

Gyöngyösi András Zénó¹ – Kardos Péter² – Kurunczi Rita³ –
Balczó Márton⁴ – Bottyán Zsolt⁵

IDŐJÁRÁS KUTATÓ- ÉS ELŐREJELZŐ MODELL ALKALMAZÁSA PILÓTA NÉLKÜLI REPÜLÉSEK KOMPLEX METEOROLÓGIAI TÁMOGATÁSÁRA MAGYARORSZÁGON⁶

Megbízható, megfelelően részletes és repülés-specifikus időjárás információ elengedhetetlenül szükséges a pilóta nélküli repülések meteorológiai biztosításához. Egy amerikai fejlesztésű, nyílt forráskódú korlátos tartományú, meteorológiai modell teljes körű implementálását követően került alkalmazásra a fenti célra. A modellrendszer finom hangolása magában foglalta 30 különböző modell beállítással végrehajtott futtatásból származó együttes előrejelzés verifikációját. A verifikáció során legjobbnak bizonyuló séma kombináció további alkalmazásával a modellfejlesztés használhatóságát konkrét UAV repülések végrehajtásával teszteljük. A repülésmeteorológiai kockázatot jelentő időjárás elemek UAV specifikus számbavételét követően a modellrendszer fejlesztésének fontosabb lépéseit ismertetjük. A meteorológiai szenzorrendszer fejlesztésének, valamint az első tesztrepülések, mérések tapasztalatainak leírása zárja jelen írás sorait.

APPLICATION OF A WEATHER RESEARCH AND FORECASTING MODEL FOR COMPLEX METEOROLOGICAL SUPPORT OF UNMANNED AERIAL OPERATIONS IN HUNGARY

Proper, detailed and specific meteorological information is essential for unmanned aerial operations. Following an extensive technical implementation the Weather Research and Forecasting limited area model has been applied for this purpose. The fine tuning of the model setup included parallel run of 30 different ensemble members, each of them having different combination of parameterization. The aim of this paper is the introduction of the applicability of this numerical weather prediction system for aviation meteorology forecasting. The most important aviation weather issues focusing on the special needs of unmanned systems are summarized. Following the short introduction of the weather prediction system that was applied, results of the case study test runs are compared to observation. The experiences of the first UAV flights are also presented. Results are introduced and the directions towards further development are described.

I. BEVEZETÉS, TÖRTÉNETI KITEKINTÉS

A meteorológia egyik legnagyobb kihívása a légi járművek biztonságos közlekedéséhez elengedhetetlenül szükséges időjárás információk előállítása. Ez a feladat olyan kihívások elé állítja a szakmát, amelynek teljesítéséhez a meteorológiai eszköztár szinte teljes állományát szükséges felvonultatni: (i) a lehető legpontosabb megfigyelések és mérések szükségesek az időjárás helyzet pillanatnyi állásáról; (ii) a repülések által érintett területek (indulási- és célrepülőtér, vagy a

¹ ELTE, Meteorológiai Tanszék, zeno@nimbus.elte.hu

² Hungarocontrol Magyar Légiforgalmi Zrt, Peter.Kardos@hungarocontrol.hu

³ Időkép Kft. meteorita@idokep.hu

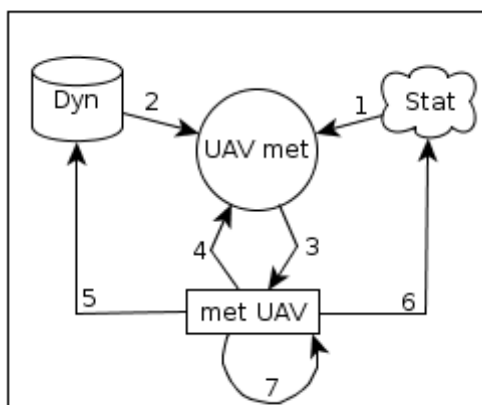
⁴ BMGE Áramlástan Tanszék Kármán Tódor Szélesatorna Laboratórium, balczo@ara.bme.hu

⁵ NKE Katonai Repülő Tanszék, bottyan.zsolt@uni-nke.hu

⁶ Lektorálta: Biróné Dr. Kircsi Andrea, egyetemi adjunktus, Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszék, kircsi.andrea@science.unideb.hu

küldetés célterülete, valamint a repülési útvonal által érintett területek) repülés-klimatológiai tapasztalatainak átfogó és részletes ismerete szükséges, valamint (iii) a lehető legpontosabb prognózis kell, hogy rendelkezésre álljon a közeljövő időjárásának alakulására vonatkozóan, melyet szuperszámítógépeken integrált komplex időjárás modellek képesek csupán szolgáltatni. A meteorológia és a repüléstudomány fejlődése párhuzamosan zajlik egymással folyamatos pozitív kölcsönhatásban. A repülések a légkör magasabb tartományából szolgáltatnak közvetlen tapasztalatot a meteorológusok számára, mely korábban nem volt elérhető. A pilóták pedig olyan mértékben és minőségben igénylik a meteorológiai információkat, mely korábban nem volt tapasztalható. Számos légköri folyamat felfedezése kapcsolódik a repülések végrehajtásához (pl. a felső troposzférikus futóáramlások vagy a hegyek lee-oldalán keletkező légköri hullám-mozgások), a korszerű meteorológia vívmányai pedig eliminálják a repülések meteorológiai kockázatát.

Ahogy a világon mindenütt, hazánkban is egyre meghatározóbb szerephez jutnak a pilóta nélküli légi járművek [1] (továbbiakban: UAV-k). Az UAV-k meteorológiai biztosítása még nagyobb kihívás elé állítja a meteorológiát, hiszen szemben a hagyományos repülésekkel, esetükben egy előre nem látható időjárás helyzetben a repülőgép személyzete nem képes közbeavatkozni. A Kritikus Infrastruktúra Védelmi Kutatások TÁMOP pályázat keretében olyan komplex meteorológiai rendszer kidolgozását tűztük ki célul, mely képes figyelembe venni a hazai repülőterek már meglévő, több évtizedes repülésmeteorológiai tapasztalatait, emellett a lehető legpontosabb dinamikus modell előrejelzéseket is figyelembe véve célprognózis előállítására alkalmas a pilóta nélküli küldetések biztosítására. A rendszer tapasztalati oldalát a klimatológiai adatok statisztikus modellekkel történő feldolgozása és előrejelzésekbe történő integrálása adja, míg a konkrét rövid távú időjárás előrejelzéseket dinamikai alapú modell rendszer szolgáltatja. Az előrejelző rendszer használhatóságát UAV repülésekkel vizsgáljuk, elsősorban azért, hogy a fejlesztők már a korai fázisban konkrét visszajelzéseket kapjanak arra vonatkozóan, miként szolgálhatja leginkább a gyakorlatban egy ilyen rendszer a kívánt célt. Az UAV repüléseink célja meteorológiai felderítés, ily módon áttételesen is kap visszajelzést a rendszer a tesz repülések során gyűjtött meteorológiai információkból (1. ábra).



1. ábra Az UAV meteorológia struktúrája. Az ábra részletes magyarázatát lásd a szövegben

Az integrált előrejelzési rendszer (UAV met) statisztikai módszerekkel (Stat) készült származtatott (repülésmeteorológiai)ű adatokból (1) és dinamikai modell kimenet alpmennyiségekből (2) állítja elő az előrejelzéseket (3) az UAV mérőrepülések számára (met UAV). A repülések

végrehajtásában résztvevők (operátorok, műszaki és repülési szakemberek, döntéshozók) vizs-
szacsatolást adnak a rendszer fejlesztőinek (4), a mért adatokkal verifikálható a modellrendszer
(5), gazdagítható a statisztikai adatbázis, fejleszhető a módszertan (6). Mivel magában az UAV
meteorológiai mérések végrehajtásában is kevés a tapasztalat, magának a mérési módszernek a
fejlesztéséhez is adatokat szolgáltatnak a repülések (7).

Jelen dolgozatban, rövid történeti kitekintést követően, áttekintjük azon meteorológiai ténye-
zőket, melyek különösen fontosak a pilóta nélküli műveletek során, majd a dinamikai modell
fejlesztésének, adaptálásának részleteit ismertetjük. Ezt követően a rendszer használhatóságát
– írásunk végén – egy rövid esettanulmányon keresztül mutatjuk be.

A pilóta nélküli repülő rendszerek (UAS) általában egy földi, valamint egy légi alrendszerből
tevédenek össze. Irányításukat alapvetően szoftver által vezérelt robot végzi (ebben különböznek
a távirányítású repülő (RPA) rendszerektől), de távvezérléssel legtöbbjük kézi irányítással is
vezethető. Céljuk olyan repülési feladatok ellátása, mely pilótás repülőgépekkel nem, vagy csak
kevésbé hatékonyan végezhető el. A repülési útvonal és annak célja, feladata előre megtervez-
hető, a légi alrendszerhez tartozó hasznos terhek által rögzített információk – akár valós időben
történő továbbítással – a földi alrendszerek segítségével könnyen elérhető és gyorsan feldol-
gozható. Hasznos teherként webkamera és egyéb távérzékelési eszközök mellett (melyek rend-
kívül széleskörű információgyűjtésre alkalmasak, így katasztrófavédelmi, katonai, polgári, tér-
képészeti és egyéb területeken egyaránt fontos szerepet töltenek be), akár meteorológiai para-
métereket mérő szenzorrendszer is rögzíthető a szerkezetekhez.

Az UAV-k története egészen a 19. század közepéig nyúlik vissza: 1849. augusztus 12-én szü-
letett az első írásos feljegyzés ezen eszközök katonai felhasználásáról. A Scientific American
1849. márciusi számában számol be az első pilóta nélküli katonai légi alkalmazásról, amikor az
osztrákok pilóta nélküli ballonokkal légi támadást intéztek Velence ellen. Ezt követően, az első
világháborúban jelentek meg az első távirányítással rendelkező, Elmer Sperry által kifejlesztett,
ún. légi torpedók [2]. Az első magyar vonatkozás Kármán Tódor nevéhez kapcsolódik, aki
1915-től tevékenykedett a témában: a szélcsatorna mellett megépítette a világ első, katonai célú
forgószárnyas repülőeszközét [3]. A II. világháború végéig az UAV-k kimondottan az ellenség
megsemmisítésére szolgáltak. A vietnami-háború volt az első alkalom, ahol felderítési céllal
alkalmazták ezeket az eszközöket. Az elmúlt évtizedekben jelentősen bővült az UAV-k felhasz-
nálási köre, kiemeltebb szerepet kapott a légkör alsó rétegeinek pontosabb megismerése, vizs-
gálata is. Vertikális profilokat korábban az akár 40-50 km-es magasságig felszálló meteoroló-
giai léggömbök szolgáltattak, míg az UAV-k segítségével a planetáris határregről (tehát az
alsó mintegy 3 km-ből) kaphatunk bővebb információkat [4][5][6].

Számszerű időjárás előrejelző modellek manapság már megbízható adatokat szolgáltatnak akár
5 napra előre. A modellek azonban nem képesek közvetlenül meghatározni olyan paramétere-
ket, melyek a repülés szempontjából igazán lényegesek (mint például a ferde irányú látótávolság,
felhőalap, szélnyírás, stb.), ezeket az úgynevezett alaplémennyiségi modellváltozókból (hő-
mérséklet, légnedvesség, átlagos szélesség, légnyomás) szükséges származtatni. A modell-
adatok további sajátossága, hogy véges térbeli felbontású rácshálózaton vannak értelmezve az
időjárás paraméterek, mely nem teszi lehetővé a kis léptékű folyamatok (pl.: turbulencia) meg-

felelő figyelembevételét. További kihívás még, hogy a származtatott paraméterek rendkívül érzékenyek a modellváltozók bizonytalanságára: néhány tized fok hőmérséklet-különbség meghatározhatja a látótávolság romlását, jegesedési viszonyok, vagy akár zivatar kialakulásának valószínűségét, akár a repülésbiztonság szempontjából drámai mértékben is. Ezek miatt olyan utó-feldolgozási eljárások kidolgozására van szükség a modell kimenőadatok tekintetében, amelyek kimondottan a repülésmeteorológia céljainak megfelelő módon képesek a származtatott paraméterek előállítására. A következőkben sorra vesszük a repülésmeteorológiai szempontból legfontosabb időjárési elemeket.

II. UAV REPÜLÉSEK SZEMPONTJÁBÓL KOCKÁZATOT JELENTŐ METEOROLÓGIAI JELENSÉGEK

A hagyományos légi közlekedési eszközök számára a meteorológiai körülmények okozta kockázatok két fő csoportra oszthatók: (i) légi navigációt nehezítő időjárési körülmények (a személyzetet korlátozó körülmények [7], úgy mint alacsony látástávolság, és/vagy felhőalap vagy kedvezőtlen felhőzet), valamint (ii) a légi jármű üzemeltetési körülményeit befolyásoló körülmények (a légi járműre ható körülmények [8][9][10][11], úgy mint jegesedés, felületi lerakódások, turbulencia, kedvezőtlen szélviszonyok és kedvezőtlen futópálya állapot stb.).

Navigáció lehetőségeit befolyásoló időjárési körülmények

Az UAV-k esetében az légi jármű üzemeltetését, az időjárési eredetű navigációs problémák nem nehezítik ha pusztán a repülési feladatra fókuszálunk, hiszen az előre programozott pálya megrepülését, vagy a repülés közbeni programmódosítást nem befolyásolják a látási viszonyok. Másfelől azonban az UAV-k küldetési oldalától nem mellékes szempont, hogy a cél látható tartományban történő felderítését akadályozza-e a levegőkörnyezet kedvezőtlen állapota, így – még ha más szempontok alapján is – de a repülési feladat felkészülési fázisában szükséges a látástávolság és felhőzet-viszonyok előrejelzése. Ez ugyanakkor a repülési feladat függvényében korlátozódhat a célkörzetre. Megjegyzendő azonban, hogy az UAV-k közös légtérben való alkalmazásának szabályozása előírhatja a látás szerinti navigációs körülmények (VMC) szükségességét, amely további korlátozásokat jelent meteorológiai szempontból.

Üzemeltetésre ható időjárési elemek

Az UAV-k üzemeltetésével kapcsolatban az időjárési hatások csoportja megegyezik a pilótás repülések esetében felmerülő időjárési elemekkel. Azonban fontos kiemelni, hogy az UAV-k kiterjedésének karakterisztikus mérete akár 1–2 nagyságrenddel is kisebb lehet, mint a nem UAV repülőké. A felszálló súly tekintetében a különbség elérheti akár a 3 nagyságrendet is.

Ez a méret és súlybeli eltérés különbséget okoz az üzemeltetésre ható időjárési elemek hatásmechanizmusában is, amely az UAV-k esetében külön figyelmet érdemel.

Jegesedés

Jegesedés alatt olyan jéglerakódást értünk a légi jármű külső felületén, amely annak túlhűlt vizet tartalmazó környezetben (felhőben) való mozgás közben keletkezik. A jegesedés repülésre gyakorolt hatása kettős, mely minden esetben kedvezőtlen irányba befolyásolja a repülést:



1. romló aerodinamika: a lerakódó jég rontja a profil alakját, ezzel együtt a szárny körüli áramlás felhajtó erő komponense lecsökken, és a felület minősége leromlik, melynek hatására a légellenállás megnövekszik.
2. növekvő súly.

Maga a jegesedés a szárny kisebb méretéből adódóan sokkal korábban bekövetkezik, mint nagyobb méretű szárnyprofil esetén, és sokkal intenzívebb a kiválás. Ennek háttérében egyrészt az áll, hogy a kisebb szárnyméretből adódó vékonyabb határréteg miatt már sokkal kisebb cseppméret esetén bekövetkezik a szárnyprofillal való ütközés, és lerakódás. Vastagabb szárnyprofil esetén ugyanis az áramlási határréteg vastagabb, amelyet kisebb valószínűséggel képes áttörni egy-egy túlhűlt csepp, illetve csak nagyobb cseppméretnél következik be ütközés. A nagyobb méretű cseppek azonban magasabb hőmérsékleten fagynak meg, mint apróbb társaik [9].

A súlynövekedés terén is kedvezőtlenebb a helyzet, mint a nagyobb repülőgépek esetében, hiszen az UAV-k felületi terhelése általában alacsonyabb. Emiatt, ha lerakódás képződik, az hamar jelentős súlyt képvisel a jármű eredeti súlyához viszonyítva: nagyságrendi számítással kapható, hogy egy 1mm vastagságú lerakódás 10N nagyságrendű súlynövekedés jelent, ami egy kisméretű UAV esetén akár 10% nagyságrendben képes megnövelni a felszállósúlyt.

Összefoglalva tehát, a kisméretű UAV-k jegesedés szempontjából jobban kitettek, mint a nagyobb méretű repülőgépek. Ez egyben azt is jelenti, hogy már a felkészülés fázisában igen komoly figyelmet kell fordítani a jegesedés lehetőségére, mert annak igen komoly hatása lehet a küldetés sikerére.

Turbulencia, szélnyírás

Turbulencia alatt légmozgás olyan rendezetlen és véletlenszerű fluktuációját értjük, mely a szárny körüli áramlási és nyomásviszonyok állandó változását okozza. A fluktuációk eredete termikus konvekció, mechanikai hatás és a domborzattal való kölcsönhatás is lehet. Turbulencia UAV-kra gyakorolt hatásának vizsgálatánál abból kell kiindulnunk, hogy az UAV-k karakterisztikus mérete mennyiben különbözik a pilótás gépekétől. Általánosságban elmondható, hogy a szárny körüli áramlásra gyakorolt hatása szempontjából a turbulens képződmények vizsgálatát eggyel kisebb nagyságrendnél kell kezdeni. Másképp fogalmazva egy méter léptékű turbulencia elem akár destabilizáló hatást is okozhat az UAV járműre nézve, míg nagyobb méretű légi jármű esetén még csak rázás jelentkezik. Emiatt a turbulencia vizsgálatát ki kell bővíteni a méteres mérettartományra is [12].

A korlátozott térbeli kiterjedésű turbulencia hatása miatt megszűnő stabil repülés esetén, nagy magassági tartalék mellett lehetőség van korrekcióra (kérdés persze, hogy a robotot vezérlő szoftver hogyan reagál az átesésre). A légerők stabilizálódása után folytatható a küldetés. Alacsony magasságban bekövetkező erős turbulencia vagy intenzív szélnyírás eredménye idő előtti földet érés lehet, mely akár szerkezeti károsodást, illetve tereptárgyak megrongálását is eredményezheti. Turbulencia, extrém esetben, képes olyan túlterhelést okozni, mely a légi jármű maradandó deformációjához, töréséhez vezethet akár a levegőben. Fontos szempont a turbulenciával kapcsolatban még az is, hogy a szélirány nagy mértékben befolyásolhatja (az előterep tagoltsága okán) a turbulencia mértékét egy adott repülőtér esetében, mely azonban leginkább



csak tapasztalati úton figyelembe vehető helyi sajátosság. A személyzet által irányított légi járművekkel szemben – értelemszerűen – a turbulencia fiziológiai hatása nem befolyásoló tényező az UAV-k esetében.

Kedvezőtlen szélviszonyok

A kedvezőtlen szélviszonyok közé azokat az időjárási helyzeteket sorolhatjuk, amikor a túl erős szél miatt jelentős eltérítő hatás keletkezik, amely a fordulók stabil végrehajtását nehezíti meg, emiatt a küldetés pontos végrehajtása, vagy a célra tartási feladat nehezen, vagy nem végrehajtható. A fel- és leszállási műveletek végrehajtását elméletileg közvetlenül nem hátráltatja a szélirány, hiszen a pályairány sokkal szabadabban megválasztható a kisebb helyigény miatt. A reptárgyak és más helyi sajátosságok értelemszerű figyelembevételével, természetesen. A közvetett problémát a nagy szélesség miatt kialakuló turbulencia okozza, amelyet az előző pontban már kifejtettünk. A kis felületi terhelésű eszközök földi kiszolgálása viharos szélben szintén különös körtekintést, felkészültséget és figyelmet igényel.

Kedvezőtlen futópálya állapot

A le- és felszállási műveletek szempontjából az általános és közforgalmi repülések esetén kritikus elem, hogy a megfelelő felhajtóerő kialakulásáig, vagy annak megszűnése után a légijármű megfelelő tapadással kormányozható maradjon. Kis méretű UAV-k esetében sem a felszálláskor, sem leszálláskor nem jelentkezik olyan élesen ez a probléma. A levegőbe juttatás történhet katapult rendszer, vagy csörlő segítségével, melyek biztosítják egyben az iránytartást is. Leszálláskor ugyan számít a súrlódás, de a leszállási terep megfelelő kiválasztásával biztosítható az esetenkénti hosszabb fékezési szakasz, amely normál körülmények között jellemzően 10 m-es nagyságrendű.

A fenti meteorológiai paraméterek várható előfordulásának prognosztizálására igen pontos és nagy felbontású előre jelzett adatokra van szükség. Ezek előállítását korszerű és rendkívül bonyolult meteorológiai modellek segítségével valósíthatjuk meg. A következőekben ismertetjük egy mezoskálájú időjárás előrejelző modell cél szerinti alkalmazását, amely szoftver szabadon hozzáférhető, és megfelelően konfigurálható a feladat érdekében.

A METEOROLÓGIAI MODELLRENDSZER KIALAKÍTÁSA

Az időjárás várható alakulását számszerű előrejelzések prognosztizálják [14]. Tekintettel arra, hogy az időjárás globális és általában nem-linearitás folyamatok láncolata, az időjárási rendszer rendkívül érzékeny minden folyamatra, annak előrejelzése csak globálisan, azaz a teljes légkörre vonatkozóan hajtható végre. A Föld teljes légkörének összes folyamatát viszont nem áll módunkban nagy részletességgel modellezni, erre még a legkorszerűbb szuperszámítógépek is csak a repülésmeteorológia igényeitől jóval elmaradó felbontásban képesek. Ennek okán a globális előrejelzéseket szükséges leskálázni, azaz a vizsgált tartományra pontosítani nagyobb felbontásban, olyan folyamatok figyelembevételére, melyeket a globális modell nem volt képes megfogni. Erre a célra a közepes léptékű (mezoskálájú) időjárási modellek a megfelelő szoftverek, melyeket mintegy virtuális nagyítóként alkalmazhatunk a feladatra. Mezoskálájú model-

lek sem képesek azonban reprezentálni olyan kis léptékű, ám repülésmeteorológiai szempontból jelentős folyamatokat, mint például a turbulencia, vagy kisebb kiterjedésű zivatarok. Ezek az időjárási elemek a modell kimenő adatainak utófeldolgozási stádiumában kerülnek figyelembevételre.

Az NCEP Globális Előrejelző Rendszerének⁷ adatai leskálázását az Időjárás Kutató és Előrejelző Modell⁸ segítségével hajtottuk végre. A WRF modell egy olyan nyílt forráskódú, közösségi használatra szabadon hozzáférhető szoftver, mely kellően flexibilis, skálázható és alkalmazható a meteorológiai vizsgálatok széles tartományán. A modell által közvetlenül nem vizsgálható folyamatok közvetett figyelembevételére számos úgynevezett „parametrizációs séma” áll rendelkezésre [13], melyek segítségével több millió modell beállítási kombinációs lehetőség adódik a felhasználók számára. A szabad hozzáféréstől adódóan világszerte több tízezer felhasználó és fejlesztő dolgozik a modellel, ezért a tapasztalatok óriási számban állnak rendelkezésre. A WRF integrálásához szükséges kezdeti- és peremfeltételek már 4 órával a megfigyelést követően rendelkezésre állnak a teljes Földre vonatkozóan. A modell részletes leírását – terjedelmi okból – itt mellőzzük, a részleteket az érdeklődők a modell technikai leírásából [17], vagy a modell kézikönyvéből [18] tájékozódhatnak. Az alábbiakban röviden összefoglaljuk a WRF általunk elvégzett implementálásának fontosabb lépéseit.

Modellbeállítások finomhangolása I.: modell tartomány és rácsfelbontás

A céljainknak megfelelő (néhány kilométeres) horizontális rácsfelbontás elérése érdekében a globális adatok (amelyek felbontása fél fok földrajzi szélesség és hosszúság, nagyjából 50 x 50 km) több lépésben történő leskálázása szükséges. A felbontás növelése úgynevezett beágyazásos módszerrel történik [14][15][16], a beágyazott tartomány felbontása nem lehet sokkal kisebb, mint az öt körbevevő tartományé, elkerülve ezzel a tartomány határán bekövetkező parazita hullámok keletkezését, de a tartományok nem lehetnek túlságosan kis méretűek sem, az időjárási rendszerek "átsöprésének" elkerülésére. A rendelkezésre álló számítási kapacitás és a feladat nagysága kompromisszumaként került kialakításra a modell tartomány (2. ábra). A d01-d03, háromszorosan beágyazott leskálázási modelltartományok felbontása és rácsszámai az 1. táblázatban látható.

tartomány	GFS	d01	d02	d03
rácspontok száma	720 x 180 (globális)	97 x 97	97 x 97	202 x 121
horizontális felbontás	0,5° (~50 km)	22 500 m	7 500 m	2 500 m

1. táblázat A beágyazott modell tartományok rácsszáma és felbontása. Az egyes tartományok földrajzi elhelyezkedését a 2. ábra szemlélteti

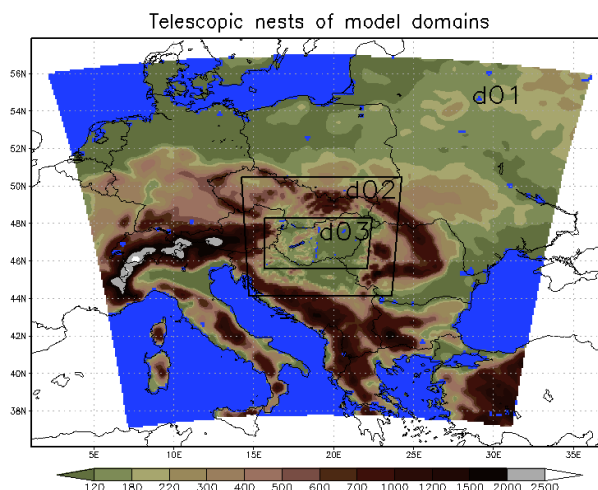
Vertikális szintek

A modell függőleges koordinátája felszínkövető, hidrosztatikus nyomás alapú σ -koordináta-rendszer, melynek felbontását olyan módon választottuk meg, hogy a sekély folyamatok, mint például

⁷ Global Forecasting System, GFS: <http://www.emc.ncep.noaa.gov/GFS/doc.php>

⁸ Weather Research and Forecasting Model, WRF

a ködös időjárási helyzetekre jellemző talajinverzió) detektálására is alkalmas legyen. Ennek érdekében a vertikális szintek számát megnöveltük a modelltér alsó 2000 m-es tartományában, ügyelve azonban arra, hogy ne okozzunk ezzel számítási instabilitást labilis időjárási helyzetben sem. A vertikális felbontás a felszín közelében száz méter körüli, nagyobb magasságban viszont a függőleges rácstávolság néhány száz méter. A szintek száma összesen 38.



2. ábra A mezoskálájú dinamikai modell számítási tartománya. A d01, d02, d03 beágyazott tartományok adatait az 1. táblázat tartalmazza

Modellbeállítások finomhangolása II.: parametrizációs séma beállítások megválasztása

A WRF jelenlegi verziója a parametrizációs lehetőségek tekintetében igen tág teret enged a felhasználóknak, ezzel is alkalmassá téve modellünket a céljainknak leginkább megfelelő felhasználásra.

A légköri víz fázisátalakulásával kapcsolatos (mikrofizikai) folyamatokat a WRF 16-féle lehetséges beállítással képes figyelembe venni. Miután ezek a folyamatok döntőek lehetnek a felhőképződés és a látást befolyásoló meteorológiai jelenségek során, a lehetséges parametrizációk közül 8 különböző sémát is teszteltünk. A felszín közeli (felszíni rétegen belüli) folyamatok kezelésére 10, a planetáris határreteg (PBL) modellezésére 12 séma áll rendelkezésre. Ezek közül 6 illetve 8 séma lett tesztelve. Ugyan a sugárzási folyamatok és a talajréteg modellezésére használt sémák érzékenységvizsgálatát mellőztük, de még így is 30 különféle modell beállítás kombináció került tesztelésre a több millió elvileg lehetséges beállítás közül.

dátum	leírás
2012. 01 .19.	Téli inverziós helyzet
2012. 01. 22.	Egy jól dokumentált jegesedési eset
2012. 02. 16.	Mélykonvekció, operatív modell által tévesen prognosztizált heves csapadékkal
2012. 05. 12.	Első fajú hidegfront
2012. 07. 29.	Erős konvekcióval kísért hidegfront, váratlanul erős szellőkésekkel
2012. 09. 08.	Markáns szélirány-változást okozó, magasnyomású gerinc áthelyeződés
2012. 09. 20.	Nagy nyomási gradiensű, erős szeles helyzet
2012. 10. 27.	Országos csapadékot adó mediterrán ciklon
2012. 12. 06.	UAV mérés időpontja, front előtti hideg légpárnás, ködös helyzet

Annak érdekében, hogy kiválasszuk azt a beállítást, amely repülésmeteorológiai célból a leginkább alkalmas, 9 különféle időjárási helyzetre futtattuk le a 30 tagból álló modell együttest. A vizsgálatra szánt esetek időpontját úgy igyekeztünk megválasztani, hogy azok a Kárpát-medence időjárására jellemző, repülési szempontból fontos időjárási helyzetek legyenek. Az egyes esetek leírását a 2. táblázat tartalmazza.

Verifikációs eljárások és eredmények

Jolliffe és Stephenson [19] illetve Wilks [20] részletes leírását adják a számszerű előrejelzések verifikációjára használatos statisztikai módszereknek, melyek alapján mind a folytonos eloszlású, mind a diszkrét paraméterekre vonatkozóan számszerűsíthető a modell előrejelzési képessége. Mezoskálájú modellek előrejelzéseinek verifikációja még a globális modellek értékelésénél is összetettebb feladat [21]. A viszonylag nagy tömegű modell kimenő adatot a szakirodalomban ismertett viszonylag egyszerű sémák alkalmazásával hajtottuk végre. A felszíni adatok mellett meteorológiai szondával mért vertikális adatokkal is végeztünk vizsgálatokat a felszín és 7000 m között 14 szinten. A hőmérséklet és a harmatpont mellett a szélesség és a szélirány szempontjából is vizsgáltuk a modell használhatóságát. A skaláris mennyiségek tekintetében a modell előrejelzések és a mérések különbségének számítottuk a négyzetösszegét mind a 9 esetre, a 31 állomás tekintetében, napi 25 alkalommal (óránként):

$$RMSE_l^m = \sqrt{\frac{1}{9 \cdot 31 \cdot 25 - 1} \sum_{k=1}^9 \sum_{j=1}^{31} \sum_{i=1}^{25} (\Delta_{i,j,k,l}^m)^2} \quad (1)$$

ahol

$$(\Delta_{i,j,k,l}^m)^2 = (F_{i,j,k,l}^m - O_{i,j,k,l})^2, \quad (2)$$

és F és O a (modell-) előrejelzés, illetve a megfigyelés adott pontban és pillanatban felvett értékei.

Azért, hogy a különböző nagyságrendű meteorológiai változók hibái összevethetővé váljanak, normalizáltuk őket az átlagos hibával mind a három paraméter tekintetében ($l = 1$: hőmérséklet, 2: harmatpont és 3: szélesség):

$$nRMSE_l^m = \frac{RMSE_l^m}{\sum_{m=1}^{30} RMSE_l^m} \quad (3)$$

Az m -edik modellkonfiguráció (ENS ensemble együttes modell előrejelzés m -edik tagja tekintetében a három skaláris alapmennyiség előrejelzésének együttes hibáját megadó RMS_score változó a normalizált RMS hibák összege, azaz:

$$RMS_score^m = \sum_{l=1}^3 nRMSE_l^m \quad (4)$$

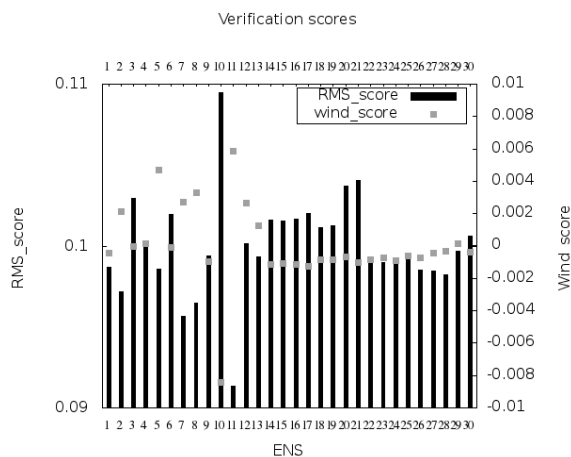
Fentiekből is következik, hogy minél kisebb az RMS_score, annál jobb a modellbeállítás. Egy

ideális (tökéletes) modell esetében ez az érték nullához tart. A szélirány tekintetében is vizsgáltuk, mennyire tudta a modell azt jól visszaadni. A szélirány vektor változó, így nem kezelhető azonos módon a skaláris paraméterekkel. A szélirány előjelezés, repülésmeteorológiai szempontból akkor a legrosszabb, ha éppen ellenkező irányú, mint várnánk, tehát hátszél van. Az oldalszél egyaránt kedvezőtlen, akár jobb, akár bal oldalról támad. Ezért a szélirány becslés jóságát a mért és előrejelzett szélsébség vektorok által bezárt szög koszinuszával mértük. Természetesen az sem közömbös, hogy az esetleges oldalszél mekkora erősségű. A szélirány hiba koszinusza tehát 1, ha a hiba nulla. Ezt normalizáltuk, majd kivontuk a normált szélsébség hibatabogból. Ezzel egy olyan szél-becslési hiba paramétert („Wind_score”) kaptunk, amely annál nagyobb értéket ad, mennél jobb a szélbecslésünk.

Az RMS_score és a Wind_score együttes elemzésével kiválasztásra került az a paraméter kombináció, mely a legjobban teljesített az általunk vizsgált esetek között. A továbbiakban ezzel a parametizációval dolgoztunk (3. táblázat és 3. ábra)

folymat	séma
PBL	Bretherton and Park JC határréteg séma ([22] – 9)
mikrofizika	WSM Single-Moment 3-class séma ([23] – 3)
kumulusz	Kain-Fritsch ([24] – 1)
felszíni réteg	MM5 séma, amely a Monin-Obukov hasonlósági elméleten alapszik ([25] – 1)

3. táblázat A legjobb verifikációs mutatókat adó paraméter-beállítás értékei. A sémák részletes leírását a [] szögletes zárójelben megadott referenciák tartalmazzák. Gömbölyű zárójelben () kerültek megadásra a sémák WRF 3.4-es verziójában alkalmazott technikai hivatkozási számai



3. ábra. Az egyes parametizációs beállításokkal kapott hiba mutatók értékei. A legjobban teljesítő beállítás (#11-es ENS tag) értékeit a 3. táblázat tartalmazza. Megjegyzés: Az RMS_score optimális értéke alacsony, míg a Wind_score értéke kedvező esetben minél magasabb

Nem végeztük el a sémák klaszter analízisét, hiszen a dimenziók ily magas száma ezt nem tenné lehetővé. A vizsgált esetek darabszáma viszont aránylag alacsony, ezért azok szignifikancia vizsgálata sem lehetséges. A sémák további alkalmazhatósága viszont mégis megalapozott, hiszen ahogyan arra már korábban is utaltunk, olyan eseteket választottunk ki, melyek repülésmeteorológiai vonatkozású, a Kárpát-medence időjárásában meghatározó, gyakori jelenségek.



A modellrendszer eredményeinek továbbítása a felhasználók részére

A meteorológiai modell kimenő adatok utófeldolgozási és megjelenítési eljárást igényelnek. A kimenő alapadatokból repülésmeteorológiai mennyiségeket kell származtatni, majd azokat oly módon megjeleníteni, kódolni, hogy a felhasználó (pl.: UAV repülő személyzetek, döntéshozók), aki általában időjárás-modell adatokkal való munkában kevésbé járatos, korlátozott informatikai lehetőségekkel rendelkezik, de tetszőleges, könnyen hozzáférhető informatikai platformon kívánja elérni az adatokat. Magának a számítószervernek a publikus felületére kerülnek ki utófeldolgozást követően az adatok grafikus és numerikusan kódolt formában. A grafikonok két csoportra oszthatók: (i) egy-egy kiválasztott földrajzi helyre (repülőterekre, UAV repülések céljára használható katonai gyakorló lőterekre vagy a modelltartomány bármely tetszőleges pontjára kiválasztott helyre) vonatkozó diagramok (felszíni adatok vagy vertikális profilok időbeli menetét bemutató ábrák) valamint (ii) felszíni vagy magassági szintre vonatkozó térbeli eloszlásokat térképes formában óránként bemutató ábraszorozatok. A diagramok földrajzi helyének kiválasztása történhet repülőtér vagy lőtér ICAO kódja alapján, vagy a földrajzi koordináták kézi bevitelével, illetve a *Google Map* térképen kiválasztott pont grafikus megadásával. A térképi információk időbeli animációját a felhasználó tetszőlegesen kiválasztott mezők egymásra helyezésével és időbeli léptetésével kaphatja meg. A numerikus formában megjelenő adatok a METAR és TAF táviratok formájához hasonló kódolt karakter sorozatokként érhetőek el. Az interneten keresztül hozzáférhető adatokra vonatkozóan, melyek 96 óras időtávra adnak tájékoztatást és naponta két alkalommal frissülnek, a 4. táblázat ad tájékoztatást. Fontos szempont még az adatok megjelenítésénél, hogy azok egy korlátozott internet elérésű helyen is könnyen hozzáférhetőek legyenek, akár mobil eszközön, kis sáv szélesség mellett, de akár a repülés tervezésénél is kellő mennyiségű információval szolgáljanak egy nagyobb informatikai kapacitás esetén. A repülésmeteorológiai viszonyok várható alakulásáról ad áttekintést, az oldal frissítésének időpontjában várható NATO színek kód térkép, mely alapértelmezettként jön fel az oldal betöltésekor.

Az aktuális modell produktumok mellett elérhetőek még a modell futtatásának kezdeti időpontjától eltárolt, napi kétszeri archív futtatások adatai az aktuális modell produktumokhoz hasonló formában. Ezek az információk az analógián alapuló következtetések levonását, verifikációt és módszerfejlesztési munkát hivatottak elsősorban elősegíteni. Archivált negyedóránkénti műhold és radar képekkel együtt eltárolásra kerültek rendszerünkben a korábbi szonda és METAR, valamint CQ adatok is. Ezek, a statisztikus modellező munkacsoport produktumaival egyetemben, szintén a teljes előrejelző módszer fejlesztésében kerülnek majd további felhasználásra.



nézet típus	elérhető adatok
térkép animációk	Alacsony, középmagas és magas szintű felhőzet mennyisége, záporos és frontális csapadék intenzitása, szélirány (vektor) és szélsébség (színezés), légrétegződés, termikus konvekció intenzitás, konvekciós és kondenzációs szint magassága. A térképek a felhasználó által kívánt átlátszósággal rétegezhetőek egymásra.
felszíni (SFC) paraméterek	QNH, 10 m-es szélsébség és szélirány, 2 m-es léghőmérséklet és harmatpont, valamint 1500 m-es konvekciós aktivitás (trigger-) kiváltó-hőmérséklete csapadék mennyiség (mm) és intenzitás (mm/h), konvektív csapadék jellemzői, (alacsony, középmagas és magas szintű) felhőmennyiség meteogram formájában.
számszerű (NUM) felszíni adatok	10m szélsébség, szélirány, csapadék intenzitás, felhőmennyiség, hőmérséklet és harmatpont, trigger hőmérséklet és QNH távirati formában.
számszerű (NUM2) repülésmeteorológiai adatok	Repülésmeteorológiai paraméterek (látótávolság és felhőalap magasság) várható értéke óránként számszerűen megadva.
vertikális profilok (TROPO3) 3000 m-ig	Szél, hőmérséklet, légrétegződés és relatív nedvesség várható menete a troposzféra alsó 3 km-es rétegében. A vízszintes tengely az UTC-ben megadott időpont, a függőleges tengely a tengerszint feletti magasság. A mezők tér-időbeli eloszlása színezéssel, illetve a szélirány esetében vektorokkal kerül megadásra.
vertikális profilok (TROPO7) 7000 m-ig	TROPO3 nézethez hasonlóan, a nagyobb magasságú repülések céljaira rosszabb átláthatósággal, ám nagyobb, 7 km tengerszint feletti magasságig jeleníti meg a mezők várható magassági és időbeli menetét.
repülésmeteorológiai (UAV) adatok	SFC nézethez hasonló meteogramok a felszíni változokról, ám a WRF "gyári" beépített sémáival származtatott széllokés, felhőalap és látótávolság becslésekkel, a felhő mennyiség és a csapadék megjelenítését elhagyva.
termikus (TERMAL) paraméterek	A termikus konvekció karakterisztikáinak várható időbeli menetét meteogramszerű formában megadó diagramok: magassági hőmérsékleti advekció, konvekciós és kondenzációs szint magassága, Termikus Index profil fejlődése és a számított vertikális sebességek menete.

4. táblázat A modell adatokból készülő, a felhasználók számára a világhálón keresztül elérhető, modell adatokból származtatott UAV repülésmeteorológiai adatok összefoglaló leírása

További módszertani fejlesztések

Tervezzük, hogy a WRF dinamikai modell bemenő adatai között a statikus (földrajzi) adatbázis helyi sajátosságokat az eredeti globális adatbázisnál nagyobb részletességgel tartalmazó talajtani (TAKI) és felszínhasználati (CORINE adatbázis) alkalmazásával cseréljük le. A hazai sajátosságoknak még inkább megfelelő talaj hidraulikai és felszíni parametrizációs együtthatók alkalmazásával kívánjuk még inkább a Kárpát medencére optimalizálni az előrejelző rendszert meghajtó dinamikai modellünket. A modell fejlesztéseket a korábbinál hosszabb- legalább egy éves időszakon kívánjuk verifikálni, szignifikancia vizsgálat segítségével.

A modellfejlesztés végeztével a repülésmeteorológiai paraméterek származtatására alkalmazott hazai és nemzetközi módszerek közül igyekszünk kiválasztani a leginkább megfelelőt, melyet a rendszerbe integrálva további verifikáció követ. A fejlesztés célja egy homogén, 2012. év elejétől napjainkig tartó, folyamatos, és dinamikusan bővülő archív adatbázis létrehozása a napi produktumok mellett, melynek segítségével a UAV repülések céljára fejlesztett előrejelző rendszer felhasználói felülete is tovább bővül majd. Emellett a rendszernek tervezzük egy haladó (expert)



felületét is beindítani, melynek a repülésmeteorológiában és numerikus produktumok használatában járatosabb kutatók, fejlesztők lehetnek későbbi hasznélvezői.

A modellszámítások technikai részletei

A modell integrálások egy DELL PowerEdge T610 11G típusú számító szerveren kerülnek integrálásra (16 GRAM, 24 vcore, *hiperthreading*: ON). A jelenlegi modell beállítások mellett egy 96 órás futtatás számítási idő szükséglete (WRF v3.4.rel.: 6. Apr. 2012.) a telepítéskor elérhető legfrissebb Linux operációs rendszeren (Debian 6.0.5. *Squeeze* amd64) 4.4.5-8 verziószámú *gfortran* fordítóval, megosztott memória használatával, párhuzamos futtatásokra optimalizáltan lefordítva: mintegy 120 perc.

MODELL EREDMÉNYEINEK ÖSSZEHASONLÍTÁSA UAV MÉRÉSI EREDMÉNYEKKEL

Több sikeres előkészítő repülést követően két alkalommal hajtottunk végre összehasonlító (kalibráló) repüléseket, melyek során elsősorban a repülőképekre szerelt érzékelőkkel mért hőmérsékleti és nedvességi profilok menetét vetettük össze a modell által szolgáltatott adatokkal. A mérések során a teljes mértékben hazai fejlesztésben készült BXAP15 UAV rendszert (4. ábra) alkalmaztuk [26].

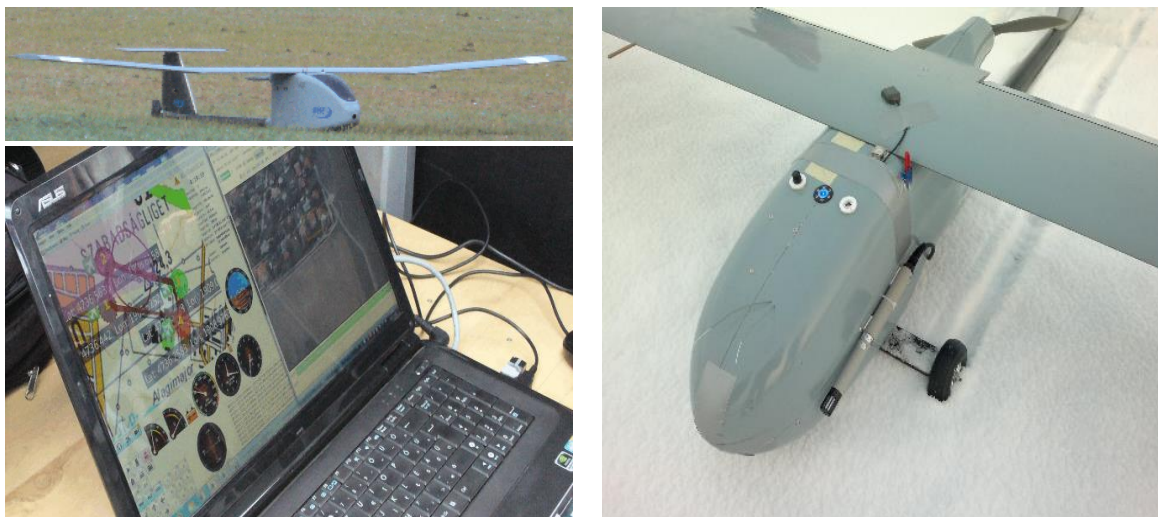
A pilóta nélküli légi rendszer leírása – földi egység

A rendszer egy légi és egy földi egységből áll. Ez utóbbi magában foglalja a kézi vezérléshez szükséges távirányító rendszert, mely egy nagy nyereségű, GPS vezérelt, forgatható antenna segítségével kommunikál a légi egységgel, kétirányú, adaptív mikrohullámú adatkapcsolaton keresztül. A kezelő egység felhasználóbarát grafikus felületén repülési adatok (levegőhöz viszonyított és felszín feletti sebességek, barometrikus és GPS magasság, akkumulátor kapacitás, navigációs adatok, műhorizont) valamint élő, nagy felbontású, légi videókép követhető figyelemmel, a repülőgép pillanatnyi telemetrikus adatai mellett. A repülés közben is módosítható repülési terv átadása is e kezelőfelületen keresztül történik. A repülési terv nem más, mint a légijármű vezérlést végző robotpilóta utasításait tartalmazó leírás, akár 500 darab útvonal pont földrajzi és magassági koordinátáját, valamint a hozzá vezető száron kívánt célsebességet tartalmazó adatbázis. A repülőgép a célpont megadott sugarú körének érintését követően felveszi a következő pontra vezető irányt és automatikusan kompenzálja a közegáramlás eltérítő hatását. A robot üzemmód során bármikor lehetőség van kézi beavatkozásra a földi kezelőegységen keresztül. A földi komputer ezen kívül tárolja még a légi egységről sugárzott adatokat is.

Légi egység

A légijármű kialakítása a legkorszerűbb kompozit technológia (üveg- és szénszál valamint kevlar erősítésű gyanta) és számítógépes tervezés (3D CAD) alkalmazásával történt. A fedélzeti elektronika összeállítása során is a robusztus kialakítás, megbízhatóság volt a fő szempont. A jármű egyszerűen szerelhető és könnyen szállítható. A repülés során keletkező adatok eltárol-

lásra kerülnek a fedélzeti egységben is (fekete doboz funkció). A jármű levegőbe juttatása történhet katapult, vagy csörlő indítással, illetve futóműről, saját erővel való felszállással. A leszállás kerékre, hasra, vagy elfogó hálóba történhet. Rendkívüli esetben (pl. kommunikáció megszakadása, vagy vészlandolás) a rendszer alkalmas ejtőernyővel is földet érni. A repülő eszköz további műszaki jellemzőit az 5. táblázat tartalmazza.



4. ábra A meteorológiai mérések céljára alkalmazott pilóta nélküli rendszer . A légi jármű (bal felső panel) és a földi kezelő felület (bal alsó panel) képe, valamint a meteorológiai szenzor rögzítése (jobb oldali panel)

repülési sebesség	60-100 km/h között
szolgálati csúcsmagasság	mérésekkel igazoltan több, mint 3500 m AMSL
fesztávolság	3,7 m
hossz	1,7 m
legnagyobb felszállósúly	14 kg
legnagyobb repülési idő	akár 90 perc
meghajtás	1200 W (névleges) teljesítményű 3-fázisú elektromos
hasznos terhelés	körülbelül 4 kg

5. táblázat. A repülőgép fontosabb műszaki jellemzői

Meteorológiai szenzorrendszer fejlesztés

A repülőgéppel – alacsony felületi terhelésének és nagy flexibilitásának köszönhetően – lehetőség nyílik a kis skálájú légköri folyamatok (például turbulencia) pontos, *in-situ* detektálására. Ennek okán, a meteorológiai előrejelző rendszer fejlesztésével párhuzamosan – a felszíni mikrometeorológiai turbulencia mérések és a nemzetközi repülőgépes megfigyelések tapasztalatai alapján – egy nagy érzékenységgű meteorológiai szenzorrendszer kialakítása zajlik, mely az alap légköri paraméterek kis gyakoriságú („lassú”) megfigyelése mellett magában foglalja a hőmérséklet és nyomási paraméterek nagy gyakoriságú, tervezett mérését is. A repülőgépen rögzített szenzorok mellett a repülések során a földi egységhez kapcsolódó szenzorok is folyamatosan mérni és rögzíteni fogják a legfontosabb meteorológiai változókat. A lassú adatok rögzítési gyakorisága már jelenleg is 1 Hz, míg a gyors adatok tervezett frekvenciája 10 Hz lesz.



A lassú adatokat a földi egységnek is továbbítjuk majd rádióhullámon, ahol a földön mért paraméterek mellett azok is rögzítésre kerülnek majd.

A fedélzeten rögzített gyors (10 Hz-es) adatok:

- 3D gyorsulásmérő (RAZOR IMU szenzor);
- giroszkóp (2 tengely körüli szögsebesség, RAZOR IMU szenzor);
- 3D mágneses helyzet adatok (RAZOR IMU);
- gyors válaszidejű hőmérséklet (platina szálas, vagy termo-elemes);
- 5 irányból érkező dinamikus (5 Hp), valamint statikus nyomás adatok (4 ferde furat segítségével mérve a csúszási- és állásszög detektálására, részletes leírását lásd a következő fejezetben).

Fedélzeten rögzített lassú (1 Hz-es) adatok:

- hőmérséklet és harmatpont (Vaisala HMP50, SHT75 digitális T és Rh szenzor);
- légnyomás (SCP1000);
- „Prandtl”-csővel mért, levegőhöz viszonyított sebesség (statikus és dinamikus nyomás, Airspeed V3 + „Pitot”-cső);
- globálsugárzás;
- mágneses irányszög;
- GPS telemetrikus adatok (magasság, földrajzi koordináták, és ezekből származtatott föld feletti sebesség és irányszög).

Földi állomáson tervezett mérések adatai (1 Hz-es tervezett rögzítési gyakorisággal):

- hőmérséklet és nedvesség (Vaisala HMP50, SHT75 digitális T és Rh szenzor);
- légnyomás (SCP1000);
- szélirány és sebesség (ultra-szónikus anemométer);
- globálsugárzás;
- GPS telemetria referenciamérések differenciál GPS adatok származtatására, mely a pozíció milliméter pontosságú megadását, valamint gyorsulási és helyzet adatokkal együtt a turbulencia igen nagy érzékenységű detektálását teszi lehetővé.

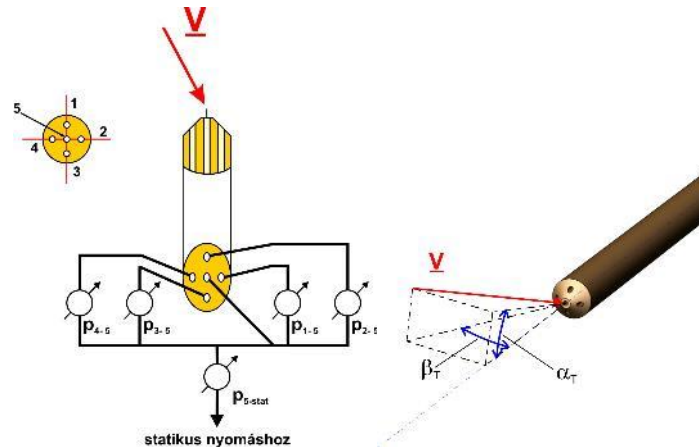
A turbulencia detektálásához a repülési adatok és a repülőgép levegőhöz viszonyított helyzetének (állásszög és csúszási szög) nagy pontosságú ismerete szükséges. A ferde megfűvások mérésére a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Kármán Tódor Szélszárnak Laboratóriumában fejlesztett és kalibrált speciális szonda részletes ismertetését az alábbiakban foglaljuk össze.

Többlükű szonda alkalmazása a szélesebb sebesség mérésére

Az öt- illetve hétlyükű szondák alkalmasak az áramló közeg pillanatnyi sebességvektorának meghatározására széles, akár ± 70 fokos szögtartományban, valamint a néhány m/s-tól akár szupersonikus sebességekig terjedő sebesség-tartományban. Tropea és szerzőtársai [27] részletesen ismertetik a mérési módszert.

A mérés elve

A Prandtl-csőhöz hasonló elvet követve, a szonda egy kúpos homloklfelületen elhelyezett 5 furat irányában ható nyomás és a statikus nyomás különbségét méri (5. ábra). A nyomáskülönbségek-ből kalibrációs összefüggések segítségével határozható meg a 3 sebességkomponens, vagy – más koordináta-rendszert alkalmazva – a sebesség nagysága, az α_T állásszög és β_T csúszási szög.

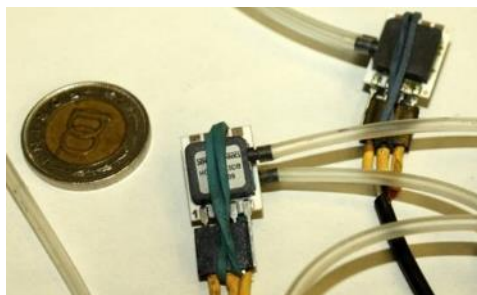


5. ábra Ötlyukú szonda elvi felépítése és szögdefiníciói

A szonda előnye robusztussága (ellentétben például a hődrótos mérés technikával), valamint, hogy nem szükséges részecskéket bocsátani az áramlási térbe a láthatatlan közegáramlás láthatóvá tételéhez, mint a lézertoptikai sebességmérő módszerek esetében. Ennek köszönhetően széles alkalmazásuk számos területen lehetséges: gázturbinák, turbógépek, lapátkaszádok laboratóriumi vizsgálatánál, valós léptékű jármű-aerodinamikai szélcsatorna vizsgálatokban, szél-turbinákon, repülőgépeken, rakétákon. A mérési módszer hátránya a szonda méretéből (3-5 mm átmérő) adódó véges térbeli felbontás, a nyomásvezetékek hosszából és a nyomásmérő szenzorok válaszüvegéből adódó nem túl nagy időbeli felbontás (max. néhány 100 Hz), és a vizsgált áramlás kismértékű megzavarása. Ez az eszköz alkalmazását szélcsatorna modellkísérletekben ugyan behatárolja, de meteorológiai mérésekre a módszer kiválóan alkalmas.

Az alkalmazott szonda jellemzői

A szonda 4 mm átmérőjű, vörösréz csövekből készült forrasztással. A nyomásfuratok belső átmérője 0,5 mm, a szonda félkúpszöge 45° , amelyet esztergálással alakítottunk ki. A nyomásfuratok mintegy 300 mm hosszú, 0,8 mm belső átmérőjű teflon csöveken csatlakoznak a Sensortech HCLA típusú, hőmérséklet kompenzált nyomásszenzorokhoz (6. ábra). A szenzorok adatait az 6. táblázat tartalmazza. A szenzorok I2C buszon csatlakoznak a központi adatgyűjtő egységhez.



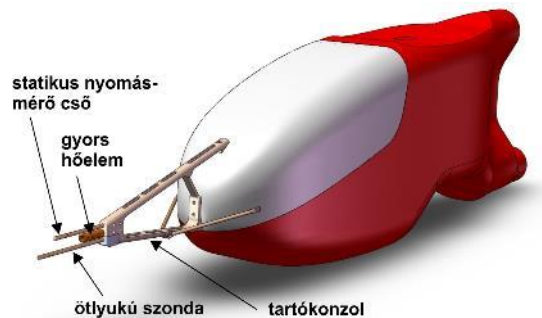
6. ábra HCLA nyomásmérő szenzorok

méréshatár	0–1250 Pa ($p_{5\text{-stat}}$) ± 250 Pa (többi nyomás)
válaszidő	0,5 ms
linearitási- hiszterézishiba	és 0,05 %FS (tipikus) 0,25 %FS (max)
hőmérséklet hiba	< 0,02 %FS/°C
D/A átalakítás	12 bit

6. táblázat Az alkalmazott szenzorok jellemzői

Maga a szonda a robotrepülőgép orráról 270 mm-re előrenyúló konzolon kerül elhelyezésre. Ezzel elkerülhető a repülőgép törzsének áramlasmódosító hatásából származó mérési hiba. Ez utóbbi pontos megismerésére 3 dimenziós Ansys FLUENT CFD szimuláció készül.

Az alumíniumból mart szondatartó konzolon az ötlyukú szonda mellett helyezkedik majd el a gyors hőmérséklet érzékelő, és egy statikus nyomásmérő cső is, valamint e konzol segítségével további szondák zavartalan áramlásban való rögzítésére is lehetőség adódik (7. ábra).



7. ábra A szondák rögzítése a robotrepülőgépen

Kalibráció

A szonda kalibrációja során ismert szélességvektor mellett rögzítjük az 5 szenzor által mért nyomást. Számos kalibrációs módszer létezik, ezekből mi a van der Kronenberg és szerzőtársai [28] által javasolt módszert követtük.

A kalibrációt a BME Áramlástan Tanszék Kármán Tódor Szélcatorna Laboratóriumában végeztük, egy 0,35 x 0,35 m keresztmetszetű, nyomóüzemű, nyitott mérőterű szélcatornában. A szonda szögállítását egy 2-léptetőmotoros mechanizmus segítségével valósítjuk meg, melyet számítógéppel vezérlünk. A mérés NI LabVIEW célprogrammal, automatizáltan történik, 24 m/s háttéráramlási sebesség mellett. A referencia sebességet Prandtl-cső segítségével mérjük.

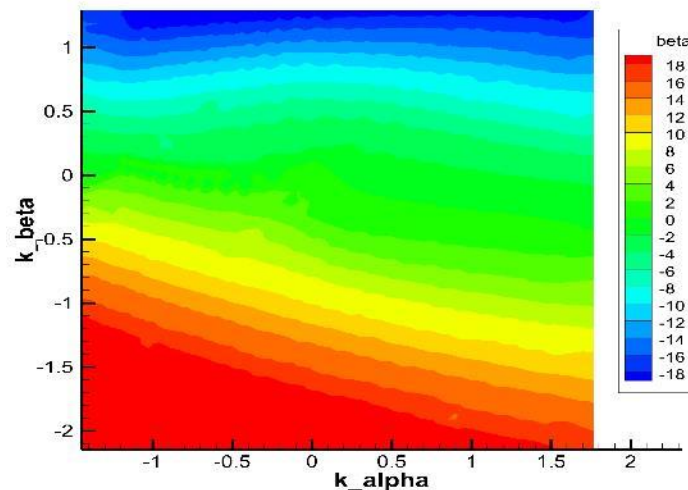
Az α_T állásszög és β_T csúszási szög $\pm 18^\circ$ -os tartományában, kb. $1,5^\circ$ -os lépésközzel kb. 600 pontban veszünk fel kalibrációs pontokat. Ennél nagyobb (csúszási és állás-) szögből nem várható megfűvás normál helyzetben, hiszen a szonda repülőgépen kerül elhelyezésre.

A mért nyomásokból meghatározhatók a k_α és k_β tényezők:

$$k_\alpha = \frac{P_{1-5} - P_{3-5}}{\Delta p} \quad \text{illetve} \quad k_\beta = \frac{P_{2-5} - P_{4-5}}{\Delta p},$$

ahol $\overline{\Delta p}$ a 4 szélső furaton mért nyomás korrigált átlaga, a van der Kronenberg és szerzőtársai (2008) [28] által definiált összefüggés alapján.

A tényezők függvényében ábrázolható az α_T és β_T szög, valamint a sebesség. Az így kapott pontokra a szoftverben kiválasztható fokszerű felület illeszthető. Illusztrációképpen a β_T -re mutatjuk be k_α és k_β függvényében a 8. ábrán.



8. ábra A β_T függése a k_α és k_β tényezőktől (interpolált felület)

A mérés/repülés során a k_α és k_β tényezőkből, valamint az illesztett felületek kalibrációs konstansából képezhető a sebességvektor hossz tengellyel bezárt szöge.

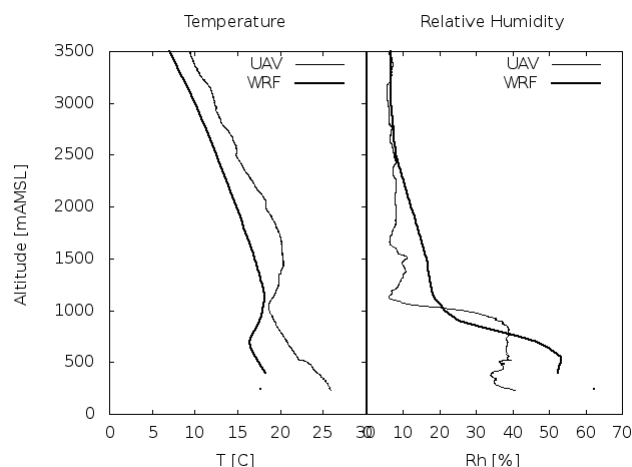
A repülőgépet körülvevő közeg mozgásának sebességvektora ezek után a szondához képest mért sebességvektor, és a robotrepülőgép Földhöz-rögzített koordináta-rendszerben ismert irányszöge, állásszöge és dőlésszöge, valamint sebessége és gyorsulásai figyelembevételével számítható. Ez utóbbi adatok a RAZOR IMU giro-szenzorból és a GPS vevőből származnak.

A szonda kalibrációja jelenleg is tart, tervezünk ismételt kalibrációs méréseket, több különböző sebességen, a mérési bizonytalanság meghatározására. A tartókonzol gyártása szintén folyamatban van.

Az UAV meteorológiai mérések eredményei

A prototípus, meteorológiai mérő és adatrögzítő rendszer illesztését három repülés előzte meg a projekt keretein belül. Ezek a légszavár és a meghajtás finomhangolását célozták a projekt számára optimális repülési körülmények (súlyponthelyzet, felületi terhelés, repülési sebesség, magasság és állásszög tartomány) között. Ezt követte két felszállás, melyek során egy alapvető meteorológiai szenzorral felszerelt (Vaisala típusú "lassú" állomási hőmérséklet és nedvességmérő) konfigurációban hajtottunk végre repüléseket. Az első repülés a jármű csúcsmagasságának megállapítását célozta, mely igen jó eredményt hozott: a légtér szabta felső korlát magasságában (3500 m AMSL) a repülőgép önerőből még 2 m/s emelkedésre volt képes. A repülés során mért hőmérséklet és nedvességi adatokat az adott helyre és időpontra a modell által prognosztizált értékekkel hasonlítottuk össze. Amint az a 9. ábrán is látható, a modell jól adta vissza a mért nedvességi viszonyok menetét, bár a határretegben (alsó 1000 m) kissé magasabb nedvességet prognosztizált a mértnél. Szembeötlő azonban a hőmérsékleti profil menetek közötti különbség: az inverziós réteg alapját a modell 600 m környékére adta, a mérés azonban 1000

m fölött mutat emelkedő hőmérsékleti értékeket. Ez azért is különös, mivel a nedvesség mennyiségében a kiszáradás egybeesik a mért és a modellezett inverziós szint magasságával, ám a mérések rendhagyó módon az inverziós szint alatti kiszáradást mutattak (9. ábra). Ez a viselkedés nem a modell jóságának hibájára, hanem sokkal inkább arra utal, hogy a hőmérséklet mérésében feltételezhetően nagyobb késleltetést tapasztalunk, mint a mért nedvesség esetében. Ezt a sejtést a későbbi mérés is alátámasztotta.



9. ábra A 2012 október 19-i magassági repülés során mért (vékony vonal) és WRF modell által számított (vastag vonal) hőmérsékleti és nedvességi profilok. Látható, hogy a mérések alapján a kiszáradás (rendhagyó módon) nem a mért inverziós réteg aljánál (kb. 1100 m AMSL) kezdődik, hanem jóval alacsonyabb (600 m AMSL körüli) szinten. Későbbi mérés igazolta, hogy az inverziós szint valójában alacsonyabban, a nedvességi profil által mutatott magasságban helyezkedett el (ahogyan azt a meteorológiai előrejelző modell is helyesen adta), a hőmérsékleti profil magassági torzítása feltételezhetően a hőmérő szonda átlagolásból adódó késleltetéséből adódott

Sejtsünk igazolására egy olyan mérési programot terveztünk meg, amely különböző szinteken különböző idejű konstans magasságú repülésekkel, egy inverziós helyzetben került végrehajtásra. A kalibráló repülésekre 2012. december 06-án (Szent Miklós napon) a délelőtti és a napnyugta előtti órákban került sor a Budapesttől északra található LHDK Dunakeszi sportrepülőtéren (N47.61, E019.145, 126 m AMSL), mely földrajzi hely egyébként LHBP Liszt Ferenc (Ferihegy) nemzetközi repülőtértől (ahol nem melleleg műszeresen rendszeresen mért felhőalag magassági és látótávolsági adatok állnak rendelkezésre) mindössze 21 km-re észak-északnyugatra található.

A Mikulás-napi repülés tapasztalatai

Időjárási helyzet

Az időjárási kilátások számos nehezítő körülményt ígértek erre a napra, ám a napok óta tartó, fagyos és ködös időjárást okozó hideg légréteg, a közeledő, és napnyugtára a Duna vonalára prognosztizált hidegfront hatására gyengülni látszott. A front előtt az ország jelentős területén egész nap megmaradt a köd, sokfelől jelentettek szemcsés hó hullást, a hőmérséklet a hajnali -10 fok körüli értékekről napközben sem emelkedett sehol fagypont fölé. Az erős talajinverzióban, a front előtt még délies, délkeleti légmozgással foltokban változó nedvességtartalmú levegő elemek érték el a repülés helyszínét, advekción ködben gyorsan váltakozó látást eredményezve. A Tisza és Tápió-völgyében keletkezett ködök hirtelen látásromlást okoztak például



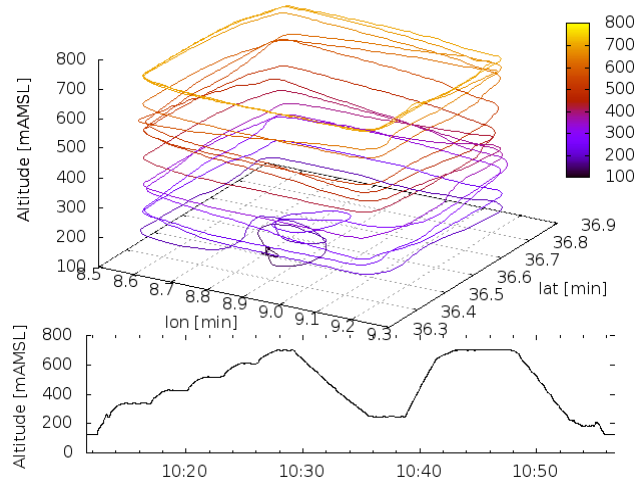
Ferihegyen is, ahol mindkét felszállás időpontjában sűrű köd volt, 500 m körüli látótávolsággal. A modell előrejelzés Dunakeszi térségére a hőmérséklet és a harmatpont menetének szétválását, a rossz látás megszűnését, majd a front érkezésével, a napnyugta utáni órában a szél megerősödését és csapadéktevékenység kezdetét adta. A front felhőzete a második repülés végén már valóban beárnyékolta a repülőgépet, ezért a napsugárzás hatására korábban jelentkező hőmérsékleti ingadozások sem voltak már tapasztalhatóak a második repülés vége felé. A leszállást követő órában pedig – menetrend szerű módon követve az előrejelzést – szellőkésekkel és közepes intenzitású havazással megérkezett a front is.

Repülési terv

A repülési útvonal megtervezésekor – a hőmérsékletmérés válaszidejének megállapítására irányuló szempontok mellett – a szél meghatározását tartottuk szem előtt. A repülési útvonal nem vezethet lakott terület fölött (mely a sűrűn beépített agglomerációs környezetben igen erős feltétel) és nem zavarhatja a polgári repülőteret esetleges általános légi forgalmát sem. Fentiek figyelembevételével a vertikális és horizontális szerkezetre az alábbi előírásokat tettük.

A repülés során egy-egy konstans szinten a repülőgép egy-egy kört tesz, mind emelkedő, mind süllyedő repülési szakaszok között, majd ezt követően több kört is megtesz a legalsó és a legfelső magassági szinten. Az eltérő hőmérsékletű szinten eltöltött, különböző időtartamú repülésekből meghatározható a szenzorok válaszideje. A rendelkezésre álló légtér sajátosságai legfeljebb 700 m AMSL repülési magasságot tettek lehetővé, a tereptárgyak miatt azonban 200 m AMS alatti magasságban nem volt lehetséges repülni. Ezért a száz méteres különbséggel repült magassági szinteken egy-egy kört megtéve mind emelkedő, mind süllyedő repülés során történtek mérések. Ezt követően a legalsó és legfelső szinten 2–2 kört mért a gép (10. ábra).

A repülési pálya egy szabályos, egyenként 1000 m oldalhosszúságú négyzet oldalai mentén került kijelölésre. Az oldalak úgy lettek meghatározva, hogy az egyes szárazon a repülési pálya a fő égtájak irányába essen. Ilyen módon a szélesebb eltérítő hatása az egyes égtájak irányába számítható a föld feletti (GS) és levegőhöz viszonyított sebesség „Pitot”- vagy „Prandtl”-cső nyomási adatai alapján működő műszer által meghatározott sebességek (IAS) különbségéből. Az azonos magasságú repülések a négyzet északkeleti és délkeleti csúcspontja között történtek, míg a magasságváltoztatás a negyedik száron, a keleti oldalon történt (óramutató járással ellentétes körülrepülési irány (10. ábra felső panel).



10. ábra. A repülési pálya térbeli nyomvonala magasság szerint színezve (felső panel) és a repülési magasság időbeli menete (alsó panel). Az áttekinthetőség érdekében a földrajzi szélességi és hosszúsági koordinátáknak csupán a fokperc értékei kerültek feltüntetésre a felső panel vízszintes koordináta tengelyein. Az alsó panel vízszintes tengelyén az idő UTC-ben került megadásra

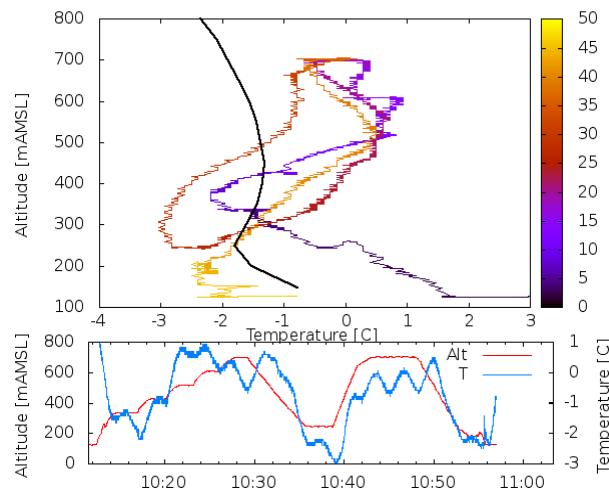
Repülési adatok

A repülési és meteorológiai adatok három különböző forrásból és gyakorisággal kerültek rögzítésre a fedélzeti adatgyűjtőkben. A repülés során a barometrikus alapon mért, a műszer bekapcsolásának szintjétől, ICAO standard légkör szerint kalibrált, nyomáskülönbségből számított relatív (AGL) magasság és a „Pitot”-csővel mért (IAS) sebesség 10 Hz-es gyakorisággal került rögzítésre. A telemetria (földrajzi koordináták és GPS alapú, WGS 1984-es gömb felszínétől vett abszolút magasság 2 Hz gyakorisággal, míg a meteorológiai adatok (hőmérséklet és nedvességi vagy harmatpont értékek) másodperces időközönbséggel kerültek tárolásra. A különböző gyakorisággal rögzített adatok szinkronizálását tovább nehezítette az, hogy a barometrikus adatok időbélyege a műszer bekapcsolásától milliszekundumban számított relatív idő, míg a telemetrikus adatoké a műholdas kommunikáció felállításától áll rendelkezésre UTC időben. Sajnos a meteorológiai adatok időbélyege csak a földön volt megbízható, repülés közben a meteorológiai szenzorrendszer GPS adatait megzavarta a repülőgép elektronikus rendszere, melynek okán a meteorológiai adatok időbélyegei a repülés alatt nem voltak megbízhatóak. A hőmérséklet és nedvesség mérésére használt Vaisala HMP50, SHT75 szenzor a repülőgép oldalán került felerősítésre (4. ábra jobb oldali panel). Az adatok a repülőgép belsejében elhelyezett adatgyűjtőben kerültek tárolásra. Az adatok szinkronizálása után vizsgáltuk a hőmérsékleti és nedvességi mérések valamint a sebességi adatok alapján becsült szélesebségek magasság, idő és repülési irányszög szerinti meneteit. Eredményeinket a WRF modell által szolgáltatott előrejelzésekkel hasonlítottuk össze. Az eredmények alapján kapott következtetések az alábbiak.

Előzetes eredmények

A hőmérséklet a földfelszín fölött körülbelül 300 m magasságon volt a minimális (–3 fok körül), ettől a szinttől mind felfelé (inverzió), mind lefelé távolodva magasabb hőmérséklet mérhető. Bár a modell ezt a sajátosságát visszaadta, értékében kissé alulbecsülte a hőmérsékleti gradienseket. A hőmérsékleti adatok bizonyos késéssel követték a gyorsan emelkedő repülőgépet körülvevő környezet változó hőmérsékletét. Az átlagolásból adódóan hiszterézis figyelhető meg

a vertikális profil tekintetében (11. ábra felső panel). Emellett a változó magasságon mért változó hőmérséklet időben exponenciálisan igazodik a magassággal változó környezeti kényszerhez (11. ábra alsó panel). Az időbeli meneten ezenkívül megfigyelhető egy körülbelül egy fokos periodikus ingadozás is, mely tisztán a repülési irány függvénye, és mely déli irányon emelkedő, északi irányon csökkenő, kelet-nyugati irányokon stagnáló hibatagot ad a méréshez. Ez utóbbi, a napsugárzás hatására bekövetkező hiba a második repülés végén már nem jelentkezett, ami nem is meglepő, hiszen a közeledő front felhőzete ekkor már leárnyékolta a Dunakeszi repülőtér térségét.



11. ábra A 2012. december 06. "Mikulás-napi" első repülés során mért hőmérséklet vertikális menete és a WRF modell által előrejelzett értékei (felső panel), valamint a magasság (piros görbe) és a hőmérséklet (kék görbe) időbeli menete (alsó panel). A felső panelen a mért hőmérsékleti görbe színezése a felszállástól számított idő percben (skála az ábra jobb oldalán)

A sugárzás hatására fellépő hibák a szenzor árnyékolásával, a hiszterézis hiba megfelelően gyors szenzor és megfelelően megválasztott átlagolási időtartam alkalmazásával kerülhetőek el a későbbiekben.

ÖSSZEFOGLALÁS ÉS TOVÁBBI TERVEK

A pilóta nélküli repülések meteorológiai biztosítására dinamikus és statisztikus modellek segítségével készült előrejelzések egyesítésének előkészítéseként, dinamikai modell-fejlesztés történt. A modell fejlesztése magában foglalta a feladat céljaira optimalizált modell tartomány és vertikális/horizontális diszkretizáció kialakítását. A modell parametrizációs beállításait egy 30 tagú modell ensemble együttes 9 tipikus időjárási helyzeten, statisztikai módszerekkel végrehajtott verifikációjával vizsgáltuk. Az utófeldolgozás szintén a repülésmeteorológiai felhasználás céljai szerint lett optimalizálva. A modell kimenő adatainak utófeldolgozását követően, webes felületen keresztül, az adatok felhasználók részére történő továbbítása folyamatosan megvalósul. A kialakított dinamikai modellrendszer egyesítése a statisztikus modell eredményeinek felhasználásával, a származtatott paraméterek előállítása és tesztelése a közeljövő feladata lesz. A meteorológiai rendszer használhatóságát meteorológiai mérések céljára végrehajtott UAV repülésekkel teszteljük. A repülések célja – a módszerfejlesztést szolgáló tapasztalatok visszacsatolása mellett – a modell verifikációja *in-situ* mérésekkel. Az első repülések tapasztalatainak



felhasználásával, a szenzor rendszer turbulencia detektálására alkalmassá tevő fejlesztését követően, 2013. évben tervezzük több tipikus időjárási helyzetben is mérő repülések végrehajtását modell verifikáció céljából.

Köszönetnyilvánítás

A projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával valósul meg a TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KMR-2-11-0001 "Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások" pályázat "Adatintegráció" alprogram "A pilóta nélküli repülő eszközök komplex meteorológiai támogatásának kidolgozása" Kiemelt Kutatási Terület (KKT) keretében.

A mérések során alkalmazott pilóta nélküli repülő eszköz fejlesztése a Tech_08-D5/2-2008-0051 projekt Kutatási és Technológiai Innovációs Alap támogatásával valósult meg.

Az ötlyukú nyomásszenzor fejlesztési munka szakmai tartalma kapcsolódik a „Minőségorientált, összehangolt oktatási és K+F+I stratégia, valamint működési modell kidolgozása a Műegyetemen" valamint az "Új tehetséggondozó programok és kutatások a Műegyetem tudományos műhelyeiben" című projektek szakmai célkitűzéseinek megvalósításához. A projektek megvalósítását a TÁMOP-4.2.1/B-09/11/KMR-2010-0002 és a TÁMOP-4.2.2.B-10/1-2010-0009 programja támogatja.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] GLADE, D. Lt Col, USAF, 2000: Unmanned Aerial Vehicles: Implications for Military Operations. Occasional Paper No. 16. Center for Strategy and Technology Air War College. Air University Maxwell Air Force Base.\
- [2] SPERRY, E.A., 1931: Wireless-Controlled Aerial Torpedo. US Patent Nr. 1.792.937 (filled December 18., 1917).
- [3] KÁRMÁN Tódor és LEE Edson: Örvények és repülők (Kármán Tódor élete és munkássága). Budapest, Akadémiai Kiadó, 1994.
- [4] MAYER, S., SANDVIK, A., JONASSEN, M.O., REUDER, J., 2012: Atmospheric profiling with UAS SUMO: a new perspective for the evaluation of fine-scale atmospheric models. *Met. and Atm. Physics*, Volume 116, Issue 1-2, 15-26.
- [5] HOUSTON, A.L., ARGROW, B., ELSTON, J., LAHOWETZ, J., FREW, E.W. and KENNEDY, P. C., 2012: "The Collaborative Colorado-Nebraska Unmanned Aircraft System Experiment," *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93, No. 1, pp. 39-54.
- [6] STARK, B., COOPMANS, C., CHEN, YQ., 2013: Concept of Operations for Personal Remote Sensing Unmanned Aerial Systems. *Journal of Intelligent&Robotic Systems*, Vol. 69., Issue 1-4, 5-20.
- [7] SÁNDOR, V., WANTUCH, F., 2005: Repülésmeteorológia, tankönyv pilóták és leendő pilóták számára, 2. javított kiadás. Budapest, OMSZ (ICAO), 2007: Meteorological Service for internationale air navigation, chapter 4-6.
- [8] BOTTYÁN, Z., 2011: Estimation of structural icing intensity and geometry of aircrafts during different conditions – a fixed-wing approach. *Időjárás*, Vol. 115., No. 4., 275-288.
- [9] SZILDER, K., MCILWAIN, S., 2011: "In-Flight Icing of UAVs - The Influence of Reynolds Number on the Ice Accretion Process", SAE Technical Paper 2011-01-2572, doi:10.4271/2011-01-2572.
- [10] CATALANO, P., TOGNACCINI, R., 2011: RANS analysis of the low-Reynolds number flow around the SD7003 airfoil. *Aerospace Science and Technology*. Vol.15, Issue 8, 615-626.
- [11] FUCSH, W., SCHICKEL, K.P., 1995: Aircraft icing in visual meteorological conditions below low stratus. *Atm. Research*, 36, 339-345.
- [12] JACOBS, A. J. M., N. MAAT, 2005: Numerical Guidance Methods for Decision Support in Aviation Meteorological Forecasting. *Wea. Forecasting*, 20, 82-100.



-
- [13] STENSRUD, D.J., 2007: *Parametrization Schemes, Key to Understanding Numerical Weather Prediction Models*. Cambridge.
- [14] PIELKE, R.A. sr., 2002: *Mesoscale Meteorological Modeling*. Second Edition. International Geophysics Series. Vol. 78. Academic Press, Elsevier.
- [15] JIMÉNEZ, P.A., GONZÁLEZ-ROUCO, J.F., GARCÍA-BUSTAMANTE, E., NAVARRO, J., MONTÁVEZ, J.P., VILÀ-GUERAU de ARELLANO, J., DUDHIA, J., MUÑOZ-ROLDAN, A. 2010: Surface Wind Regionalization over Complex Terrain: Evaluation and Analysis of a High-Resolution WRF Simulation. *J. Appl. Meteor. Climatol.*, 49, 268–287.
- [16] GILMOUR, I., LEONARD A.S., Roberto BUIZZA, 2001: Linear Regime Duration: Is 24 Hours a Long Time in Synoptic Weather Forecasting?. *J. Atmos. Sci.*, 58, 3525-3539.
- [17] SKAMAROCK, W.C., KLEMP, J.B., DUDHIA, J., GILL, D.O., BARKER, D.M., DUDA, M.G., HUANG, X.-Y., WANG, W., POWERS, J.G., 2008: A Description of the Advanced Research WRF Version 3 NCAR/TN-475+STR, June 2008, NCAR Technical Note.
- [18] WANG, W., BRUYÈRE, C., DUDA, M.G., DUDHIA, J., GILL, D., LIN, H-C., MICHALAKES, J., RIZVI, S. and ZHANG, X., 2009: ARW Version 3 Modeling System User's Guide, July 2009, NCAR MMM Tech. Note.
- [19] JOLLIFFE, I.T. and D.B. STEPHENSON, 2012: *Forecast Verification: A Practitioner's Guide in Atmospheric Science*, Second Edition. University of Exeter, UK.
- [20] WILKS, D.S., 2011: *Statistical methods in the atmospheric sciences (Third edition)*. International Geophysics Series Volume 100, 301-391.
- [21] ARGÜESO, D., HIDALGO-MUÑOZ, J.M., GÁMIZ-FORTIS, S.R., ESTEBAN-PARRA, M.J., DUDHIA, J., YOLANDA CASTRO-DÍEZ, 2011: Evaluation of WRF Parameterizations for Climate Studies over Southern Spain Using a Multistep Regionalization. *J. Climate*, 24, 5633–5651.
- [22] BRETHERTON, C. S., and S. PARK, 2009: A new moist turbulence parameterization in the Community Atmosphere Model. *J. Climate*, 22, 3422-3448.
- [23] HONG, S.-Y., J. DUDHIA, and S.-H. CHEN, 2004: A Revised Approach to Ice Microphysical Processes for the Bulk Parameterization of Clouds and Precipitation, *Mon. Wea. Rev.*, 132, 103–120.
- [24] KAIN, J. S., 2004: The Kain-Fritsch convective parameterization: An update. *J. Appl. Meteor.*, 43, 170–181.
- [25] JANJIC, Z. I., 2002: Nonsingular Implementation of the Mellor–Yamada Level 2.5 Scheme in the NCEP Meso model, NCEP Office Note, No. 437, 61 pp.
- [26] KAZI, K. 2012: Full Automatic UAV System Developed in Hungary. *Repüléstudományi Közlemények. Repüléstudományi Konferencia 2012. XXIV. 2012/2*.
- [27] TROPEA, C., A. L. YARIN, John F. FOSS: *Springer Handbook of Experimental Fluid Mechanics*, Springer, 2007
- [28] van den KROONENBERG, A, T MARTIN, M. BUSCHMANN, J. BANGE, Pe. VÖRSMANN, 2008: Measuring the Wind Vector Using the Autonomous Mini Aerial Vehicle M2AV. *J. Atmos. Oceanic Technol.*, 25, 1969–1982.