter térképének egy idejű megjelenítése és időben történő léptetése);
- ➔ tetszőleges két vagy több pontot érintő metszet készítésének lehetősége a prognosztikai tartományon belül;
- ➔ vertikális eloszlások bemutatásának lehetősége, adott helyre és időpontra történő ábrázolással és ennek animációja;
- ➔ egyéb, speciális diagramok, pl. veszélyes időjárási jelenség miatt nem javasolt zónák, (No Fly Zones, NFZs) kijelölése és ábrázolása.

A 10., a 11. és a 12. ábrán bemutatunk néhány grafikai megjelenítési lehetőséget.

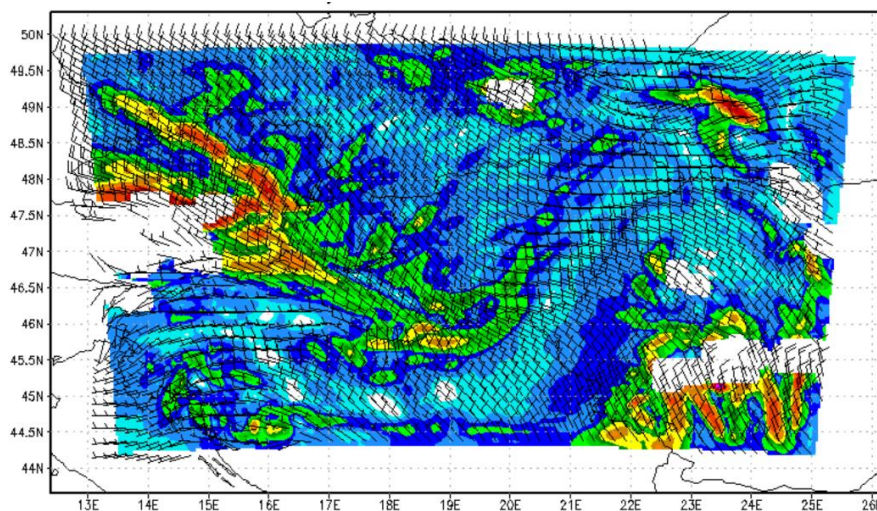


10. ábra. Meteogramm típusú megjelenítés. Fentről lefelé: szél, hőmérséklet, hőmérsékleti advekció és relatív nedvességi mezők változása egy adott repülőtérben az elkövetkezendő 96 órában az alsó troposzféra régióban (3 km és alatta). Az alsó metszetben a kék vonal a 0 °C izoterma szintjének, míg a szaggatott fekete a planetáris határréteg magasságának változását mutatja ebben a légrétegben (Gyöngyösi A. Zénó által készített ábra)



11. ábra. Egy adott repülőtér felett, adott időben várható függőleges eloszlása a hőmérsékletnek (piros vonal), a harmatpontnak (zöld vonal) és a szélnek (fekete szél-zászlók). A vízszintes tengelyen a hőmérséklet/harmatpont (°C), a függőlegesen pedig a magasság (m) került ábrázolásra (Gyöngyösi A. Zénó által készített ábra)

A 10. ábra szerinti ábrázolási mód alkalmas arra, hogy képet nyerjünk egy adott repülőtérre vonatkozóan, hogy alakulnak fontos meteorológiai változók értékei az elkövetkezendő prognosztikai intervallumban. Itt az időbeli menet van kiemelve és az adott paraméter értéke pedig színskálával megjelenítve. A 11. ábrán egy vertikális profilt láthatunk, amelyen egy adott földrajzi hely, adott időben várható hőmérsékletének, harmatpontjának és szélprofiljának magasság szerinti változását követhetjük nyomon.



12. ábra Az ún. hibrid turbulencia index területi eloszlásának prognózisa egy adott időpontra és magasságra vonatkozóan. A függőleges tengelyen a földrajzi szélesség, a vízszintesen a földrajzi hosszúság került ábrázolásra. Az index értéke színskálával ábrázolva. Az adott szinten várható szélirány és szélesség fekete színű szélzászlóval jelezve (Gyöngyösi A. Zénó által készített ábra)

A 13. ábrán pedig egy tipikus térképes ábrázolási módot mutatunk be, melyen a turbulencia előrejelzésére gyakran alkalmazott ún. hibrid turbulencia index területi eloszlását láthatjuk 1500 méteres tengerszint feletti magasságon, egy konkrét időpontban, a prognosztikai tartományra vonatkozóan (színskálával jelölve). E mellett az adott magasságban várható szélirány és szélesség is látható a térképen (szélzászlóval azonosítva).

Az alkalmazandó hibrid (kombinált) alapú időjárás előrejelző modellekről

Korábban említettük már, hogy a repülésmeteorológiai szempontból rendkívül fontos látástávolság és felhőalap prognózisok gyakran nem elég pontosak, ha csak numerikus vagy statisztikus megközelítést alkalmazunk az előrejelzési eljárás során. Éppen ezért célszerű megvizsgálni annak lehetőségét, hogy – első sorban az említett két időjárási jellemző becsléséhez – kombinált, ún. hibrid módszerű eljárást dolgozzunk ki és amennyiben ez a módszer a verifikáció során igazolhatóan jobban teljesít, építsük be a közfeladatokat ellátó repülések meteorológiai biztosításának operatív rendszerébe [36]. Ha összehasonlítjuk a statisztikus (jelen esetben az analóg típusú) és a numerikus prognózisok fontosabb tulajdonságait, akkor ezt az alábbi táblázat segítségével tehetjük meg (1. táblázat). Fontos megjegyezni, hogy ezek a tulajdonságok olyan prognózisokhoz kapcsolódnak, melyek képesek a látástávolságot és a felhőalapot is becsülni. Más időjárási változó esetén pl. hőmérséklet, légnedvesség stb. amennyiben sűrűbb mintavételezési adatbázis rendelkezésünkre áll, az analóg előrejelzés alkalmazásának gyakorisága megnőhet.

Tulajdonságok megnevezése	Analóg prognózis	Numerikus prognózis
Futtatás gyakorisága	azonos az észlelések gyakoriságával (0,5–1 óra)	elvileg tetszőleges, gyakorlatban 6–12 óránként
Területi lefedettség	csak ott, ahol van hosszabb mérési perióduson alapuló adatbázis	a prognosztikai tartományban bármely pozícióban
Pontosság változása az adott időszakban	relatív gyorsan csökkenő	alapvetően egyenletes
Az elegendő pontosságot adó előrejelzési időtartam	általában max. néhány óra	általában max. 1–2 nap
Verifikációs lehetőségek	teljesen verifikálható	korlátozottan verifikálható

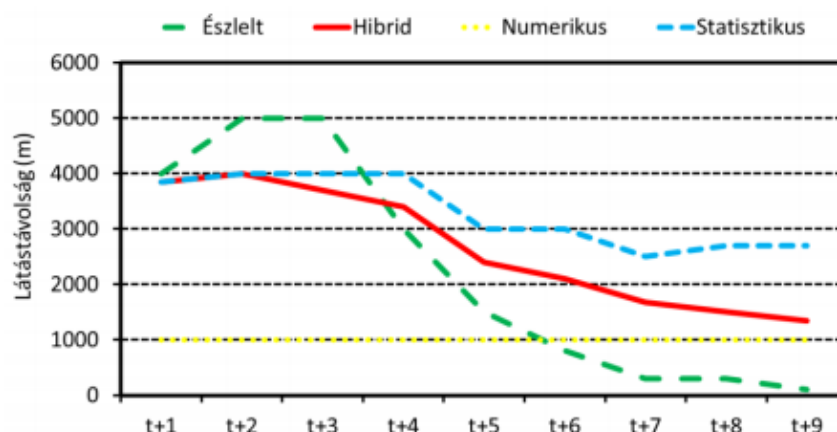
1. táblázat Az analóg és a numerikus elvű prognózisok fontosabb tulajdonságainak összevetése [19]

A fenti táblázatban szereplő tulajdonságok lényegében az általunk alkalmazott, METAR távirati adatokból előállított adatbázison alapuló analóg és a WRF modell által szolgáltatott numerikus előrejelzésekhez kapcsolódnak. Ezek alapján elmondhatjuk, hogy az analóg előrejelzések időbeli felbontása repülőterek esetében 0,5 óra (megegyezik a METAR adatszolgáltatás nemzetközi gyakoriságával), míg a WRF numerikus modell 6 órás ciklusokban szolgáltat prognózist (illeszkedve a GFS globális modell prognózis-ciklusához), tehát az analóg modell jóval sűrűbben futhat! Világos, hogy az analóg előrejelzéshez helyhez kötött éghajlati adatbázis szükséges, így alkalmazása földrajzilag korlátozott. Ezzel szemben a numerikus produktumok lényegében a teljes prognosztikai tartományon elérhetők, még ha megfelelő interpolációs technikát is kell alkalmazni ehhez. Fontos kérdés a két modell produktum pontosságának időbeli változása, a becslés készítésének időpontjától kezdve. Az analóg módszer hatékonysága időben viszonylag gyorsan romlik, míg a numerikusé jó közelítéssel egyenletesnek mondható. A verifikáció kérdésében – tekintettel arra, hogy a mérési adatok csak ott vannak, ahol egyébként analóg módszer is használható – azt mondhatjuk, hogy az analóg modell teljes mértékben, ezzel szemben a numerikus csak részlegesen verifikálható (hiszen csak azokon a helyeken tudjuk összevetni a numerikus adatokat az észleléssel, ahol maga az észlelés történik).

A fentiek alapján érthető, hogy mindkét prognosztikai módszernek vannak előnyei és hátrányai, ugyanakkor a kettő tudatos, célszerű kombinációjával elérhetjük, hogy a kapott hibrid becslés általában jobban teljesítsen, mint a másik kettő, külön-külön. Ehhez nyilvánvalóan komoly elemző és verifikációs munkát kellett végeznünk, melynek eredményeképpen előállítottunk egy speciális, hibrid látástávolság prognózist, mely a következőképpen értelmezhető:

$$Látástávolság_{HIBRID} = a_j Látástávolság_{ANALOG} + b_j Látástávolság_{NUMERIKUS} \quad (1)$$

ahol $a_j + b_j = 1$ és a_j és $b_j \in [0,1]$ valamint j az előrejelzések időlépcsőinek száma. A hibrid látástávolság konstansainak értékének meghatározása, annak elvi alapja és az alkalmazott kategóriák kialakításának módszere részletesen megtalálható korábbi munkáinkban, így itt most részletesen nem szólunk ezekről [19][35][36]. Az így előállított látástávolság becslési konstrukció előnye, hogy az idő előre haladtával egyre inkább valószínűbb dinamikai változások lekövetése lehetővé válik azzal, hogy a numerikus modell súlya (b_j) időben növekvő értéket kap, másrészt – kihasználva az analóg előrejelzés frissítési gyakoriságát (0,5 óra) – amennyiben a hibrid prognózis módosítása szükséges (mert pl. kevésbé megbízhatónak bizonyult a korábbi futás), ekkor ezt fél óránként megtehetjük! Ezzel szemben, a numerikus prognózis gyakorlatban történő frissítésére csak 3-6 óránként van mód jelenleg.



13. ábra A látástávolság tényleges alakulása és a különböző prognosztikai módszerekkel történő előrejelzése 2013. december 23-án, Szolnokon 15 UTC-től [37]

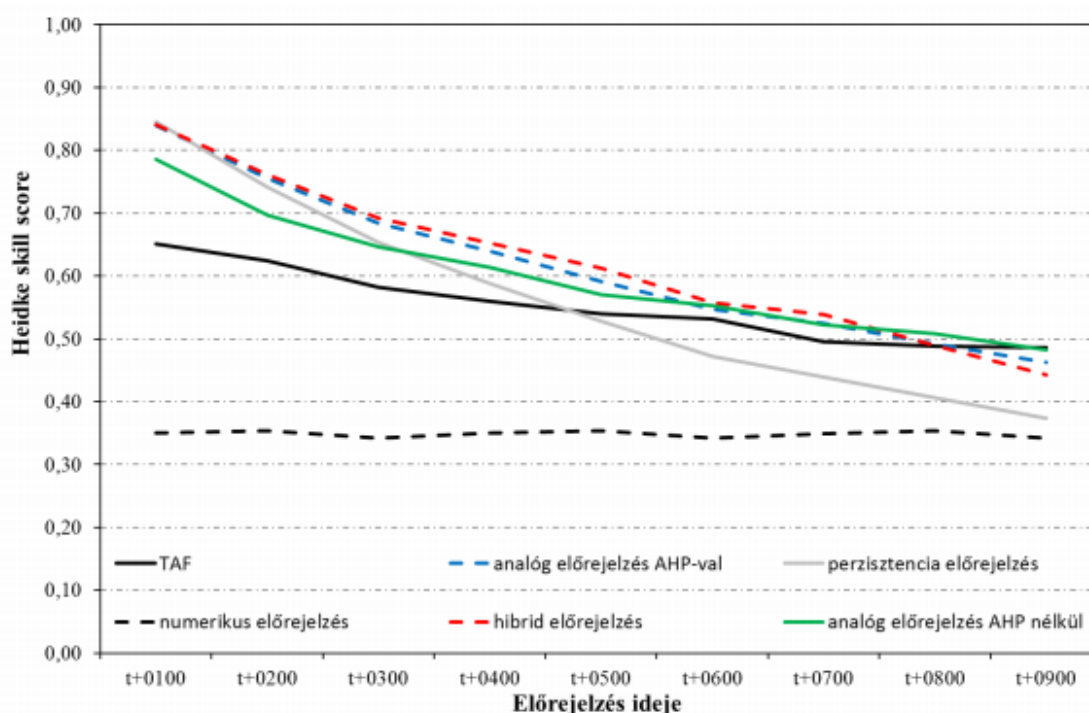
A hibrid látástávolság prognózis működését és egyben alkalmazhatóságát egy esettanulmányon keresztül mutatjuk be [37]. A látástávolság alakulását 2013. december 23-án, Szolnokon (LHSN), 15 UTC időponttól kezdve a 13. ábrán láthatjuk (zöld szaggatott vonal). Erre az időszakra, három különböző elven készítettünk előrejelzést is a statisztikus (analóg), a numerikus és a hibrid módszerekkel. Ezek a 13. ábrán rendre kék szaggatott, sárga pontozott és piros folyamatos vonallal kerültek ábrázolásra. Megfigyelhető, hogy a látástávolság a szolnoki repülőtéren egy rövid javuló és stagnáló időszak után (amikor a látástávolság 5000 m is volt) hirtelen csökkenni kezdett (19 UTC-től) és a 9. órában már 200 méter volt csak. Az is világos, hogy a numerikus prognózis (utófeldolgozással együtt), már a kezdeti időszakban jelentősen alul becsülte a szóban forgó értéket (a valós 4000 m helyett 1000 m-t prognosztizált). Ezt az értéket végig tartotta is, miközben az észlelt látástávolság jelentősen ingadozott. A statisztikus módszer a prognosztikai időintervallum kétharmadában viszonylag jól követte a valós érték változását (nagyjából 1000 méteres differenciával), az intervallum végére azonban ez az eltérés 2500 méterre nőtt. A hibrid előrejelzés teljesített legjobban a teljes 9 óra alatt, hiszen eltérése a tényleges értéktől nem volt nagyobb, mint 1500 m és tendenciájában is jól követte a látástávolság romlásának folyamatát. Meg kell jegyeznünk, hogy a numerikus előrejelzés a 12:00 UTC alapú modellfuttatásból készült, míg a statisztikus modell prognózis a 14:45 UTC és azt megelőző METAR táviratok alapján került elkészítésre. Ezért ebben az esetben a majdnem 3 óra időelőny a statisztikus modell javára, jelentősen hozzájárult, hogy az az előrejelzés sokkal jobban tudta követni az időjárás alakulását.

Az alkalmazandó időjárás előrejelző modellek verifikációja és annak eredményei, a látástávolság becslése esetén

Felmerül persze a kérdés, hogy az így kidolgozott hibrid látástávolság előrejelzés, milyen teljesítményt nyújt általában. Ennek eldöntésére egy rendkívül alapos verifikációs eljárást dolgoztunk ki és hajtottunk végre. A teljes verifikációs módszer leírása és a kapott eredmények megtalálhatók több korábbi publikációnkban is [18][19][20]. Itt most két ábrán szeretnénk bemutatni a legfontosabb eredményeinket röviden.

A 14. ábrán hat féle prognózis teljesítményét vetettük össze a látástávolság becslése során. A TAF előrejelzés a repülőtéren szolgálatot teljesítő meteorológus produktuma. A perzisztencia

előrejelzés alapja, az adott időpontban mért látástávolság érték fenntartása a teljes vizsgált időtartamra (9 óra). A numerikus prognózis a WRF modell és egy utófeldolgozási eljárással készített becslést jelent. Külön szerepeltetjük az analóg módszer esetén a kiindulási súlyokkal és az AHP módszerrel (finomított súlyokkal) készített előrejelzéseket is. A vízszintes tengelyen jelzett előrejelzés ideje alatt a TAF táviratok érvényességének kezdő időpontjától vett időbeli távolságát értjük. A numerikus modell utófeldolgozása során alkalmazott látástávolság prognózis alsó határa 1000 méter volt, ezért a vizsgálatban csak az e fölötti értékekkel dolgoztunk. Így 1000-5000 méter között, 100 méteres kategória határokat állapítottunk meg és kiszámítottuk a verifikációs paraméter értékeket minden előrejelzésre és minden kategória határra vonatkozóan. A verifikációs időszak 2013. 08. 01.–2014. 07. 31. között volt és a három katonai (LHSN, LHKE, LHPA) és a Liszt Ferenc nemzetközi repülőtérre (LHBP) vonatkozott [19][36].



14. ábra A különböző kategória határookra (1000–5000 méterig 100 m-es lépésekkel) és a vizsgált 4 repülőtérre (Szolnok [LHSN] és Kecskemét [LHKE], Pápa [LHPA] és Budapest [LHBP]) vonatkozó átlagos HSS értékek az előrejelzési idő függvényében [19]

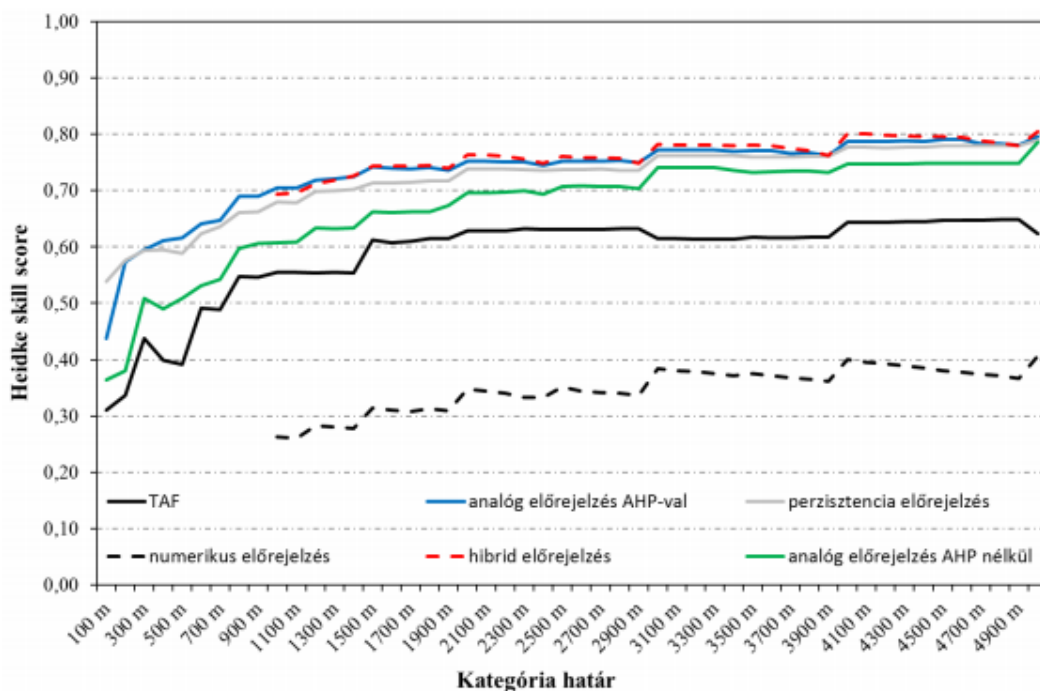
A prognózisok bevalását a Heidke skill score (Hss) paraméterrel becsültük, mely a nemzetközi szakirodalomban is széles körben használt mutató és az egyes becslések teljesítményét a perzisztencia előrejelzéshez (mint primitív prognózishoz) hasonlíthatjuk első körben. Természetesen az egymáshoz való viszonyítás is fontos szerepet játszik az elemzésben. Ahogy a 14. ábra mutatja, néhány jellegzetes és egyben fontos megállapítást tehetünk az eredményeket értékelendő:

- ➔ az AHP módszer alkalmazása nagyban javította az eredeti analóg becslésünk pontosságát és ez a javulás a legkisebb látástávolságok esetén volt a legnagyobb mértékű, ami külön is figyelemre méltó és mutatja az AHP módszer hatékonyságát az előrejelzési területen is;
- ➔ szembevetendő, hogy az általunk fejlesztett hibrid és AHP módú analóg becslések a teljes prognosztikai időtartam alatt messze a legjobb teljesítményt nyújtják és a TAF előrejelzéseket felülmúlják az első 8 órában, nem is beszélve a perzisztencia prognózisról;

- az alkalmazott WRF alapú, de utófeldolgozással pontosított előrejelzés ugyan alacsony beválási értékkel rendelkezik a vizsgált 9 órás intervallumban, de teljesítménye stabil, így hosszabb időben előre történő predikció esetén (pl. 12–24 óra) már versenyképes.

Rendkívül fontos tudnunk, hogy az általunk alkalmazandó látástávolság előrejelzések milyen beválási mutatókkal rendelkeznek a különböző időjárási helyzetekben előforduló látástávolság értékek becslésekor. Világos, hogy minél alacsonyabb a szóban forgó érték, annál nagyobb veszélyt jelent a repülésre, ezért azon dolgozunk, hogy rossz látási viszonyok esetén is minél pontosabb prognózist tudjunk nyújtani a felhasználóknak. A 15. ábrán bemutatjuk, hogy a korábban említett egy éves időszakra és a hat különböző típusú prognózisa vonatkozóan, hogyan alakulnak ezek a jósági mutatók a szóban forgó látástávolság értékek függvényében, az első hat órára vonatkozóan.

Jól észre vehető, hogy csak az extrém alacsony 100 méteres látástávolságnál fordulhat elő, hogy a perzisztencia prognózis jobb beválást ad, mint az AHP alapú analóg módszer, ennél jobb látási viszonyok között azonban már az általunk kidolgozott eljárás pontosabb. 1000 métertől felfelé a legjobb előrejelzés a hibrid prognózistól várható a vizsgált 6 órás intervallumban, bármilyen időjárási helyzetben.



15. ábra A vizsgált prognosztikai időintervallum első 6 órájára vonatkozó átlagos beválási értékek (Hss) a vizsgált négy repülőtéren, az egyes kategória határok függvényében [19]

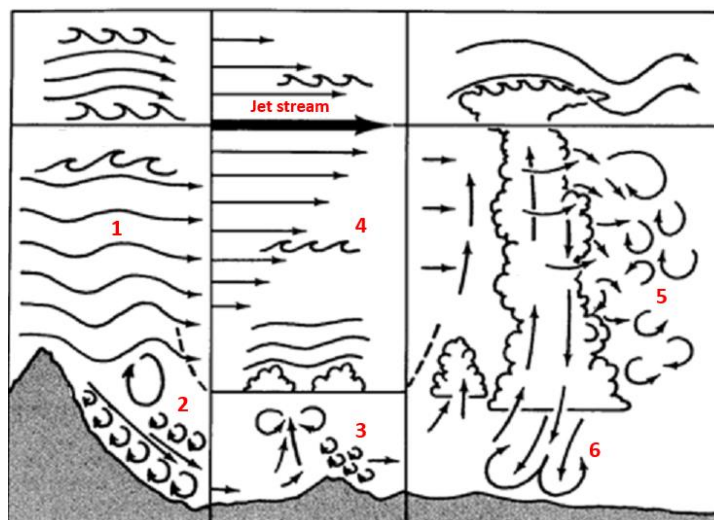
Összességében elmondhatjuk tehát, hogy a verifikációs vizsgálatok az alábbi fontos megállapításokat támasztják alá:

- az AHP módszer által finomított súlytényezők alkalmazása az analóg módszer esetén indokolt, jelentősen növeli a prognózisok beválását;
- a vizsgált 9 órás prognosztikai intervallum első 6 órájában a hibrid és az analóg előrejelzés lényegesen jobb beválást mutat, mint a TAF prognózis;
- az általunk kidolgozott analógiás és hibrid becslések minden kategória határ esetén jobb teljesítményt nyújtanak a többi prognózisnál, azaz alkalmazhatóságuk nem függ az időjárási helyzettől.

VESZÉLYES IDŐJÁRÁSI JELENSÉGEK PROGNOSTIKAI LEHETŐSÉGEI A METEOROLÓGIAI TÁMOGATÁSBAN

A turbulencia és szélnyírás prognózisának lehetőségei

A légkörben mindig jelen levő turbulencia és az azzal gyakran együtt előforduló szélnyírás, mint a repülésre veszélyes időjárási jelenségek leírása és ezek megjelenési módja számos szakirodalomban fellelhetők [16][38][39][40]. A légköri turbulencia egyrészt a levegő nagy sebességű áramlásából és belső súrlódásából (termikus), másrészt ennek az áramló levegőnek a felszíni tereptárgyakkal történő kölcsönhatásából kialakuló (mechanikus) - igen gyakran örvénylő jellegű – mozgásforma, melynek horizontális karakterisztikus mérete az 1000 méterestől a centiméteres tartományig terjed, tehát a meteorológiai mikro-skálán jelenik meg (16. ábra).



16. ábra A légköri turbulencia alaptípusai [38] módosítva a szerző által. A számok magyarázata a szövegben

A 16. ábrán látható légköri turbulencia típusok az alábbiak:

1. hegyvidéki hullámokhoz kapcsolódó turbulencia (esetleg rotorfelhő kialakulásával);
2. alacsony szintű, felszíni domborzathoz kapcsolódó turbulencia;
3. alacsony szintű, jellemzően sekély konvekcióhoz kapcsolódó turbulencia;
4. felhő nélküli turbulencia (Clear Air Turbulence, CAT) a jet közelében;
5. TCu és Cb felhőben történő, mély konvekciós folyamatokhoz kapcsolódó turbulencia;
6. Cb felhőből lezúduló mikroszélrohamhoz (downburst/micrburst) kapcsolódó turbulencia.

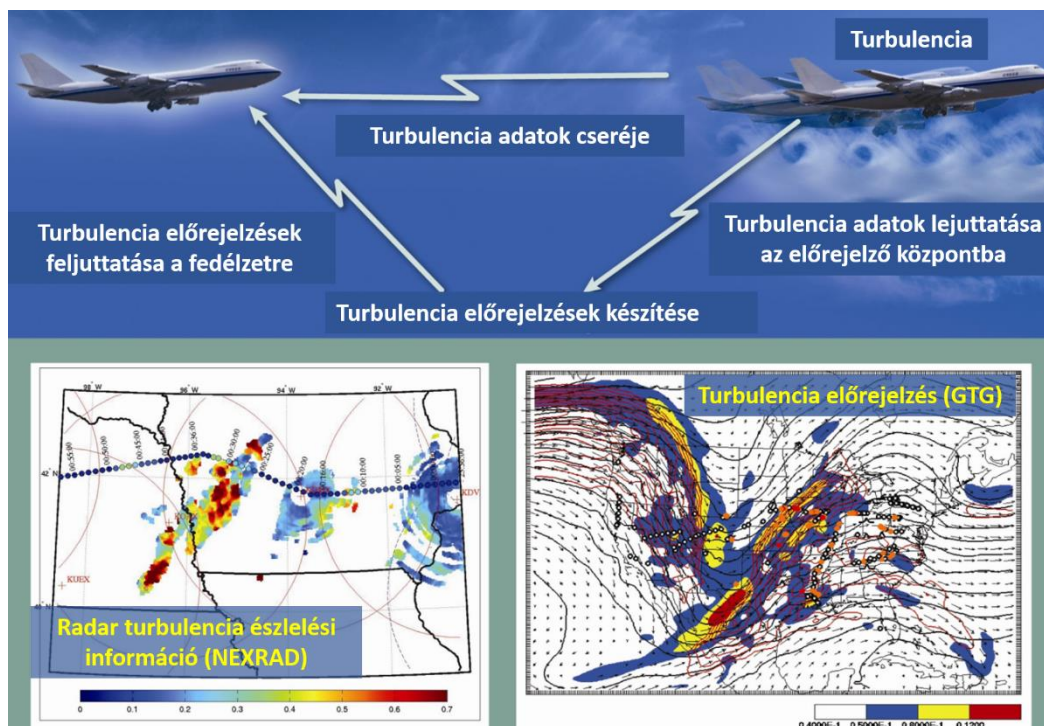
Munkánkban korábban vizsgáltuk a közfeladatokat ellátó repülések fizikai dimenzióit és arra jutottunk, hogy a leginkább érintett felszín feletti magasságok 1000 m alatt vannak és 3–4000 méter felett ritkán jelenik meg ilyen jellegű feladat. Ebből és a zivatarok elkerülésének kötelező alkalmazásából adódóan, számunkra az 1., 2. és 3. számú turbulencia típus az alapvetően fontos, melyeknek a prognózisával foglalkoznunk kiemelten szükséges.

Előre kell bocsátani azt a fontos tényt, hogy egy korszerű, megbízható turbulencia-veszélyt jelző rendszer rendelkezésre állása, kizárólag több komponens együttes felhasználásával lehetséges (17. ábra) [41].

Ez azt jelenti, hogy az említett turbulencia-veszély jelzéséhez szükséges elemek az alábbiak:

- ➔ in-situ turbulencia mérések, észlelések, melyek alapvetően repülőgépes fedélzeti mérések (nagyobb légitársaságok végzik, PIREP jelentéseken keresztül);

- távérzékelési eszközökkel elvégzett mérések, észlelések, pl. NEXRAD (Next Generation Weather Radar) radarhálózat turbulencia észlelési algoritmus alkalmazása (NEXRAD Turbulence Detection Algorithm, NTDA) és további műholdas produktumok [42];
- turbulenciára vonatkozó ultrarövid és rövidtávú előrejelzések (statisztikus és numerikus produktumok előállítás).



17. ábra Az NCAR/RAL által fejlesztett turbulencia-veszély jelzésének elemei és struktúrája [41] szerző által módosítva

Jelenleg ezek az elemek egy integrált rendszerbe ágyazva alkotják az NCAR/RAL (National Center for Atmospheric Research/Research Application Laboratory) által fejlesztett turbulencia-veszély jelzésének módszerét, melynek kidolgozását az FAA (Federal Aviation Administration) is támogatja [41] Ennek a rendszernek a tényleges prognosztikai gerincét az ún. GTG (Graphical Turbulence Guidance) kombinált (statisztikus és numerikus) turbulencia előrejelzési eljárás adja, mely eljárás részletes leírása megtalálható *Sharman et. al. 2006* munkájában [39].

Nyilvánvaló, hogy a hazai közfeladatot ellátó repülések meteorológiai támogatása egy korszerű turbulencia-veszélyt jelző rendszer nélkül nem képzelhető el. Ugyanakkor az is látható, hogy az említett komplex turbulencia produktum teljesen analóg módon nem implementálható, hiszen pl. hazánk nem rendelkezik az amerikai NEXRAD radarhálózathoz hasonló rendszerrel. Viszont ezt a hiányzó láncszemet, helyettesíteni lehet megfelelő módon felszerelt és üzemeltetett pilóta nélküli repülőeszköz-flottával. Korábbi munkánkban már szóltunk az ilyen repülőeszközök alkalmazásának lehetőségéről és a velük kapcsolatos bizonyos módszertani kérdésekről [3]. Az ilyen módon alkalmazott repülőgépek közel valós idejű információt képesek szállítani alapvetően az alsó és középső troposzféra régiójából, mely adatok bejuthatnak közvetlenül egy turbulencia-veszélyt jelző rendszerbe és a numerikus modellek adatasszimilációs rendszerébe is (ezzel két irányból is növelhető a turbulencia-veszélyt jelző rendszer határfoka). Az alkalmazandó UAS flottát érintő további kérdéseit, feladatait, további kutatások eredményei fogják pontosan meghatározni.

A hazai repüléstámogatás rendszeréhez javasolt turbulencia-veszélyt jelző rendszer az alábbi komponenseket foglalja magában:

- ➔ a szabadon hozzáférhető, általában a nagyobb légitársaságok által szolgáltatott in-situ meteorológiai információk (AMDAR és PIREP táviratokból);
- ➔ a kisép és vitorlázó repülések során gyűjtött in-situ meteorológiai adatok (pl. FLARM és/vagy OGN rendszeren keresztül történő mérések begyűjtése és feldolgozása), melyen jelenleg is kollégáimmal együtt dolgozunk;
- ➔ a szintén szabadon hozzáférhető rádiószondázási adatok (a rendszeres és esetleges in-situ mérések egyaránt feldolgozhatók);
- ➔ a hozzáférhető EUMETSAT meteorológiai műholdas produktumok (Numerical Weather Products Satellite Application Facilities NWP SAFs) [43][44];
- ➔ a numerikus modellek által szolgáltatott turbulencia prognózisok (WRF alapú, nagy felbontású modell adatokból képezett turbulencia mérőszámok, indexek alkalmazásával) [38][45][46];
- ➔ az említett időjárás-felderítő UAS-flotta adatai (adott módszertan által meghatározott útvonalon és időben történő repülések) [3].

1. Ellrod-Knapp turbulencia index (TI2):

$$TI2 = VWS (DEF - DIV)$$

$$VWS = \frac{\partial V}{\partial z} = \frac{(\Delta u^2 + \Delta v^2)^{1/2}}{\Delta z}$$

$$DEF = (DST^2 + DSH^2)^{1/2}$$

$$DST = \frac{\partial u}{\partial x} - \frac{\partial v}{\partial y}$$

$$DSH = \frac{\partial v}{\partial x} + \frac{\partial u}{\partial y}$$

$$DIV = \frac{\partial u}{\partial x} + \frac{\partial v}{\partial y}$$

2. Colson-Panofski turbulencia index (CPI):

$$CPI = VWS^2 \left(1 - \frac{Ri}{Ri_{crit}} \right)$$

$$Ri = \frac{g}{\Theta} \frac{\partial \Theta}{\partial z} \left(\frac{\partial V}{\partial z} \right)^2$$

$$Ri_{crit} = \frac{1}{\alpha} \frac{K_m}{K_h}$$

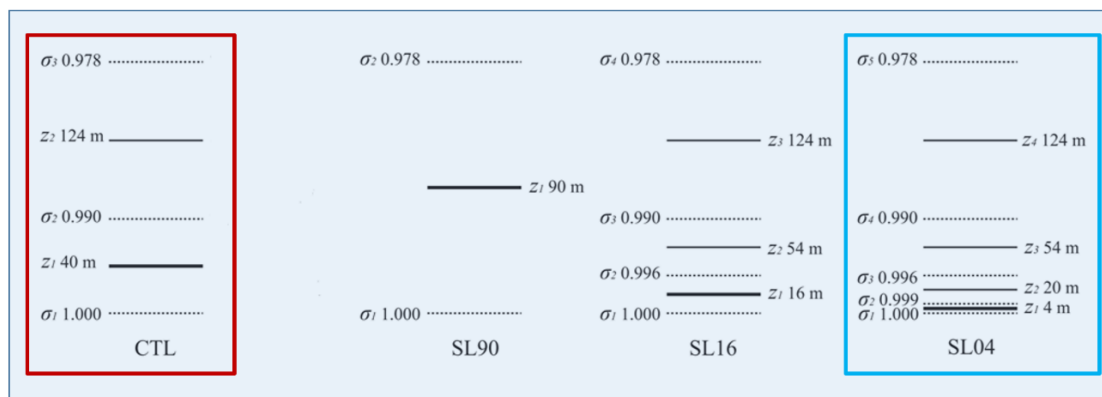
K_m : a hővezetés kinematikus diffúziós együtthatója.
 K_h : kinematikus eddy viszkozitás.

18. ábra Az alkalmazandó turbulencia indikátorok és azok kiszámításának módjai (a szerző által készített ábra)

A modell alapú előrejelzések területén korábban említett GTG eljárást alapul véve, lehetőség van ennek egy egyszerűsített verziójának használatára, amely eljárás azon alapul, hogy a GTG előrejelzésben szereplő, turbulenciát jelző számszerű indexek, paraméterek közül *csak néhányat vegyünk figyelembe* a prognózisunk során. A választás szempontja alapvetően az alsó és középső troposzférikus turbulencia indikátorok használatán nyugszik. [38][45] A hazai, szóban forgó repülések meteorológiai támogatása szempontjából a turbulencia numerikus prognózisában, a turbulencia előrejelzésére kiindulásként az Ellrod-Knapp turbulencia indexet (TI2) és a Colson-Panofski indexet (CPI) javasoljuk (18. ábra). A planetáris határrétegben (FL040-ig) a CPI, felette pedig a TI2 használata mutatta a legjobb eredményt [39][46]. Ahhoz, hogy a légköri turbulencia prognózisok beválása elfogadható mértékű legyen, a numerikus modell horizontális felbontását 1 km-re szükséges növelni, a vertikális szintek száma pedig az alsó 1300 m (FL040) alatt legalább 60 kell legyen [46].

Abból a célból, hogy a planetáris határrétegben és talaj közelében előforduló turbulencia prognózisára felkészítsük a numerikus modellt, kiemelten szükséges a modell-tartományra nagy felbontású statikus adatbázisok illesztése (talaj, terület-hasznosítás, domborzat stb.). Ezek mellett a modell vertikális szintjeinek átszerkesztését is el kell végeznünk, hogy a kérdéses magassági

rétegben elegendően sűrűek legyenek a szintek, ahová a számításokat a modell elvégzi. Az átszerkesztés egyik lehetőségét a 19. ábrán mutatjuk be, amely a WRF modellben alkalmazott vertikális szintek lehetséges konfigurációját mutatja be, különös tekintettel a felszín közeli jelenségek finomabb megjelenítésére [47].



19. ábra A vertikális rétegek besűrítésének lehetőségei a WRF modellben, különös tekintettel a felszínközeli folyamatok finomabb megjelenítésére. A CTL szerkezet a WRF modell alap beállítása, az SL04 struktúra az általunk is javasolt rétegszerkezet. A folyamatos vonal a teljes, a pontozott pedig a fél σ szinteket jelöli [47] a szerző által módosítva

A 19. ábra azt mutatja, hogy a WRF modell alapértelmezett konfigurációja mellett (CTL) a $\sigma = 0,978$ -as magassági szint és a felszín (σ_1 nyomási szint) között hány darab modell-szint kerül beállításra és milyen struktúrában. Amíg a CTL-ben 5 szint kerül definiálásra, addig az általunk javasolt SL04-es szisztémában összesen 9 szintet találunk. Ez utóbbi esetben világosan látszik, hogy a CTL-hez viszonyítva, a felszín közelében igen sűrűn helyezkednek el a modell szintek egymáshoz képest, ami megfelel a talaj közeli pontosabb számítások elvégzésének. Pl. a CTL beállítás esetén a felszín felett az első magassági szint, ahol a modell számolni fog, 40 m, az SL04 struktúra esetén, viszont 4 méter lesz! Az SL04-es vertikális szerkezet használata számos, a repülésben igen fontos időjárási helyzetben (pl. stabilis inverziós helyzetek, kialakuló konvekció stb.) jól teljesített az összehasonlítások során [47]. Meg kell jegyeznünk azonban, hogy a magasabb szinteken előforduló CAT (Clear Air Turbulence) jelenség prognózisa alapvetően más megközelítéseket is igényel, de mivel ez a turbulencia fajta a felső troposzférában jelentkezik, ezért ebben a munkában nem tárgyaljuk a rá vonatkozó előrejelzési metódusokat. A meteorológiai támogatás során arra kell törekednünk, hogy a felhasználó számára a turbulencia mértékét (származzon is bármely módszer alkalmazásából), az ICAO ajánlások alapján *öt-fokozatú* (nincs, gyenge, közepes, erős, extrém) *skálán* jelenítsük meg. Ehhez az alkalmazandó turbulencia indexek esetében a határértékeket, egy korábban említett munkában találhatjuk [39].

A megjelenítés során a korábban említett lehetőségek közül, az adott szintben várható turbulencia területi eloszlásának (térképes), valamint egy adott hely körzetében történő meteogramm (időbeli metszet) jellegű hozzáférést egyaránt szükséges biztosítani. Véleményünk szerint, azonban a legfontosabb azoknak a 4D-ös térrészeknek az elkülönítése (No Fly Zones, NFZs), ahol veszélyes mértékű turbulencia várható (természetesen ezek meghatározása fontos és nehéz feladat, de egyben, az adott repülő eszköztől is erősen függő kérdés) [48]. Ugyanakkor, a valós idejű in-situ és/vagy

tervezett meteorológiai célú UAS repülések által szolgáltatott adatokat (amennyiben középestől nagyobb intenzitású turbulenciát észleltek vagy mértek), azonnal meg kell jeleníteni egy grafikus felületen keresztül a felhasználók számára, hogy időben értesüljenek a fennálló veszélyről.

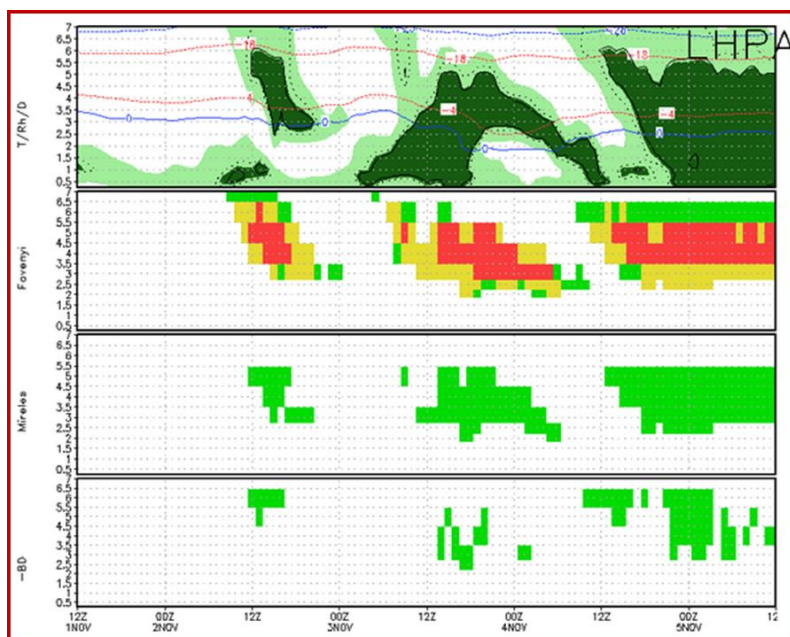
A repülő eszközök felületi jegesedésének prognosztikai megközelítése

A repülések során fellépő veszélyes időjárási jelenségek között a repülőgépek felületének és hajtóművének jegesedése fontos helyet foglal el. Magát a jelenséget korábbi munkáinkban részletesen tárgyaltuk, így most csak a szóban forgó folyamat előrejelzésének kérdéseivel foglalkozunk [15][16][49]. Maga a jelenség lefolyása rendkívül összetett légköri mikrofizikai folyamatok együttes eredménye, de az kétségtelen, hogy a kialakuló jégbevonat alakja és mennyisége egyéb fontos faktoroktól is függ (pl. alaki tulajdonságok, aerodinamikai áramlási viszonyok). Ugyanakkor azt is látnunk kell, hogy a jegesedési folyamat szükséges feltételét az atmoszféra teremti meg azáltal, hogy a 0 °C alatti hőmérsékletű felhőzetben megjelennek a *túlhűlt* cseppek, melyek a repülőgéppel történő ütközés során, annak felületére hirtelen kifagynak. Éppen ezért a felületi jegesedés prognosztikájának alapját az adja, hogy a fenti tulajdonsággal rendelkező légréseket becsüljük meg, de ez a prognózis csakis egyfajta „atmoszférikus jegesedési potenciál” (AJP) becslését jelentheti, különben az egész folyamatot félreértjük. Az AJP definíciója hazánkra, még meteorológiai értelemben nem kidolgozott, de mindenképp javasolt – hasonlóan a turbulencia előrejelzésnél alkalmazott – *ötfokozatú skálát* meghatározni az AJP-re vonatkozóan is (már csak azért is, mert az ICAO ajánlásban is erre tettek javaslatot). Tekintettel az AJP meghatározásának bonyolultságára, jelen tanulmányban az erre vonatkozó kérdéseket nem érintjük, ezt egy későbbi kutatás-fejlesztési projekt keretében valósulhat meg. Ez a kidolgozó munka pl. az Amerikai Egyesült Államokban kidolgozott Icing Flowchart alapján történhet [50]. Ha rendelkezésünkre áll az AJP, akkor a meteorológiai támogatásba azonnal beilleszthető, korszerű jegesedési prognózis alapját szolgáltathatja.

A probléma tehát az, hogy a troposzféra hőmérsékletének és nedvességének egyidejű, pontos becslése rendelkezésünkre álljon, lehetőleg nagy időbeli és térbeli felbontás mellett. A két légköri állapotjelző közül a hőmérséklet prognózisa lényegesen egyszerűbb, mint a légnedvességé. Ahhoz, hogy az elvárt jegesedési potenciált időben nyomon tudjuk követni, a korábban javasolt WRF modellt használhatjuk 1–2 km-es horizontális és a függőleges CFL-kritérium figyelembe vételével, hozzá illeszkedő, megfelelően sűrű vertikális rácsfelbontás mellett.

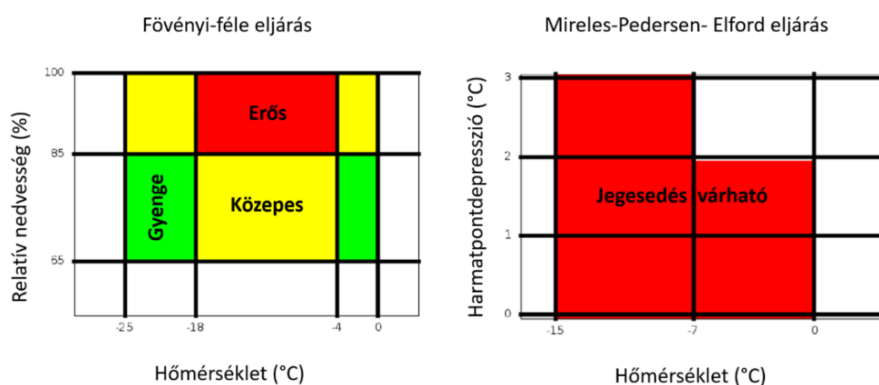
A jelenleg kísérleti céllal üzemelő, WRF-alapú numerikus modell által szolgáltatott előrejelzések további utófeldolgozásával négyféle egyszerű jegesedési produktumot állítunk elő:

- ➔ a relatív nedvesség és hőmérséklet figyelembe vételével;
- ➔ a Fövényi-módszer segítségével;
- ➔ a Mireles-Pedersen-Elford metódus szerint [50];
- ➔ és az ún. 8D eljárás alapján [50].



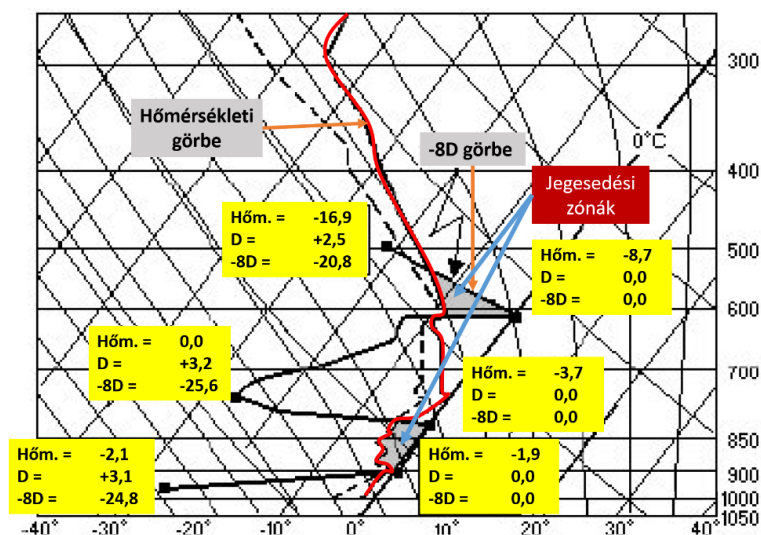
20. ábra Különböző jegesedést jelző módszerek által prognosztizált jegesedési zónák az alsó és középső troposzférában LHPA repülőtérén 2012. 11.01. és 2012. 11.05 között (Gyöngyösi A. Zénó által készített ábra)

Ahogy a 20. ábrán látható, a prognosztikai időszakra vonatkozóan előállított meteogramm, az alsó és a középső troposzférára vonatkozó jegesedési előrejelzéseket tartalmazza, a fentebb felsorolt eljárásokra vonatkozóan. Az ábra legfelső negyedében a hőmérséklet és a relatív nedvesség alakulását mutatjuk be. A hőmérséklet izo-vonalakkal, a relatív nedvesség színezéssel került bemutatásra. A világoszöld színnel a 65% feletti relatív nedvességi tartományt, míg sötétzöld színnel a 70% feletti értékeket jelezzük. Nyilvánvaló, hogy ahol a hőmérséklet 0°C alatti és a zöld tartomány ezt lefedi, ott jegesedésre lehet számítani. Az alatta elhelyezkedő negyedben a Fövényi-módszerével készült prognózis látható. Ez az eljárás tapasztalati úton került kidolgozásra és a jegesedést, intenzitása alapján is osztályba sorolja (21. ábra). Ennek megfelelően a 20. ábrán a jegesedési intenzitások is megjeleníthetők.



21. ábra A Fövényi-féle és a Mireles-Pedersen-Elford jegesedési indikátorok elve(a szerző által készített ábra)

A Mireles-Pedersen-Elford eljárás a jegesedést csak, mint magát a valószínűleg előforduló légköri folyamatot jelzi, de intenzitásáról nem mond semmit. Így a 20. ábrán csak a zöld színnel jelzett potenciális jegesedési zónákat láthatjuk e módszer esetén.



22. ábra Jegesedési zónák elkülönítése a -8D módszer alkalmazásával [50] a szerző által módosítva

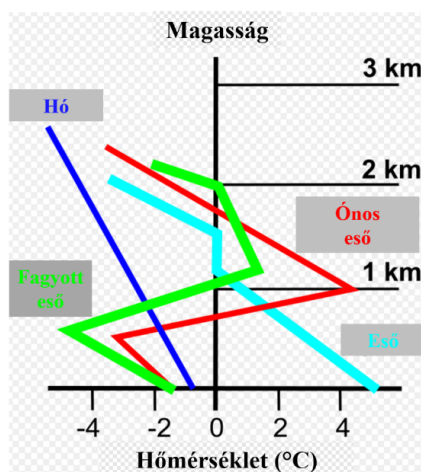
Végül a -8D módszerről annyit kell tudnunk, hogy a hőmérséklet és a harmatpontdepresszió (D) -8-szorosa (-8D) közötti viszonyból származtatható a jegesedés helye. Az előrejelzett vertikális hőmérsékleti és -8D profilok esetén (Skew-T aerológiai diagram), abban a rétegben várható jegesedés, ahol a -8D profil a diagramon a hőmérsékleti profil jobb oldalán halad (22. ábra).

Hasonlóan a turbulencia-veszély jelzésére kialakítandó rendszerhez a jegesedési potenciál előrejelzésének operatív módszeréhez is szükségesnek tartjuk az in-situ meteorológiai mérésekből származó információt, valamint a rádiószondázások eredményeinek a felhasználását is. Természetesen egy későbbi munkánkban tárgyalandó, meteorológiai UAS-flotta méréseiből származó adatok is bedolgozásra kerülhetnek a támogató rendszerbe. Itt is fontosnak tartjuk kiemelni, hogy a konkrét jegesedési szituáció észlelése azonnal be kell jusson a közfeladatot ellátó repülések meteorológiai biztosításának operatív rendszerébe.

Külön szólnunk kell még, a legerősebb felületi jegesedést okozó két csapadékfajta előrejelzéséről, nevezetesen az ónos eső és az ónos szitálás prognosztikájáról. Az ónos eső a téli félév melegfronti felhőzetéből hulló, túlhűlt makrocsapadék (a csapadékelemek átmérője 200 μm feletti), mely a ciklonális melegfronthoz kapcsolódó, alsó troposzférikus jelentős hőmérsékleti inverzió és a nedvesség vertikális eloszlásának speciális, kedvező viszonya mellett alakul ki [16]. A prognózis akkor lehet sikeres ebben az esetben, ha a termikus és nedvességi paraméterek becslése pontos és nagy felbontású. Tekintve, hogy ebben az esetben vastag felhőzettel van dolgunk (Ns) lényeges momentum, hogy a felhőfizikai parametrizáció támogassa a több-féle csapadéktípus prognózisát. Ezért a WRF modell esetén mindenképpen célszerű egy ilyen parametrizáció választása, de legalább ennyire lényeges, hogy az adott hely környezetében a hőmérsékleti profil pontos legyen (térben és időben egyaránt), hiszen ennek a 0 °C-os értékkel való metszéspontjainak pozíciója dönti el, hogy milyen csapadéktípussal számolhatunk a felszínen (23. ábra).

Alapszabályként elfogadhatjuk, hogy amennyiben a talaj szintjében a hőmérséklet 0 °C alatti, de a 850 hPa-os szinten (kb. 1500 m) pozitív a hőmérsékleti érték, akkor nagy valószínűséggel a csapadék ónos eső, esetleg ónos szitálás lesz. Még pontosabban, ha a melegebb (0 °C feletti hőmérsékletű) réteg vastagsága legalább 1200 láb és a talajhoz legközelebbi hideg réteg vastagsága kevesebb, mint 1500 láb, a csapadék ónos eső lesz [50]. Ónos szitálás alapvetően St

felhőből, szintén a téli félévben várható, amennyiben a hőmérsékleti viszonyok a fentebb leírtak alapján alakulnak. Ez a csapadékfajta jóval kisebb cseppméretű (100 µm alatti átmérő) és alapvetően *anticiklonális* időjárási helyzetben jelenik meg. Prognózisára az ónos esőre leírtak érvényesek. Az ónos csapadékok várható megjelenése esetén ebben a rétegben a legintenzívebb jegesedés várható, ezért a veszélyfigyelmeztetés során külön jelezni szükséges az előfordulását. Ebben a rétegben repülést végrehajtani teljes mértékben indokolatlan és rendkívül veszélyes.



23. ábra Melegfrontban kialakuló csapadék típusok és a hozzájuk tartozó jellegzetes hőmérsékleti profilok. A magasság és hőmérséklet adatok tájékoztató jellegűek [16]

A zivatarok prognosztikájának alapvonásai

A zivatar a légköri instabilitás extrém megnyilvánulása, mely átmenetileg rendkívül intenzív horizontális és vertikális áramlási rendszert, egy ehhez kapcsolódó függőleges, gomolyos felhőzet (Cb) kialakulását vonja maga után és emellett, intenzív elektromos hatást is kifejt. A zivatar a repülésekre veszélyes, szinte minden időjárási jelenséget egyidejűleg produkál a troposzférában, így a repülés során az elkerülése alapvető feladat. A 3/2006. (II. 2.) „*HM rendelet az állami repülések céljára kijelölt légterekben végrehajtott repülések szabályairól*” az alábbiak szerint rendelkezik:

„19. § (1) Zivatarfelhőbe berepülni, továbbá alatta átrepülni tilos.

(2) A zivatarfelhőt a következők figyelembevételével kell elkerülni:

- a két zivatarfelhő széle között csak abban az esetben lehet átrepülni, ha a köztük lévő távolság legalább 10 NM (18,6 km);
- a zivatarfelhő szélét oldalirányban legalább 5 NM (9,3 km) elkülönítés megtartásával kell elkerülni;
- a zivatarfelhő felett legalább 3250 láb (1000 m) elkülönítéssel lehet átrepülni.

(3) A zivatartevékenység során csak az állami repülések céljára szolgáló repülőtér (a továbbiakban: állami repülőtér) által nyújtott szolgáltatások korlátozhatók, a nyitva tartás nem.

(4) A meteorológiai radarral felszerelt légi járművek a repülőtér és a légi jármű személyzetének időjárási minimumáig végrehajthatnak bejövotelt leszálláshoz az állami repülőtér körzetében észlelt zivatartevékenység repülésre veszélyes zónájának elkerülésével.” [2].

Tekintve, hogy a zivatarok térben és időben pontos prognosztikája ma még nem megoldott, alapvetően a zivatarok előfordulásának becslését az adott terület felett, az őket kialakító mély

konvekciós folyamatok és légköri állapotok előrejelzésével végezzük. A légkör instabilitásának mindenkori helyzete és a levegő nedvességtartalma alapvetően meghatározza a zivatarok kialakulásának feltételét. Éppen ezért alkalmazunk számos olyan indexet, indikátort, melyek számszerűsítik a zivatarok kialakulásának esélyét, a fentiek alapján. Ezek közül a hazai prognosztikában leginkább alkalmazott indexeket és az általuk mutatott értékek alapján, az előforduló zivatarok erősségének becslését, a 2. táblázatban láthatjuk.

Index	Gyenge	Közepes	Erős
CAPE	300–1000	1000–2500	2500 felett
K-index	20–26	26–35	35 felett
LI-index	0–(–2)	(–2)–(–5)	–5 alatt
SSI-index	+3 felett	(+2)–(–2)	–2 alatt
Total Totals index	42–47	48–50	50 felett

2. táblázat A várható zivatarok erőssége a különböző instabilitási indexek értékei alapján [50]

A 2. táblázatban szereplő indexek definíciói megtalálhatók több szakirodalomban is pl. a *Mireles et. al. 2006.* munkában [50]. A fenti indexek numerikus és/vagy statisztikus prognózisa alapján megbecsülhetjük a zivartartevékenység kialakulásának idejét és térbeli elhelyezkedését is és az adott 4D-ös tartományra kiadható a zivatar-veszélyre figyelmeztető információ szöveges vagy térképes formában, egyaránt.

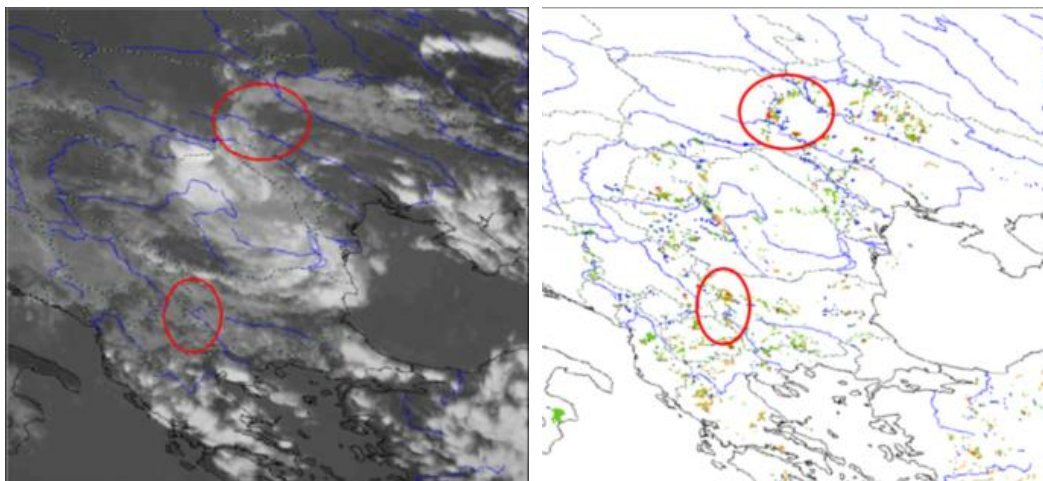
Természetesen a zivatarok tényleges elhelyezkedése, fejlődése a közelben alapvetően vizuálisan, míg távolabb már csak távérzékelési eszközökkel (időjárás radar, meteorológiai kompozit műholdképek stb.) oldható meg. Éppen ezért, a közfeladatot ellátó repülések meteorológiai biztosítása nem nélkülözheti ezeket a produktumokat sem. Alapvetően, korszerű meteorológiai Doppler-radarok alkalmazása lenne a legfontosabb azokon a repülőtereken, ahonnan az adott repülési feladatok végrehajtása történik. Ezek ma már kisebb méretben és teljesítménnyel (így olcsóbban) is beszerezhetők, időben akár 1–2 perces felbontással is képesek dolgozni és a 60–80 km-es hatósugaruk elegendő is a repülőtér körzetének megfigyelésére. Nyilvánvaló, hogy útvonalrepüléshez ennél nagyobb távolságra is szükséges ilyen jellegű produktummal rendelkezünk, de az Országos Meteorológiai Szolgálat biztosít hazánk területére való teljes radarfedettséggel, 10–12 perces időbeli felbontás mellett (ezek az OMSZ produktumok jelenleg is elérhetőek a meteorológiai támogatásban, ahogyan már korábban jeleztük).

A zivatarok kialakulását lehetővé tevő mély konvekció kialakulásának előrejelzése kulcsfontosságú momentum az adott hely körzetében. Ugyanakkor ezeknek a konvektív folyamatoknak a kialakulása és fejlődése rendkívül érzékeny a felszín mindenkori fizikai állapotára, a talaj típusára, a növényzetre valamint a légköri és talajnedvesség aktuális értékeire, egyaránt. Ezek az adatok pontosan nem ismertek a modellek futtatásakor, ráadásul helyről-helyre igen gyorsan változnak, ezért csak becsült vagy valamilyen átlagos értékekkel dolgozhatunk a modell számítások alatt. Így a konvekció prognózisa gyakran nem elég pontos (és az előbbiek miatt nem is lehet az).

E nehéz dilemma megoldásához járulhatnak hozzá az időjárás-felderítő pilóta nélküli repülőgépek, melyek alapvetően a planetáris határrétegben történő repülésük során mérhetik és érzékelhetik a kialakuló konvektív áramlásokat, a felszín aktuális nedvességtartalmát (pl. GNSS technológia alkalmazásával), meghatározhatják a potenciálisan kialakuló feláramlások helyét, az ott kialakult vertikális sebességeket stb. Egy speciálisan felszerelt UAS-flotta, valós időben szolgáltatott adatainak alapján, képet kaphatnánk az intenzív feláramlások várható területeiről

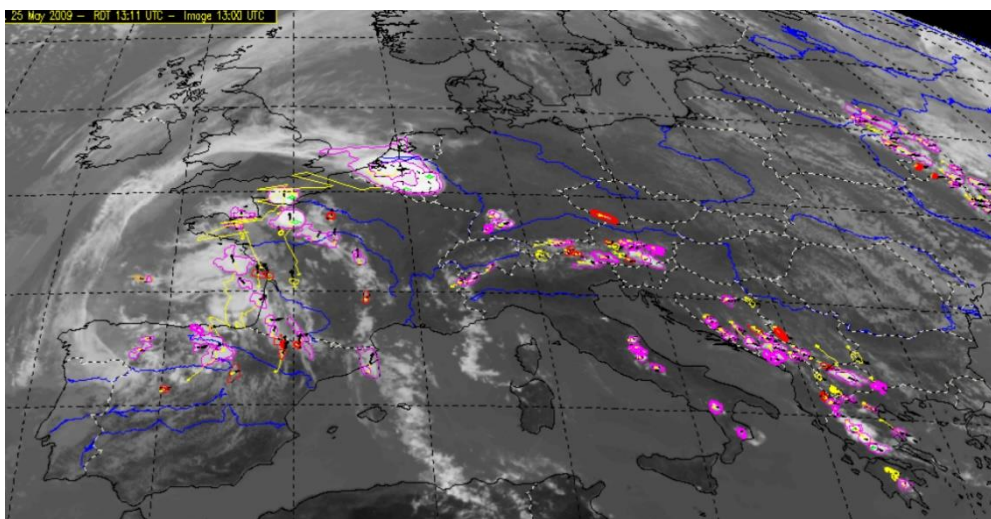
és intenzitásukról, valamint a kapott meteorológiai információ, a numerikus előrejelzések pontosításában is fontos szerepet játszhatnak, az adatasszimilációs technikák alkalmazása során [20].

Különösen érdekes és izgalmas kutatási terület lehet, ha a legújabb EUMETSAT SAF produktumokat is bevonjuk a zivatar-tevékenység prognózisába. Pl. a gyors fejlődésű zivatarok nyomon követésére (Rapidly Developing Thunderstorm, RDT) és a konvektív folyamatok kiindulási feltételeit jelző (Convection Initiation, CI) műholdas információk, nagyban segíthetik a zivatarokkal kapcsolatos előrejelzői és monitoring jellegű munkát [50][52][53]. A két említett műholdas produktum a 24. illetve a 25. ábrán látható.



24. ábra A EUMETSAT Convectiv Initialization produktuma (alsó kép) és egy ugyanabban az időpontban készült infravörös tartományban készült műholdkép (felső kép). A pirossal jelölt területen intenzív konvektív fejlődés várható, amelyet a CI produktumon piros pixelek tesznek láthatóvá [53]

A korszerű zivatar-veszélyt előrejelző rendszer tehát a hagyományos, alapvetően az instabilitási indexek numerikus és/vagy statikus prognózisán nyugvó módszert, a valós idejű radar és műholdas távérzékelési adatokat, valamint az ezekből további feldolgozással előállított produktumokat, illetve, a légi időjárás-felderítésből származó méréseket, észleléseket használhatja fel. A zivatar előrejelző rendszer pontos struktúrájára és működésére, egy további kutatás-fejlesztési munka adhatja meg a kielégítő választ.



25. ábra AZ RDT SAF produktum által mutatott gyorsan fejlődő zivatarcellák 2009. május 25-én, Európa felett [51]

ÖSSZEFOGLALÁS

A közfeladatot ellátó repülések időjárás oldalról történő meteorológiai támogatása számos szakmai kihívást jelentő munka. A meteorológiai támogatás fontossága mellett azonban – éppen az említett repülések kiemelt szerepe, gyakran előre nem tervezhető végrehajtása miatt – ennek nehézségét és komoly felelősségét is ki kell emelnünk. Éppen ezért, ezeknek a repüléseknek a meteorológiai támogatásának minden korszerű eszközt, eljárást és módszert alkalmaznia kell.

Munkánkban meghatároztuk azokat a fizikai dimenziókat, melyeken belül a fent említett repüléseket várhatóan végre kell hajtani valamint azon repülőeszközök körét, melyek részt vesznek ezekben a repülésekben. Tettük ezt azért, hogy meg tudjuk határozni a meteorológiai támogatás során leginkább kihívást jelentő légköri szituációk, jelenségek és folyamatok körét, amikre leginkább fókuszálni kell az említett támogatás végrehajtásakor. Világossá vált számunkra, hogy elsősorban a mezo- és mikro-skálán előforduló jelenségek prognózisával kell foglalkoznunk, mely feladat – a korábban alkalmazott előrejelzési módszerek mellett – új, más megközelítésmódok adaptálását is megköveteli.

Bemutattuk, hogy a repülés szempontjából kiemelten fontos látástávolság becslését, hogyan lehet megoldani analóg meteorológiai helyzetek keresésével és ezeknek a múltban történő fejlődéséből elkészített prognózissal megvalósítani. Azt is láttuk, hogy a numerikus és statisztikus előrejelzések ötvözésével kapott hibrid prognosztikai módszer jól alkalmazható ezen a területen is, hiszen a hazai repülőterek éghajlati adatain történt verifikáció ezt mutatta számunkra.

A közfeladatot ellátó repülések meteorológiai támogatásának központi elemét jelentik a repülésre veszélyes időjárási jelenségek, folyamatok előrejelzése. Jelen tanulmányban részletesen kitértünk a turbulencia, a szélnyírás, a felületi jegesedés valamint a zivatarok kialakulásához kedvező időjárási helyzet prognosztikai lehetőségeire, melynek során mind a mért, észlelt és az általunk javasolt modellek (adott parametrizációs és statikus adatbázis felhasználása mellett) becsült adatait javasoltuk, adott rendszerben történő felhasználásra a meteorológiai támogatás során. Tettük ezt úgy, hogy hangsúlyoztuk a valós idejű mérések azonnali felhasználását a veszélyes időjárási helyzetek mielőbbi felismerésében és az ehhez kapcsolódó riasztási feladat végrehajtásában. Ezeknek az adatoknak a rendelkezésre állása jelenleg nem teljes mértékben adott, így javasoltuk korszerű meteorológiai eszközök telepítését és bizonyos időjárási produktumokhoz való hozzáférés biztosítását.

Külön említést tettünk arra vonatkozóan, hogy célszerű lenne egy meteorológiai UAS-flotta kialakítására, illetve ennek tervszerű, adott módszertan alapján történő alkalmazására. Egy ilyen flotta beillesztése a közfeladatot ellátó repülések meteorológiai biztosításába – véleményünk és az eddigi kutatási eredményeink alapján – jelentősen megnövelné az ilyen típusú repülések biztonságát, hiszen nem csak a célzott időjárás-felderítési feladatokat látná el, hanem a numerikus modellek adatasszimilációs rendszerén keresztül azok pontosságának növelésében is nagy szerepet játszanának. Mindemellett, még – pl. GNSS speciális érzékelőkkel ellátva – a felszín nedvességi viszonyait térképezve, a numerikus modell statikus adatbázisának naprakészen tartásában is hasznos lenne az alkalmazásuk. A meteorológiai támogatás UAS szegmensének részletesebb kidolgozása tehát egy fontos kihívás, ami az elkövetkezendő évek alapvető feladata.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Bottyán Zs.: A közszolgálati célú repülések meteorológiai támogatásáról I. Légkörünk struktúrája, alapfolyamatai repülésmeteorológiai megközelítésben. Repüléstudományi Szemelvények. No. 2, 2017, pp 7-26. ISBN 978-615-5845-26-0.
- [2] 3/2006. (II. 2.) HM rendelet az állami repülések céljára kijelölt légterekben végrehajtott repülések szabályairól. https://net.jogtar.hu/jr/gen/hjegy_doc.cgi?docid=a0600003.hm
- [3] Bottyán Zs.: On the Theoretical Questions of the UAS-based Airborne Weather Reconnaissance. Repüléstudományi Szemelvények. No. 2, 2017, pp. 97-119. ISBN 978-615-5845-26-0
- [4] Vágföldi Z.: A vörösiszap katasztrófa környezeti hatásai, kárelhárítási folyamata, alkalmazott módszerei. Hadmérnök. Vol. 6, No. 1, 261-275.
- [5] Restás Á.: Az UAV közszolgálati alkalmazásai. Pilóta nélküli repülés profiknak és amatőröknek. Szerk. Palik Mátyás. Nemzeti Közszolgálati Egyetem, 2013. 241-280. ISBN 978-615-5057-64-9.
- [6] Rátonyi K. F.: Pilótánélküli felderítő repülők a magyar honvédségben. Repüléstudományi Közlemények. 2013. Vol. 25, No. 2, 675-683.
- [7] http://elbitsystems.com/media/Skylark_I_LE_2016.pdf
- [8] <http://old.biztonsagpolitika.hu/userfiles/image/robotok%20a%20harcteren/Syklard.jpg>
- [9] Nagy János és Orosz Zoltán: MI-8/MI-17 szállítóhelikopterek alkalmazása a magyar légierőben. Repüléstudományi Közlemények. Vol. 17, No. 2. 1-15. http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2005_cikkek/nagy_janos_orsz_zoltan.pdf
- [10] <https://www.globalsecurity.org/military/world/russia/mi-8-specs.htm>
- [11] Eurocopter AS350 B3 Technical Data. http://airbushelicoptersinc.com/images/products/AS350/AS350B3-tech_data_2009.pdf
- [12] <https://htka.hu/wp-content/uploads/2010/08/Mi-17N.jpg>
- [13] <http://m.blog.hu/ai/airbase/image/016/as350-2-08.jpg>
- [14] Orlanski I.: A rational subdivision of scales for atmospheric processes. Bull Am Meteorol Soc. 1975. Vol. 56. pp. 527-530.
- [15] Bottyán Zs.: In-flight Icing Characteristics of Unmanned Aerial Vehicles During Special Atmospheric Condition over the Carpathian-basin. ACTA GEOGRAPHICA DEBRECINA LANDSCAPE AND ENVIRONMENT 7:(2) pp. 74-80. (2014)
- [16] Bottyán Zs.: A közszolgálati célú repülések meteorológiai támogatásáról II. - Légkörünk jelenségei repülésmeteorológiai megközelítésben. Repüléstudományi Szemelvények. No. 2, 2017, pp 27-50. ISBN 978-615-5845-26-0
- [17] Bottyán Z., Wantuch F., Gyöngyösi, A, Z.: Forecasting of Hazardous Weather Phenomena in a Complex Meteorological Support System for UAVs. JOURNAL OF UNMANNED SYSTEM TECHNOLOGY 2:(2) pp. 18-25. (2014)
- [18] Tuba Z. és Bottyán Zs.: Fuzzy logic-based analogue forecasting and hybrid modelling of horizontal visibility. METEOROLOGY AND ATMOSPHERIC PHYSICS 2017: pp. 1-13. (2017)
- [19] Tuba Z. és Bottyán Zs.: Analóg és hibrid módszerek alkalmazása a horizontális látástávolság előrejelzésében. Repüléstudományi Közlemények (1997-TŐL) 29:(2) pp. 211-224. (2017)
- [20] Bottyán Zs.: Az UAS eszközök időjárás megfigyelésre történő alkalmazásának fontossága és hazai lehetőségei. Repüléstudományi Szemelvények. No. 2, 2017, pp 75-96. ISBN 978-615-5845-26-0
- [21] Randriamampianina Roger: Távérzékelés és repülőgépes megfigyelések alkalmazása a korlátos tartományú ALADIN/HU numerikus időjárás előrejelző modellben. OTKA ZÁRÓJELENTÉS. Országos Meteorológiai Szolgálat. Budapest, 2010.
- [22] KÉZIKÖNYV A METEOROLÓGIAI TÁMOGATÁS VÉGREHAJTÁSÁRÓL. A Magyar Honvédség Geoinformációs Szolgálatának kiadványa., Budapest, 2014.
- [23] HAWK-3 meteorológiai munkaállomás. <http://www.met.hu/omsz/tevekenysegek/hawk/>
- [24] Bottyán Zs.: Az EUMETSAT EUMETCast meteorológiai műholdas berendezések felhasználási lehetősége az operatív előrejelzésben, a katonai repülőtereken. Repüléstudományi Közlemények 22:(2) pp. 1-15. (2010).
- [25] Az Országos Meteorológiai Szolgálat villámlokalizációs rendszere. https://www.met.hu/ismeretok/OMSZ_villamlokazacios_rendszere.pdf
- [26] Bottyán Zs.: A repülésre veszélyes mezo-skálájú meteorológiai jelenségek modellezésének aspektusai: Numerikus prognosztikai megközelítés. Repüléstudományi Közlemények 21:(2) p. online. 11 p. (2009)
- [27] Bottyán Zs.: A pilóta nélküli repülőeszközök meteorológiai alkalmazásának lehetőségeiről I. Az időjárás-felderítés. Repüléstudományi Közlemények, 28:(2) pp. 57-70. (2016)

- [28] Hadobács K. és Bottyán Zs.: Pilóta nélküli repülőeszközökkel végrehajtott műveletek alatt előforduló veszélyes meteorológiai tényezők és előrejelzésük módszerei. Honvédségi Szemle: A Magyar Honvédség központi folyóirata 144:(1) pp. 83-101. (2016)
- [29] Wantuch F, Bottyan Z, Tuba Z, Hadobacs K.: Statistical methods and weather based decision making in meteorological support for unmanned aerial vehicles (UAVs). In: Kimon P Valavanis, Pascual Campoy (szerk.) 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS): Conference Proceedings. 1172 p. Konferencia helye, ideje: Atlanta, Amerikai Egyesült Államok, 2013.05.28-2013.05.31. Atlanta: IEEE, 2013. pp. 203-207. (ISBN:978-1-4799-0815-8)
- [30] Hansen, B.: A Fuzzy Logic-Based Analog Forecasting System for Ceiling and Visibility. Weather and Forecasting, Vol. 22, 1319-1330. 2007.
- [31] Bottyán Z, Wantuch F, Tuba Z, Hadobács K, Jámbor K.: Repülésmeteorológiai klíma adatbázis kialakítása az UAV-k komplex meteorológiai támogató rendszeréhez. Repüléstudományi Közlemények 24:(3) pp. 11-18. (2012)
- [32] Tuba Z., Vidnyánszky Z., Bottyán Z., Wantuch F., Hadobács K.: Application of Analytic Hierarchy Process in fuzzy logic-based meteorological support system of unmanned aerial vehicles. ACADEMIC AND APPLIED RESEARCH IN MILITARY SCIENCE 12:(2) pp. 221-228. (2013)
- [33] Hadobács K, Tuba Z, Wantuch F, Bottyán Z, Vidnyánszky Z.: A pilóta nélküli légijárművek meteorológiai támogató rendszerének kialakítása és alkalmazhatóságának bemutatása esettanulmányokon keresztül. Repüléstudományi Közlemények 25:(2) pp. 405-421. (2013)
- [34] Skamarock, W.C., Klemp, J.B., Dudhia, J., Gill, D.O., Barker, D.M., Duda, M.G., Huang, X-Y., Wang, W. and Powers, J.G.: A description of the Advanced Research WRF Version 3. NCAR/TN-475 + STR NCAR Technical Note. 2008.
- [35] Bottyán Zs. et al.: Measuring and Modeling of Hazardous Weather Phenomena to Aviation Using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS). Időjárás / Quarterly Journal of the Hungarian Meteorological Service 119:(3) pp. 307-335. 2015.
- [36] Bottyán Z., Tuba Z., Gyöngyösi A., Z.: Weather Forecasting System for the Unmanned Aircraft Systems (UAS) Missions with the Special Regard to Visibility Prediction, in Hungary. In: László Náda, József Padányi (szerk.) Critical Infrastructure Protection Research: Results of the First Critical Infrastructure Protection Research Project in Hungary. 184 p. Zürich: Springer International Publishing, 2016. pp. 23-34. (Topics in Intelligent Engineering and Informatics; 12.) (ISBN:978-3-319-28090-5).
- [37] Tuba Z.: Pilóta nélküli repülőeszközök (UAV-k) és a látástávolság egyes kérdései. Repüléstudományi Közlemények. Vol 26, No. 2, pp. 94 – 105. 2014. http://www.repulestudomany.hu/kulonszamok/2014_cikkek/2014-2-09-0158_Tuba_Zoltan.pdf
- [38] Lester P.: Turbulence – A new perspective for pilots, Jeppesen Sanderton, 1993. ISBN-13: 978-0884871415
- [39] Sharman, m R., Tebaldi, C., Wiener, G. and Wolff, J.: An Integrated Approach to Mid- and Upper-Level Turbulence Forecasting. Weather and Forecasting, Vol. 21, pp. 268-287. 2006.
- [40] Sándor, V. és Wantuch F.: Repülésmeteorológia. OMSZ Kiadvány. Budapest, 2005.
- [41] Sharman, B.: Turbulence Diagnoses and Forecasts. NCAR/RAL Weather in the Cockpit Workshop. 8 August 2006. <http://www.rap.ucar.edu/projects/wic/references/wic1workshop/sharman.ppt>
- [42] NOAA NEXRAD website. <https://www.ncdc.noaa.gov/data-access/radar-data/nexrad>
- [43] EUMETSAT NWP SAF Website. <http://www.nwcsaf.org/web/guest/home>
- [44] Pilar Rípodas, Xavier Calbet, Javier García-Pereda, Jean Marc Moisselin, M.A. Martínez: Nowcasting SAF products and applications. Workshop: Satellite – based storm monitoring and observational input to NWP. 12-16 June 2017, ECMWF, Reading, UK http://www.nwcsaf.org/AemetWebContents/WorkshopsSurveysTraining/Conferences/SAF_products_applications.pdf
- [45] Donald W. McCann, John A. Knox and Paul D. Williams: An improvement in clear-air turbulence forecasting based on spontaneous imbalance theory: the ULTURB algorithm. Meteorological Applications Vol. 19, pp. 71–78. 2012.
- [46] Jeffrey E. Passner and David I. Knapp: Using WRF-ARW Data to Forecast Turbulence at Small Scales. American Meteorological Society Annual Meeting <https://ams.confex.com/ams/pdfpapers/128617.pdf>
- [47] Shin, H., H., Hong, S-Y. and Dudhia, J.: Impacts of the Lowest Model Level Height on the Performance of Planetary Boundary Layer Parameterizations. Monthly Weather Review. Vol. 140, pp. 664-682. 2012.
- [48] KÖHLER, Martin et al. Comprehensive weather situation map based on XML-format as decision support for UAVs. Journal of Unmanned System Technology. Vol. 5, No 1, pp. 13-23. <http://ojs.unsysdigital.com/index.php/just/article/view/950>. doi:10.21535/just.v5i1.950.
- [49] Bottyán Z.: Estimation of structural icing intensity and geometry of aircrafts during different conditions: A fixed-wing approach. IDŐJÁRÁS / QUARTERLY JOURNAL OF THE HUNGARIAN METEOROLOGICAL SERVICE Vol. 115, No.4, pp. 275-289. 2011.

- [50] Mireles, M., Kirth, R., Pederson, L. and Elford, C. H., 2003: Meteorological Techniques (Revision 26 April 2006). No. AFWA/TN-98/002-REV. Air Force Weather Agency Offutt AFB NE. <https://www.google.hu/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&cad=rja&uact=8&ved=0ahUKEwjowrSnt-PLWAhUMbVAKHSJeDVAQFggmMAA&url=http%3A%2F%2Fwww.dtic.mil%2Fcgi-bin%2FGetTRDoc%3FAD%3DADA466107&usg=AOvVaw37IhmcBvrwGGO3hBkdQAtp>
- [51] RAPIDLY DEVELOPING THUNDERSTORM - Convection Warning website. http://www.nwcsaf.org/rdt_description
- [52] Convection Initiation website. http://www.nwcsaf.org/ci_description
- [53] User Manual for the Convection Product Processors of the NWC/GEO. http://www.nwcsaf.org/Aemet-WebContents/ScientificDocumentation/Documentation/GEO/v2016/NWC-CDOP2-GEO-MFT-SCI-UM-Convection_v1.0.pdf

A mű a KÖFOP-2.1.2-VEKOP-15-2016-00001 azonosítószámú, „A jó kormányzást megalapozó közszolgálat-fejlesztés” elnevezésű kiemelt projekt keretében működtetett Zrínyi Miklós Habilitációs Program keretében, a Nemzeti Közszolgálati Egyetem felkérésére készült.

**RECOMMENDATIONS FOR METEOROLOGICAL SUPPORT
OF HUNGARIAN PUBLIC SERVICE FLIGHTS**

The meteorological support for the missions of public service flights is hard and challenging procedure. In our work, we have identified the physical dimensions within which the mentioned flights are expected to be carried out and the range of aircraft involved in these flights, too. We have demonstrated how to estimate the visibility which is an important factor of aviation as an analogue, numerical and hybrid prognosis. In our study, we have detailed the prognostic potential of turbulence, windshear, airframe icing and thunderstorms. We have specifically mentioned that it would be expedient to develop a meteorological UAS fleet and apply it on plans are based on a given methodology within the system of meteorological support system of public service missions.

Keywords: meteorological support, hybrid model, visibility, turbulence, icing, thunderstorm prediction, UAS

Bottyán Zsolt (PhD)
tanszékvezető, egyetemi docens
Nemzeti Közszolgálati Egyetem
Hadtudományi és Honvédtisztképző Kar
Katonai Repülő Intézet
Repülésirányító és Repülő-hajózó Tanszék
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774

Bottyán Zsolt (PhD)
Head of Department, associate professor
National University of Public Service
Faculty of Military Science and Officer Training
Institute of Military Aviation
Department of Aerospace Controller and Pilot Training
bottyán.zsolt@uni-nke.hu
orcid.org/0000-0003-0729-2774



http://www.repulestudomany.hu/kiadvanyok/RepSzem_Bottyán_Zs.pdf