

Szabó Zoltán¹ – Istenes Zoltán² – Gyöngyösi András Zénó³ –
Bottyán Zsolt⁴ – Weidinger Tamás⁵ – Balczó Márton⁶

A PLANETÁRIS HATÁRRÉTEG SZONDÁZÁSA PILÓTANÉLKÜLI REPÜLŐ ESZKÖZZEL (UAV⁷)⁸

A planetáris határréteg (PHR) időjárási viszonyainak ismerete kiemelten fontos területe a repülésmeteorológiának, hiszen számos olyan szignifikáns időjárási jelenség zajlik e rétegben, ami potenciális veszélyt jelent a légi közlekedés számára. A PHR vizsgálatára alkalmas eszközök használata azonban térben és időben is korlátozott. A pilóta nélküli repülő eszközök (UAV) elterjedésével egy új lehetőség jelent meg a meteorológiai mérésekben. Tanulmányunkban a BHE Bonn Hungary Electronics ltd. által tervezett és üzemeltetett BXAP15 típusú pilóta nélküli repülőgéppel végzett meteorológiai mérések módszerét és előzetes eredményeit mutatjuk be.

SOUNDING THE PLANETARY BOUNDARY LAYER WITH UNMANNED AERIAL VEHICLES (UAV)

The knowledge of the meteorological conditions of the planetary boundary layer (PBL) has an important role in avianational meteorology according to the significant processes passes in this layer. These processes could be a potential hazard to aviation. However the tools for sounding the PBL are limited in time and space as well. With the evolution of unmanned aerial vehicles, a new tool appeared in meteorological measurements which are used widely. In our study we represent the methods and preliminary results of the soundings measured by the BXAP15 type UAV designed and operated by BHE Bonn Hungary Electronics ltd.

BEVEZETÉS

A PHR meteorológiai viszonyainak pontos ismerete kiemelten fontos a repülésmeteorológiában, hiszen itt történik a fel- és a leszállás. E réteg szélviszonyai, hőmérsékleti rétegződése (szélnyírás, turbulencia, oldalszél), a hidrometeorok (látástávolság romlás, csapadék, jegesedés) mind-mind hatással vannak a repülés biztonságára [1]. A határréteg folyamatainak parametrizációja és 3D numerikus modellekkel történő előrejelzése folyamatosan fejlődik, ugyanakkor egyes lokális jelenségek – turbulencia, szélrohamok, PHR vastagság, inverziós réteg, alacsony szintű jet [2] – leírása még mindig pontatlan. Bár több távérzékelési módszer is létezik az alsó troposzféra monitorozására, ezek általában helyhez kötöttek, illetve operatív üzemeltetésük nem minden helyzetben gazdaságos [3]. A pilótanélküli repülőgépek elterjedésével

¹ meteorológus MSc hallgató, ELTE Meteorológiai Tanszék, szabo.z.attila@gmail.com

² tanszékvezető egyetemi docens, ELTE Informatikai Kar Programozáselmélet és Szoftvertchnológiai Tanszék, istenes@inf.elte.hu

³ meteorológus, ELTE Meteorológiai Tanszék, zeno@nimbus.elte.hu

⁴ százados, egyetemi docens, NKE Katonai Repülő Tanszék, bottyan.zsolt@uni-nke.hu

⁵ egyetemi docens, ELTE Meteorológiai Tanszék, weidi@caesar.elte.hu

⁶ tudományos segédmunkatárs BME Áramlástan Tanszék Kármán Tódor Szélcatorna Laboratórium, balczo@ara.bme.hu

⁷ Unmanned Aerial Vehicle – Pilótanélküli Repülő Eszköz

⁸ Lektorálta: Bíróné Dr. Kircsi Andrea, egyetemi adjunktus, Debreceni Egyetem Meteorológiai Tanszék, kircsi.andrea@science.unideb.hu

e nehézségek leküzdésére nyílt egy új lehetőség, így az UAV-k meteorológiai célra történő felhasználása széles körben elterjedt. Munkánkban egy olyan UAV prototípusnak a fejlesztését mutatjuk be, amelynek fontos szerep jut az általunk fejlesztendő komplex meteorológiai támogatás során nyújtott prognózisok (pl. az UAV felhasználók számára) verifikálásában is. Az ilyen meteorológiai célú UAV-k segítségével mind a dinamikus, mind a statisztikus modellek által előállított előrejelzések könnyen ellenőrizhetőek 3D-ban, különös tekintettel a PHR-ben zajló folyamatokra. A tanulmányban bemutatott BXAP15 típusú pilótánélküli repülőgéppel történő mérésekhez használt szenzorrendszer kiválasztásánál, a mérési program tervezésénél, és az adatgyűjtő fejlesztésénél (memóriaigény, programozhatóság, bővíthetőség) a Bergeni Egyetem Geográfiai Intézetében kifejlesztett pilótánélküli modellrepülő (SUMO) és a Braunschweigi Egyetemen épített Mini-UAV (M2AV) szolgált mintául. [4][5][6].

A cikkben bemutatjuk az általunk használt UAV tulajdonságait, a meteorológiai mérőrendszer építésének kezdeti lépéseit. Ismertetjük az első tesztrepülések eredményeit, a mérések során felmerült problémákat, nyitott kérdéseket.

A MÉRÉSEKHEZ HASZNÁLT UAV

A méréseket a BHE Bonn Hungary Electronics Ltd. [7] által tervezett és üzemeltetett BXAP15 típusú pilóta nélküli repülőgéppel végezzük (1. ábra). A gép általános specifikációja a következő:

- szárnyfesztávolság: 3,7 m;
- hossz: 1,7 m;
- maximális felszálló súly: 17 kg;
- hasznos teher: 3 kg;
- meghajtás: elektromos Brushless motor 1200 W csúcsteljesítménnyel;
- utazósebessége: 60–100 km/h (IAS⁹);
- maximális repülési magassága: 3000 m feletti (AGL¹⁰);
- üzemidő teljes akkumulátor töltöttséggel: ~90 perc;
- hatótávolság: (domborzati viszonyoktól függően) 10–20 km.

Habár az elektromos meghajtás erősen korlátozza a repülési időtartamot, a meteorológiai mérések szempontjából előnyös, hiszen a hőtermelése kisebb, mint a robbanómotoroké, így kisebb valószínűséggel zavarja a méréseket, ráadásul a rezgése is alacsonyabb fokú, ezért a fedélzeten elhelyezett gyorsulásmérők hibája is csökkenthető.

A felszállás egyaránt történhet kézi indítással vagy csörlő segítségével földről indítva. Röviddel a felszállás után a repülés előre meghatározott GPS koordináták szerint, robotpilótával történik, de szükség esetén bármikor át lehet térni kézi vezérlésre is. A leszállást általában kézi irányítással végzik. Az UAV távvezérlése kétirányú mikrohullámú kapcsolaton keresztül történik, ami egy GPS vezérelt, gépkövető földi adóból és egy fedélzeti egységből áll.

⁹ IAS (Indicated Air Speed): a torlónyomásból számolt műszer szerinti, levegőhöz viszonyított sebesség

¹⁰ AGL (Above Ground Level): Felszínhez viszonyított magasság



1. ábra Az UAV orr része a műszerekkel (bal oldalon a Vaisala HMP45 hőmérséklet és légnedvesség szenzor, a szárnyon a GPS vevőegység

Mivel a repülés előre meghatározott fordulópontok érintésével történik, így az egyenletes körpályán történő repülés nem megoldott automatikus üzemmódban. Nem lehetséges továbbá semmilyen levegőhöz rögzített koordináta rendszerben megválasztott pályán történő repülés sem. Ez jelentős korlátozást jelent a szél mérés egyes módszereinél.

MÉRÉSI CÉLOK

Az első sikeres tesztrepülést követően elkezdődhetett a meteorológiai műszer-együttes kiépítése. Elsődleges feladat a planetáris határreteg, illetve a troposzféra – az UAV aktuális meteorológiai körülmények között lehetséges maximális repülési magasságig történő – általános szondázása. A repülés során a léghőmérséklet és relatív nedvesség mérése, valamint a mért GPS koordinátákból számolt földhöz és a levegőhöz viszonyított sebességből a szélprofil meghatározása a cél.

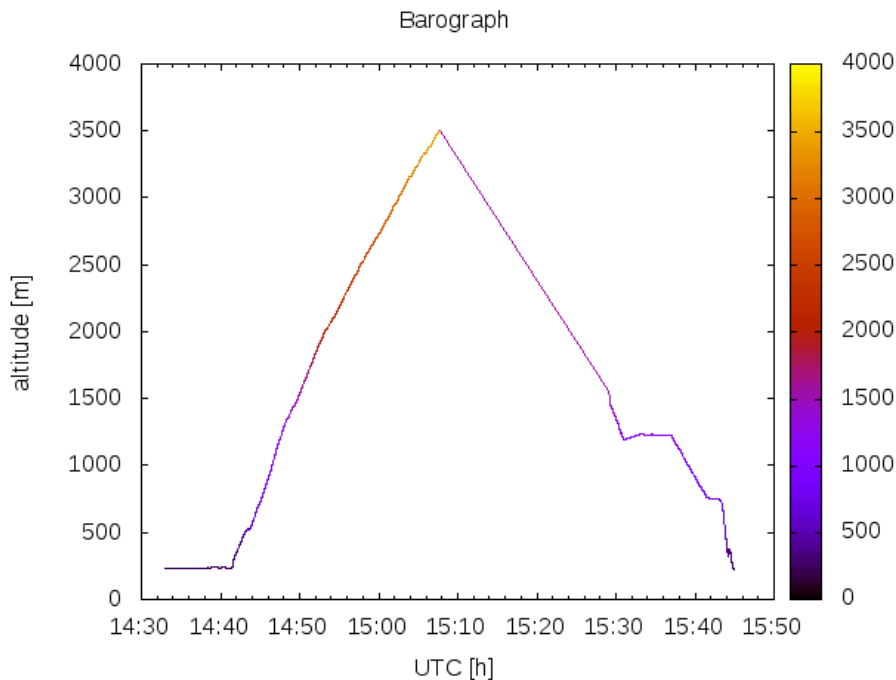
A távolabbi tervek közt szerepel a planetáris határreteg turbulens folyamatainak és áramlási rendszerének a vizsgálata. Ehhez a BME Áramlástan Tanszékén fejlesztett 5 lyukú anemométer (továbbiakban 5HP¹¹) és egy nagyfrekvenciás termoelemes hőmérő kerül majd elhelyezésre a fedélzeten (impulzus és szenzibilis hőáram mérés) [2]. A későbbi tervekben levegőkörnyezeti mérések is szerepelnek (CO₂, O₃ és aeroszol (PM₁₀)¹² koncentráció monitorozása). Bár az UAV vezérlő rendszerében megtalálható a GPS, és az IMU¹³ szenzor, továbbá a valós szélesség (TAS¹⁴) meghatározásához szükséges Pitot-cső, a cél egy teljesen autonóm meteorológiai mérőrendszer kialakítása, így ezek az egységek is telepítésre kerülnek (a végleges műszer-együttes kiépítése folyamatban van).

¹¹ 5HP (Five Hole Probe): 5 lyukú nyomásmérő szenzor

¹² PM10 (Particulate Matter <10 μm): 10 μm-nél kisebb méretű légköri aeroszol részecskék koncentrációja

¹³ IMU (Inertial Measurement Unit): Inerciális gyorsulásmérő egység

¹⁴ TAS (True Air Speed): A repülőgép levegőhöz viszonyított tényleges sebessége



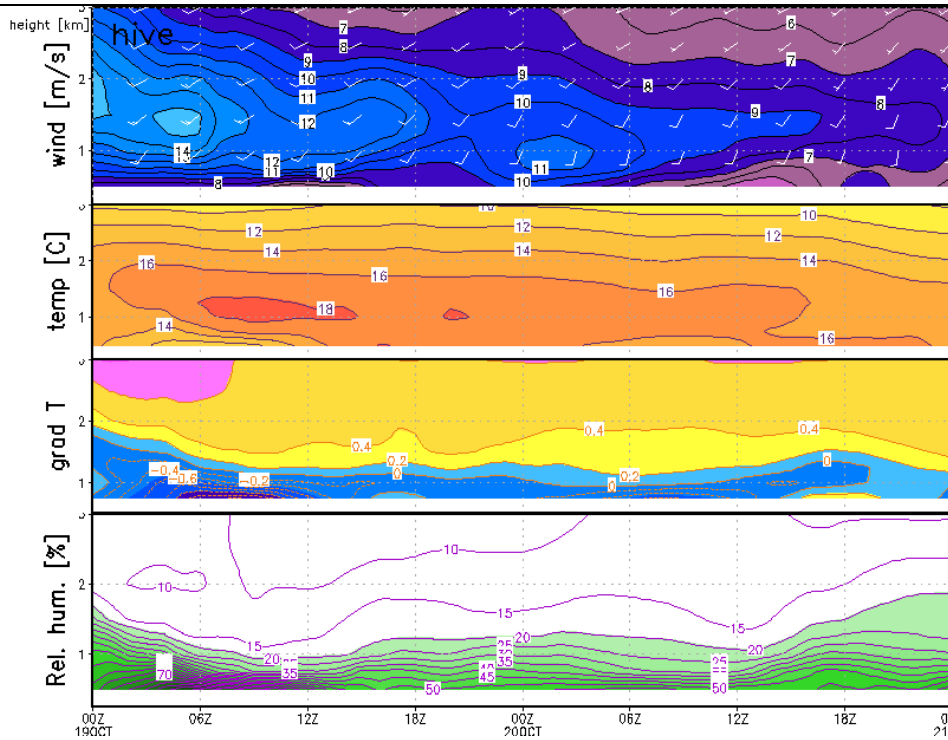
3. ábra Az UAV magassága az idő függvényében 2012. október 19-én. A magasság színezéssel is jelölve lett. (A színezés az adott nap 00Z-tól vett relatív idő szerint történt.) 15:05 UTC és 15:25UTC közt GPS adatkiesés történt, amit az ábrán egy lineáris interpolációs szakasz jelez

Az előrejelzett értékeket a mérés után összevetettük az UAV mérési adataival. A következőkben a tesztrepülés kiértékelésével foglalkozunk. Elsőként az időjárási helyzetet elemezzük.

Az időjárási helyzet alakulása 2012. október 19-én, a mérés idején

2012. október 19-én egy hazánktól délkelet felé távolodó anticiklon hátoldali áramlási mezejében voltunk, melynek hatása a talajszinten kevésbé érződött, de a magasban markánsan jelen volt. Amíg a felszín közelében gyenge délkeleti szél dominált és országszerte 50–60%-os relatív páratartalmat regisztráltak, addig gyakorlatilag már a 925 hPa-os nyomási szinttől kezdve erős délnyugati áramlás volt a jellemző, amelyhez az 1000–1500 m-es rétegben egy erős meleg advekciónak társult, jelentős kiszáradással. Ezt az WRF modell aznapi 0:00 UTC-s futása is jelezte. A modell 15:00 UTC-re 18 °C-ot várt az 1000 m-es magassági szintre (4. ábra). Ezzel együtt erős kiszáradást is jelzett a modell 1000 m felett, közel 10%-os relatív nedvesség értékekkel. A szélmaximum 1000 m és 1800 m közt jelentkezett 15:00 UTC-kor 12 m/s-os maximummal.

Az aktuális időjárási helyzet ideális volt a repülés és a vertikális szondázás szempontjából, hiszen a lehetséges maximális repülési magasságon belül jelentős eltérések voltak a légkör vertikális szerkezetében, emellett a rendelkezésre álló nagy térbeli felbontású WRF modelldatok alapján (a mért és modellezett adatok összehasonlításával) lehetőség nyílt a Vaisala szenzor érzékenységi és válaszügyének a vizsgálatára is.

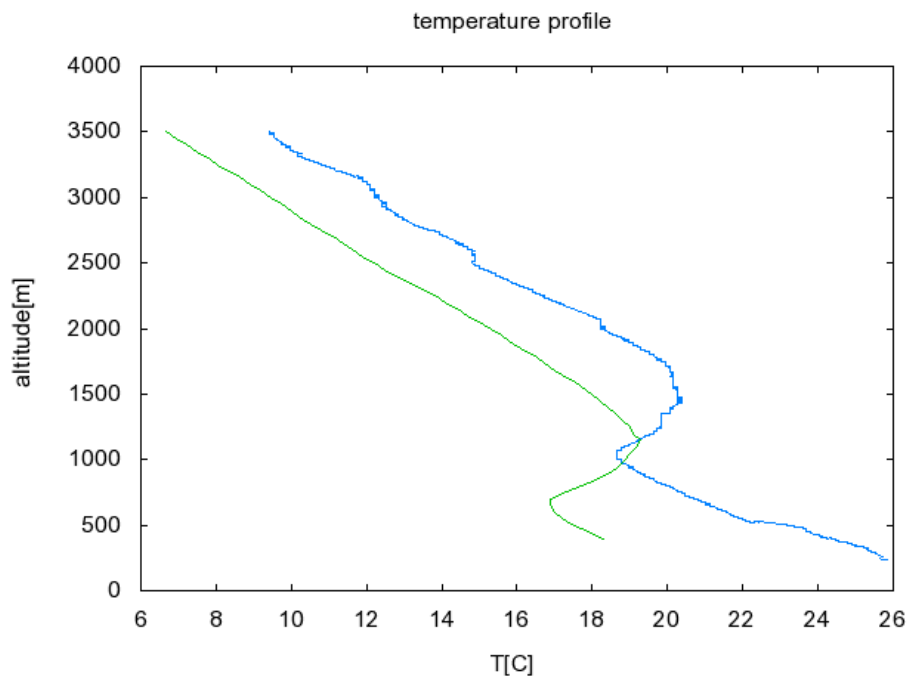


4. ábra Az ELTE Meteorológiai Tanszéken futtatott WRF modell adatokból készült meteogram a repülési napra és másnapra, Várpalotára (2012. október 19–20.). Az UAV 14:41 UTC-kor szállt fel

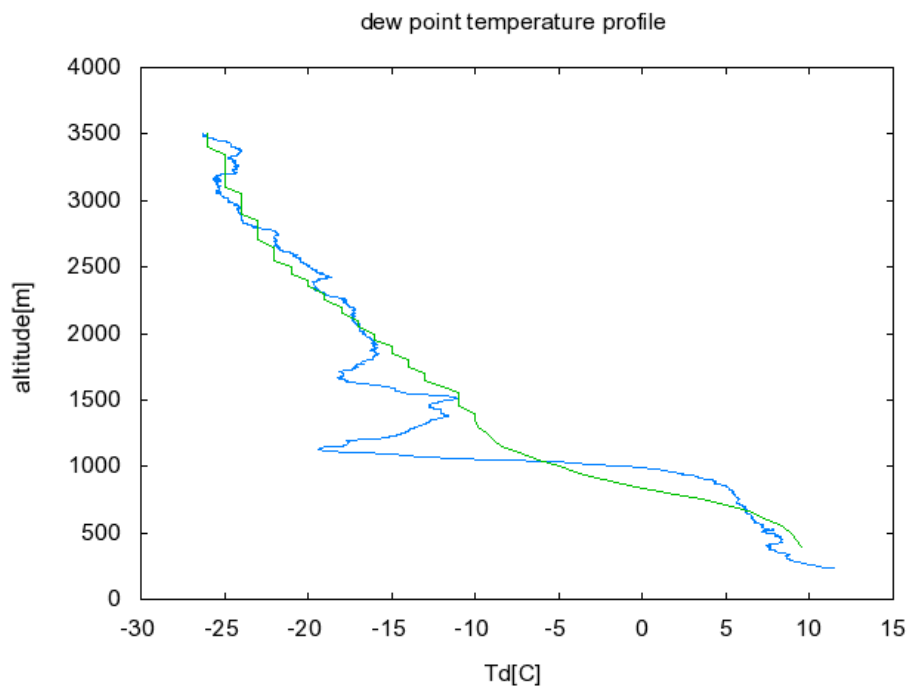
Mért profilok (2012.10.19.)

A mérés során egy Vaisala HMP45 típusú hőmérséklet-relatív nedvesség szenzor szolgáltatja az adatokat, 1 Hz-es felbontással. A hőmérséklet és a relatív nedvesség értékeinél 10 másodperces intervallumok átlagát képezve kerültek az adatok tárolásra. Mivel a WRF modell harmatpont hőmérsékletet használ nedvességi mérőszámként, így a mért hőmérséklet és relatív nedvességi adatok a Magnus-Tetens formula segítségével harmatpont hőmérsékletre lettek konvertálva. A profilok megrajzolásánál az emelkedéskor mért adatok kerültek felhasználásra, a felszín és a 3500 m-es magasság közt. Az 5. és 6. ábrán a Várpalotára 15:00 UTC-re előrejelzett hőmérséklet és harmatpont hőmérséklet profilok zölddel, míg az UAV által mért profilok kék színnel jelölve láthatóak.

A mért és az előrejelzett értékek közt közel 2 °C-os szisztematikus eltérést figyelhetünk meg, melynek oka feltehetőleg a műszerezettségben keresendő. A mért harmatpont hőmérséklet értékek a hőmérsékleti értékekkel ellentétben szoros kapcsolatot mutatnak a modell eredményekkel. Az 1500 m feletti szinteken a modell által számított értékek kerekítve kerültek kiírásra, ezért kisebb ugrások figyelhetőek meg a profilon, amelyek azonban nem haladják meg az 1 °C-ot. Ezek a kiírás pontosításával eltűnnek.



5. ábra A WRF modell által előrejelzett (zöld) és a mért (kék) hőmérsékleti profilok a 2012. október 19-i repüléskor



6. ábra A WRF modell által előrejelzett (zöld) és a mért (kék) harmatpont-hőmérsékleti profilok a 2012. október 19-i repüléskor

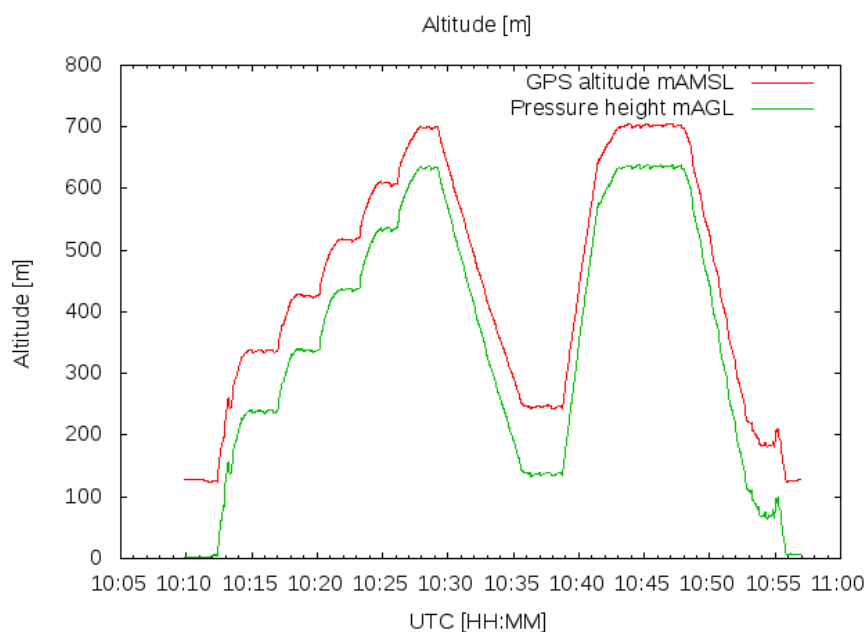
Összességében megállapítható, hogy az 1000 m felett advektálódó száraz és meleg légtömeget a WRF modell jól előrejelezte, amit az UAV mérések is megerősítettek. Az UAV-val mért profilokon – a 2 m-es vertikális felbontásnak köszönhetően – olyan finom részecskék is megfigyelhetők, amelyeket a modell nem tud előre jelezni, mint például az 1000 m-es és az 1700 m-es

magasságban jelentkező extrém kiszáradást, holott a harmatpont hőmérséklet mindkét esetben megközelítette illetve elérte a $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot. Megjegyezzük, hogy a nagy időbeli felbontás ellenére a szenzor tehetetlensége miatt a következtetések levonásánál óvatosnak kell lenni. A közeli jövő feladata a repülőgépre elhelyezett szenzorok tehetetlenségének a kimérése eltérő repülési pályákat és emelkedési sebességeket alkalmazva.

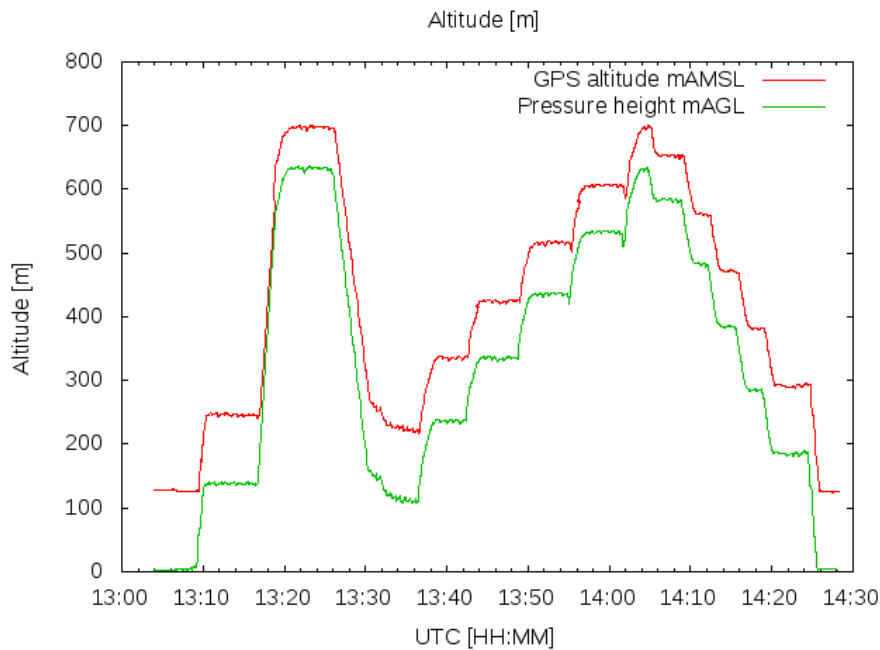
A mért értékek alapján a planetáris határréteg magassága meghaladta a vártat. A WRF modell 500 m-es magasságtól kezdve közel lineáris kiszáradást várt egészen az 1300 m-es szintig. Ezzel szemben a mérések szerint a relatív nedvesség (és így a harmatpont hőmérséklete is) közel 1000 m-es magasságig gyenge csökkenést mutatott, majd 1000 m felett hirtelen ugrást és további csökkenést tapasztaltunk. Ez feltehetőleg az 1000 m-es magasságig megvastagodó nappali határrétegnek volt köszönhető, hiszen e felett a légtömegek közti keveredés már gyenge.

II. repülés: 2012. december 6.

A második kiértékelt repülésre 2012. 12. 06.-án került sor a dunakeszi repülőtéren. A nap során két felszállás történt. Az első délelőtt 10:05 UTC és 10:55 UTC közt, a második 13:05 UTC és 14:30UTC közt zajlott le. A repülések 700 m-es magasságig történtek melyek során az UAV 100 m-enként egy megközelítőleg 500 m-es élhosszúságú négyzetet repült állandó magasságban (7. és 8. ábra). Az emelkedés és a süllyedés is négyzetes pályán történt.



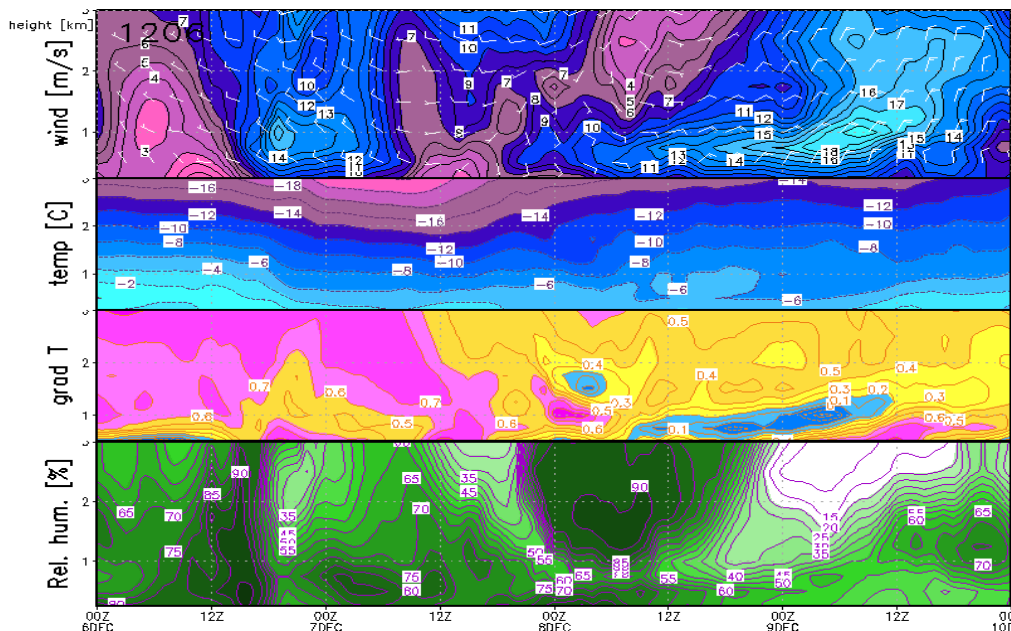
7. ábra Az UAV magassága a délelőtti repülés során 2012. december 6-án. Pirossal a tengerszint feletti magasság míg zölddel a lokális felszín feletti magasság értéke látható



8. ábra Az UAV magassága a délutáni repülés során 2012. december 6-án. Pirossal a tengerszint feletti magasság, míg zölddel a felszín feletti magasság értéke látható

Az időjárási helyzet alakulása a 2012. December 6-i mérés során

2012. december 6-án reggel hazánk időjárását a tőlünk keletre eltávolodott ciklon és a nyugatról közeledő anticiklon köztes áramlási mezeje határozta meg. Az éjszaka folyamán gyenge illetve mérsékelt légmozgás és derült idő mellett, az erős kisugárzás miatt reggelre az ország jelentős részén (főként a középső és keleti területeken) köd képződött.



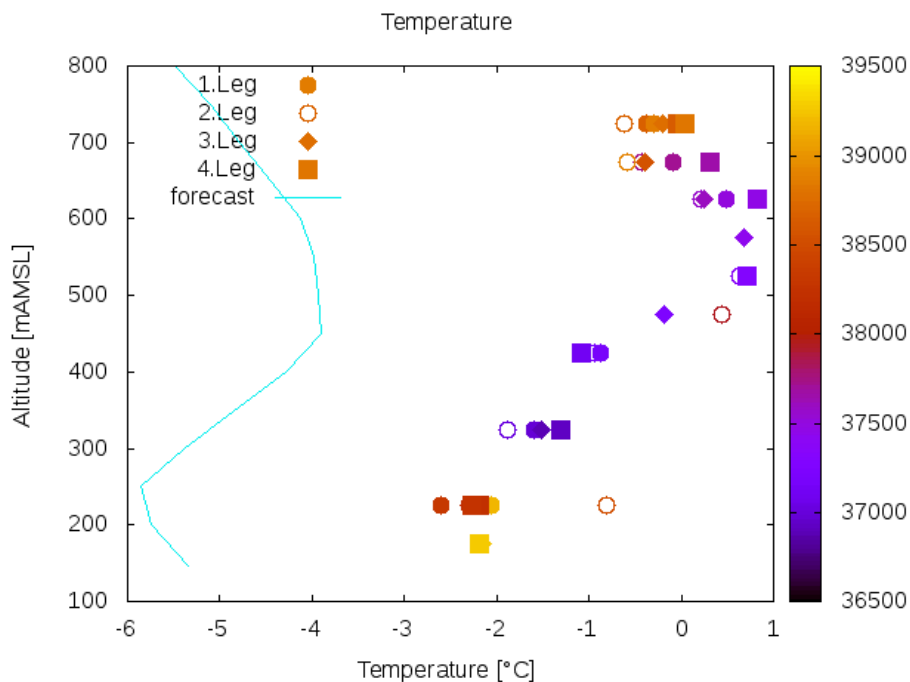
9. ábra. A WRF modell által előrejelzett értékek a 2012. december 6-9. közötti időszakra, Budakeszi térségére. Délelőtt folyamán a nyugatról hazánk felé áthelyeződő anticiklon nyomási mezeje kezdett meghatározóvá válni, aminek következtében az alsó 2000 m-es rétegben is megélnék a nyugati, északnyugati szél. Ennek hatására Dunakeszi térségében is felszakadozott a köd (köszönve ezt a

lokális környezetnek is – orográfia, felszínborítottság), és lehetőség nyílt a repülésre. A repülési és a rákövetkező napokra készített WRF modell előrejelzést a 9. ábra szemlélteti.

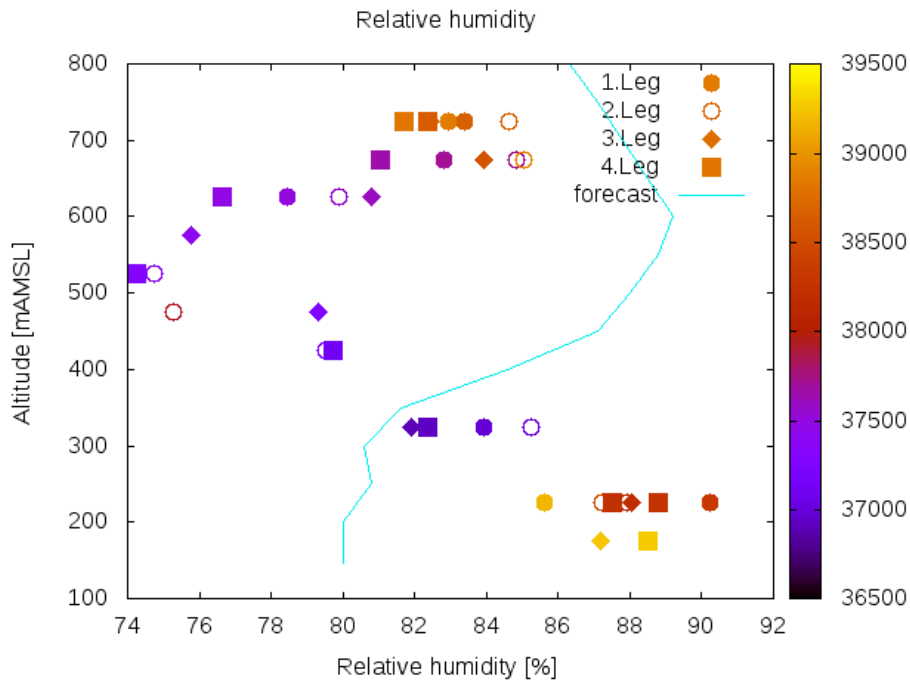
Mért profilok (2012. 12. 06)

A Vaisala műszer válasziége miatt a profilok megrajzolásánál szükségessé vált az adatok szűrése. A kiértékelés során, az egyes pályaszakaszokon mért átlagos hőmérsékletek között 1°C körüli periodikus hiba figyelhető meg. Ennek oka a műszert és a repülőt ért direkt sugárzás periodikus váltakozása volt. A következő méréskor már egy árnyékoló csövet használunk. A hőmérséklet és relatív nedvesség adatok szűrésének első lépéseként kiválogatásra kerültek azok az időszakok, amikor az UAV közel vízszintesen repült. Ezzel a műszer hiszteréziséből adódó hibákat sikerült csökkenteni. Második lépésként az egyes szakaszokon (a négyszögek egyes szárain) mért értékek átlagolására került sor.

A bemutatásra kerülő profilokon különböző szimbólumokkal jelöltük az egyes szakaszokon mért értékeket. A négyzeteket pozitív forgásirányban repültük. Az 1-es szakasz (1. Leg) a Dél-Észak, a 2. (2. Leg) a Kelet-Nyugat, a 3. (3. Leg) az Észak-Dél, míg a 4. (4. Leg) a Nyugat-Kelet irányú repülést jelenti. Megemlítjük, hogy az egyes szakaszok iránya nem azonos az UAV aktuális irány-szögével (heading). Az ábrán a folytonos vonal az előrejelzett profilt mutatja.



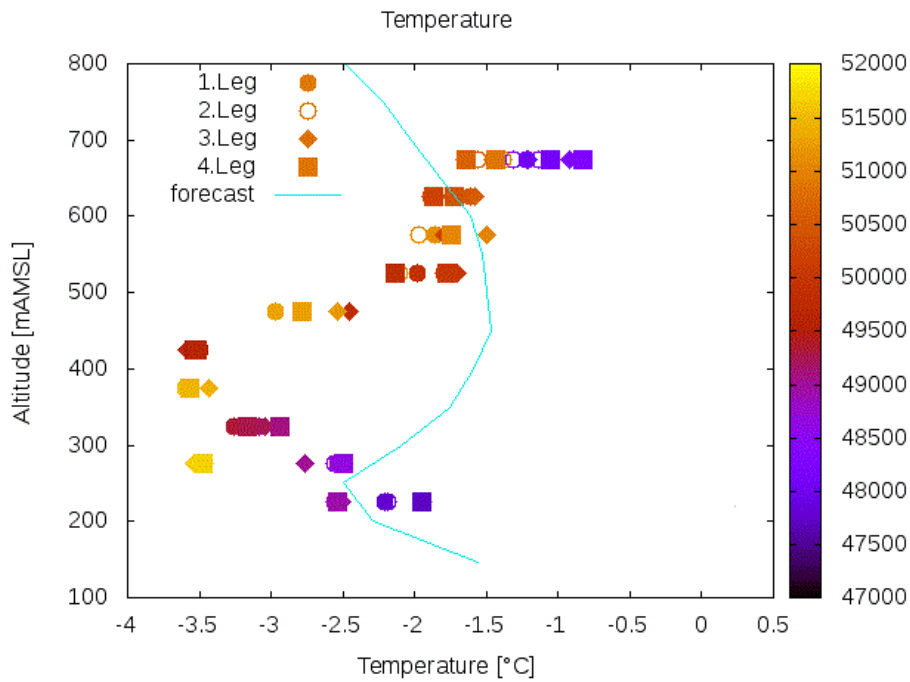
10. ábra 2012. december 6-án délelőtt mért és előrejelzett (folytonos vonal) hőmérsékleti profilok. Az egyes szimbólumok az adott pályaszakaszokat jelölik. A jelek az adott nap 00Z-hoz viszonyított relatív idő (s) szerint színezésre kerültek. A mért és a modellezett profilok futása hasonló, de eltérésük jelentős, ami a bonyolult időjárási helyzetnek is köszönhető (köd, bizonytalan felhőzeti és sugárzási előrejelzés)



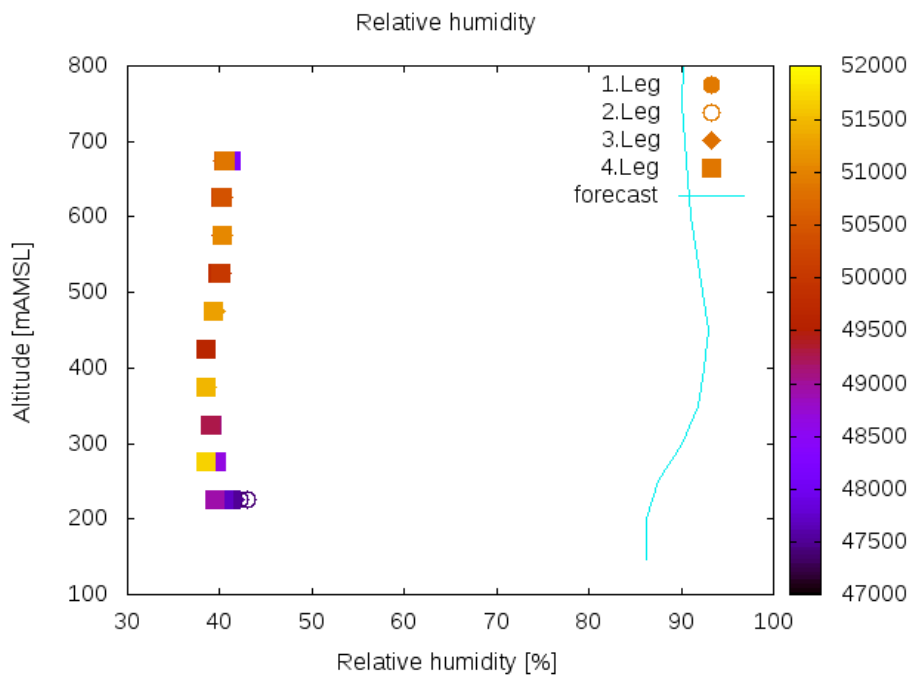
11. ábra A 2012. december 6-án délelőtt mért és előrejelzett (folytonos vonal) relatív páratartalom profilok. Az egyes szimbólumok az adott pályaszakaszokat jelölik. A jelek az adott nap 00Z-hoz viszonyított relatív idő (s) szerint színezésre kerültek

A hőmérsékleti profil (10. ábra) menetében jó egyezést mutat az előrejelzettel, azonban az egyes szinteken közel 3 °C-os pozitív eltérés tapasztalható. Érdeemes megemlíteni, hogy a köd feloszlása után több mint egy órával, a zavartalan besugárzás ellenére is inverziós maradt a hőmérsékleti profil az alsó 600 m-es rétegben a délelőtti repülés során. A relatív nedvesség értékek esetében (11. ábra) nem tapasztalható a hőmérsékleti profilhoz hasonló egyezés. Amíg az előrejelzett profil menete tartósabb, a talaj közelében kiszáradó inverziós profilra emlékeztet, addig a mért profil egy 500–600 m közti kiszáradást mutat. A mért értékekből arra lehet következtetni, hogy a köd feloszlását nem a megerősödő szél miatti átkeveredés, hanem a Pilisen és a Budai-hegységen átbukó szél gyenge fön hatásából eredő kiszáradás okozhatta.

A délutáni repülés során a nyugatias áramlás tovább erősödött az alsó rétegekben. A nedvesség advekciónak köszönhetően a repülés második felében megnövekedett a középszintű réteges felhőzet. Ennek hatása elsősorban a mért hőmérsékleti értékeknél figyelhető meg. A délutáni repülés második felében a felhőzet növekedése és így a direkt sugárzás csökkenése (illetve nulla volta miatt) az egyes szárazon mért hőmérsékleti értékek közti eltérés közel nullára csökkent. (Az ábránkon a színezés az adott nap 00Z-től vett relatív idő szerint történt.) A délutáni mérés idejére a növekvő globálsugárzás következtében az inverzió alja ~400 m-es magassáig emelkedett (12. ábra).



12. ábra. 2012. december 6-án délután mért és előrejelzett (folytonos vonal) hőmérsékleti profilok. Az egyes szimbólumok az adott pályaszakaszokat jelölik. A jelek az adott nap 00Z-hoz viszonyított relatív idő (s) szerint kerültek színezésre



13. ábra 2012. december 6-án délután mért és előrejelzett (folytonos vonal) relatív nedvesség profilok. Az egyes szimbólumok az adott pályaszakaszokat jelölik. A jelek az adott nap 00Z-hoz viszonyított relatív idő (s) szerint színezésre kerültek

Az 13. ábrán látható, hogy a WRF modell által 15UTC-re előre jelzett és a mért relatív nedvesség értékek közt jelentős eltérés volt. Ennek oka feltehetőleg abban keresendő, hogy a modell az alsó 3 km-es rétegben a valóságnál nagyobb nedvességtartalmú levegő advekciónak várta,

ugyanakkor a növekvő turbulens átkeveredés miatt a magassággal alig változó, magas relatív nedvességet jelzett előre.

A mért értékek szerint az átkeveredés valóban megtörtént, azonban az alacsony szinten a vártnál jóval szárazabb levegő érkezett az anticiklon előoldalán.

ÖSSZEFOGLALÁS

Az UAV-k fejlődésével és elterjedésével lehetőség nyílt meteorológiai célú felhasználásukra is. Az UAV-k jelentős előnye a távérzékelési eszközökhöz képest a mobilitásuk és térbeli felbontásuk, továbbá a közvetett mérésből adódó hibák kiküszöbölése. Egyes meteorológiai tényezők, mint például a hőmérséklet, relatív nedvesség repülőgépes mérése viszonylag könnyen megoldható, azonban az ilyen méréseknél is szükséges a felszíni mérésektől eltérő körülményekből adódó hatások kiküszöbölése, melyre még nincs általánosan elfogadott módszer. Az UAV-s szélméréseknél mind a műszerezettség, mind a szélbecslési módszerek jóval összetettebbek, mint a felszíni állomásokon. Összességében elmondható, hogy az UAV-k segítségével történő meteorológiai mérések, kiforratlanságuk ellenére, hasznos eszközei az időjárás felderítésnek, kiegészítve a jelenleg operatívan használt távérzékelési eszközöket. fontos szerepük lehet a modell-produktumok verifikációjában is. A cikkben bemutattunk a hazai fejlesztésű UAV-ra helyezett Vaisala HMP45 hőmérséklet és relatív nedvesség szenzorral mért profilokat, és összevetettük azokat az előrejelzett értékekkel. Foglalkoztunk az UAV-val történő szondázás hibalehetőségeivel és azok szűrésével is.



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

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] JACOBS, A.J.M. and MAAT, N., 2005: Numerical guidance methods for decision support in aviation meteorological forecasting. *Wea. Forecasting* 20, 82–100.
- [2] MARTIN, S., BANGE, J. and BEYRICH, F., 2011: Meteorological profiling of the lower troposphere using the research UAV “M2AV Carolo”. *Atmos. Meas. Tech.* 4, 705–716.
- [3] KADYGROV, E.N. (editor), 2006: Operational aspects of different ground-based remote sensing observing techniques for vertical profiling of temperature, wind humidity and cloud structure: a review. Instruments and Observing Methods Report No. 89, WMO/TD-No. 1309, 33 pp.
- [4] MAYER, S., 2011: Application and improvement of the Unmanned Aerial System SUMO for atmospheric boundary layer studies. *Diploma thesis, University of Bergen*.
- [5] REUDER, J., BRISSET, P., JONASSEN, M., MÜLLER, M. and MAYER, S., 2009: The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: A new tool for atmospheric boundary layer research. *Meteorol. Z.* 18(2), 141–147.
- [6] SPIESS, T., BANGE, J., BUSHMANN, M. and VÖRSMANN, P., 2007: First application of the meteorological Mini-UAV ‘M²AV’. *Meteorol. Z.* 16(2), 159–169.
- [7] <http://www.bhe-mw.eu>
- [8] METZGER, S., JUNKERMANN, W., BUTTERBACH-BAHL, K., SCHMID, H.P., and FOKEN, T., 2011: Measuring the 3-D wind vector with a weight-shift microlight aircraft. *Atmos. Meas. Tech. Discuss.* 4 1303–1370.