

*Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar
Meteorológiai Tanszék*

A pilótánélküli repülőgépek meteorológiai alkalmazásai: egy hazai példa

TDK dolgozat



Szabó Zoltán Attila, I. éves Meteorológus MSc hallgató

Témavezetők: *Dr. Weidinger Tamás, egyetemi docens
ELTE Meteorológiai Tanszék*

*Dr. Istenes Zoltán, egyetemi docens
ELTE Informatikai Kar*

*Gyöngyösi András Zénó doktorjelölt
ELTE Meteorológiai Tanszék*

Budapest, 2013

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	3
1. A mérésekhez használt pilótánélküli repülőgép (UAV)	4
2. Mérési célok	6
3. Szélbecslési módszerek, repülési stratégiák.....	7
3.1 Szélmérés négyzetes pályán történő repülés közben	8
3.2 Szélmérés körpályán történő repülés közben.....	11
4. Szélsebesség és turbulencia mérések az 5HP szonda alkalmazásával – elméleti áttekintés	14
4.1 Hidro-termodinamikai korrekciók	24
4.2 Turbulens árammérések az 5HP szonda és egy nagy időbeli felbontású termoelem segítségével	26
5. Mérések és eredmények	27
5.1 Az időjárási helyzet alakulása a 2012 október 19-i mérés idején	29
5.2 Adatfeldolgozás, előállított produktumok	30
6. Összefoglalás	33
Irodalomjegyzék	34

Bevezetés

A repülőgépek meteorológiai mérésekre történő felhasználása a repülés hőskorára nyúlik vissza, és szorosan kapcsolódik a meteorológia a fejlődéséhez. Egészen az első világháborúig szinte kizárólag csak megfigyelésekről beszélhetünk, melyek során a repülést végző pilóták leszállás után, illetve később, a rádiós kommunikáció megjelenésével akár repülés közben is jelentették a tapasztalt meteorológiai jelenségeket, mint például az erős turbulenciát, szelet, vagy akár a géptesten tapasztalható jegesedést. Az elektronikus műszerek, továbbá a rádiós adattovábbítás megjelenése után a rendszeres repülőgépes mérések már nem ütköztek technikai korlátokba, így a mérések tér- és időbeli gyakorisága már csak a mérésekbe bevont repülőgépek számától függött. Napjainkban például az AMDAR¹ rendszer keretében naponta közel 200 000 szél, hőmérsékleti és egyéb adatot (pl. nyomás, magasság) regisztrálnak (Balogh, 2006). Ezek a mérések elengedhetetlenül fontosak egyes modellek bemeneti adataihoz, de felhasználhatóak kész produktumok ellenőrzéséhez – mint például pszeudo tempek – illetve reanalízisek készítésekor. Igény van a légkör olyan területeinek a részletesebb ismeretére is, ahol a hagyományos repülőgépes mérések nem, vagy csak nagy ráfordítással illetve kockázattal alkalmazhatók. Ezek lehetnek olyan helyek, ahol a repülés balesetveszélyes (pl. szélfarmok térsége), vagy nem gazdaságos, illetve könnyen kiváltható UAV² alkalmazásokkal (pl. időjárás-felderítés).

A TDK dolgozatban bemutatom az általunk felhasznált BXAP15 típusú pilótanélküli repülőgépet és a meteorológiai alkalmazását. Részletesen ismertetem a különböző szélbecslési módszereket. Ezek alapozták meg a repülőgépes szenzorrendszer beszerzését és jelenlegi fejlesztését. Bemutatom az első tesztrepülés eredményeit, a mért és a modellezett hőmérsékleti és harmatpont profil összehasonlítását. A repülőgépes szélmérések elindítása a közeli jövő feladata. Önálló feladatom a különböző repülőgépes szélmérések áttekintése, illetve az hőmérsékleti és harmatpont mérések feldolgozása volt. A mért adatokat Bash (Unix-shell) programozási környezetben dolgoztam fel az általam írt eljárásokkal. Az eredményeket Gnuplot programmal jelenítettem meg.

¹ AMDAR (Aircraft Meteorological Data Relay): Repülőgépes meteorológiai adatközlés

² UAV (Unmanned Aerial Vehicle): Pilóta nélküli légi jármű

1. A mérésekhez használt pilótanélküli repülőgép (UAV)

A méréseket a BHE Bonn Hungary Electronics Ltd. (<http://www.bhe-mw.eu>) által tervezett és üzemeltetett BXAP15 típusú pilóta nélküli repülőgéppel végezzük. A gép általános specifikációja a következő:

- szárnyfeszítávolság: 3,7 m,
- hossz: 1,7 m,
- maximális felszálló súly: 17 kg,
- hasznos teher: 3 kg,
- meghajtás: elektromos Brushless motor 1200 W csúcsteljesítménnyel.

A repülőgép teljes akkumulátor töltöttséggel 90 perc folyamatos repülést biztosít. Utazósebessége 60 – 100km/h (IAS^3), a maximális repülési magassága 3000 m feletti (AGL^4). Habár az elektromos meghajtás erősen korlátozza a repülési időtartamot, meteorológiai mérés szempontjából előnyös, hiszen a hőtermelése kisebb mint a robbanómotoroké, így kisebb valószínűséggel zavarja a méréseket, ráadásul a rezgése is alacsonyabb fokú, így a fedélzeten elhelyezett gyorsulásmérők hibája is csökkenthető.



1. ábra. A BXAP15 típusú UAV felszállás előtt (a szerző felvétele).

³ IAS (Indicated Air Speed): a torlónyomásból számolt valós levegőhöz viszonyított sebesség

⁴ AGL (Above Ground Level): Felszínhez mért magasság

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 leszállás kézi irányítással történik. Automatizált repüléskor maximálisan 500 fordulópont jelölhető ki.

Az UAV távvezérlése kétirányú mikrohullámú kapcsolaton keresztül történik, mely egy GPS vezérelt, gépkövető földi adóból és egy fedélzeti egységből áll. Ennek segítségével a horizontális hatótávolság domborzattól függően 10–20 km között változik. Kézi vezérlésnél egy kereskedelmi forgalomban kapható, repülőgép-modell adó-vevő rendszer biztosítja az irányítást, így ekkor a repülés hatótávolsága korlátozott. Természetesen ekkor a hatótávolságot a vizuális irányításból adódó korlátok is megszabják (látni kell a repülőeszközt). Mivel a repülés előre meghatározott fordulópontok érintésével történik, így az egyenletes körpályán történő repülés nem megoldott autopilóta üzemmódban. Nem lehetséges továbbá semmilyen levegőhöz rögzített koordináta rendszerben megválasztott pályán történő repülés sem. Mint ahogy azzal a későbbiekben foglalkozunk, ez jelentős korlátozást jelent a szélmérés egyes módszereinél. *(Ezek a nehézségek egyúttal kijelölik a közeljövő fejlesztési elképzeléseit is.)*

2. Mérési célok

Az első sikeres tesztrepülést követően elkezdődhetett a meteorológiai műszer-együttes kiépítése. Elsődleges feladat a planetáris határréteg, illetve a troposzféra – az UAV aktuális meteorológiai körülmények között lehetséges maximális repülési magasságig történő – általános szondázása, mely során a léghőmérséklet, harmatpont és relatív páratartalom mérése, valamint a mért GPS koordinátákból számolt földhöz és levegőhöz viszonyított sebességekből a szélprofil meghatározása a cél. A dolgozatban az első hőmérséklet és harmatpont profilméréseket mutatjuk be. *(A négyszög pályán történő repülés adataiból történő szélsébség számítás fejlesztés alatt van.)* A távolabbi tervek közt szerepel a planetáris határréteg (PBL) turbulens folyamatainak és áramlási rendszerének a vizsgálata. Ehhez egy a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen fejlesztés alatt álló 5 lyukú anemométer *(továbbiakban 5HP – 5 Hole Probe)* és egy nagyfrekvenciás termoelemes hőmérő kerül majd elhelyezésre a fedélzeten (impulzus és szenzibilis hőáram mérés céljából).

A későbbi tervekben levegőkörnyezeti mérések is szerepelnek (CO_2 és aeroszol (PM_{10}^5) koncentráció monitorozása). Bár az UAV vezérlő rendszerében megtalálható a GPS, és IMU⁶ szenzor, továbbá a valós szélsébség (TAS^7) meghatározásához szükséges Pitot-cső, a cél egy teljesen autonóm meteorológiai mérőrendszer kialakítása, így ezek az egységek is telepítésre kerülnek *(a beszerzés folyamatban van)*.

⁵ PM10 (Particulate Matter <10 μm): 10 μm -nél kisebb átmérőjű légköri aeroszol részecskék koncentrációja

⁶ IMU (Inertial Measurement Unit): Inerciális mérőegység

⁷ TAS (True Air Speed): Valós légsebesség. A repülőgép levegőhöz viszonyított sebessége

3. Szélbecslési módszerek, repülési stratégiák

Az alsó troposzférikus szél pontos ismerete rendkívül fontos a repülésmeteorológiában, továbbá a szennyezőanyag terjedési és a numerikus előrejelző modellek futtatásához és természetesen a szélenergetikai számításokhoz is. A repülőgépes méréseknek kiemelkedő szerepe van a határréteg kutatásokban. A legnagyobb előnyük, más módszerekhez képest a flexibilitásuk. Bár korszerű wind-profilerekkel megoldott a troposféra alsó tartományában is a pontos szélmérés, de ezek a műszerek általában helyhez kötöttek, így nagy térségű, vagy gyakori terepi mérésekre nem alkalmasak.

A repülőgépekkel, gyors haladási sebességüknek köszönhetően bizonyos mérések sokkal gyorsabban elvégezhetőek, mint távérzékeléssel, vagy rádiószondával. Az egyre szélesebb körben alkalmazott UAV-k esetében további előny a gyors alkalmazhatóság, a nagy flexibilitás.

A repülőgépes szélmérés komplex feladat (Axford, 1968; Brown *et al.*, 1983), mely során a repülőgép levegőhöz viszonyított valós sebességének ($\overrightarrow{TAS}$ - True AirSpeed) és a földhöz viszonyított sebességnek ($\overrightarrow{GS}$ - Ground Speed) eltéréséből számolható a szél. A felszín közelében azonban a földhöz viszonyított szélesebesség jóval kisebb, mint a $\overrightarrow{TAS}$, így nagy a mérések bizonytalansága. E hibák kiszűrésével több tanulmány foglalkozik, mint pl Cho *et al.* (2006).

Az UAV repülési tulajdonságait (és ezen keresztül az alkalmazható szélmérési módszereket) nagymértékben befolyásolja az repülőeszköz irányítása. Teljesen manuális, kézi irányítás esetén a repülési manőverek kevésbé korlátozottak, viszont ha az UAV nem rendelkezik valós idejű képet közvetíteni képes kamerával, a repülési, és így a mérési feladatok is, a szabad szemmel belátható térrészen belül maradnak. Ilyen módszerrel nem lehetséges az 1000 m feletti, illetve a nagyobb távolságokba történő repülés. A hatótávolság növelésére az UAV-eket és így a kutatási céllal alkalmazottakat is, robotpilótával látják el. A robotpilótával történő mérésakor az UAV általában előre beprogramozott GPS koordináták szerint repül.

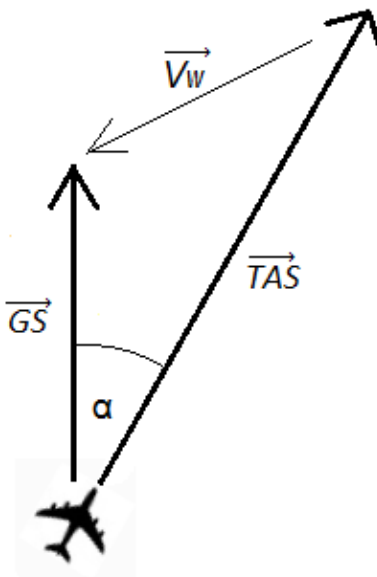
A megadott célpontok száma azonban korlátozott. A kijelölt pontok követésekor a repülőgép két, egymás után következő koordináta közt egyenes vonalon repül. Ennek következtében a földhöz viszonyított szabályos kör repüléséhez nagyon sűrűn kellene a fordulópontokat elhelyezni, ami egyrészt a korlátozott fordulópont kijelölés miatt, másrészt a pontok követésekor tapasztalható tehetetlenség miatt nehézkes. A szabálytalan repülés

következtében a szélmérés bizonytalansága is megnő. Ennek kiküszöbölésére speciális robotpilótákat használnak, vagy a szélmérés során szabályos pl. négyzetes trajektória szerint repülnek.

Tekintettel arra, hogy az általunk használt UAV csak sokszög alakú (*a mi célunknak megfelelően négyszög*) pályán történő repülésre képes, továbbá hogy jelen dolgozat elkészültéig az 5HP turbulencia mérő szenzor még nem került telepítésre, így csak a gép által az irányításhoz használt pitot-cső adatok érhetőek el. (*Írányszög méréssel jelenleg nem rendelkezünk.*)

3.1 Szélmérés négyzetes pályán történő repülés közben

Négyzetes repülési stratégia esetén két eltérő módon is meghatározható a szél. Az egyik módszernél a szél vektor az aktuális irányszög (*heading*) és a földhöz viszonyított sebességvektor iránya közti eltérésből adható meg. A szél vektor ($\vec{V}_w$) a klasszikus szél-háromszög segítségével számítható (2. ábra).

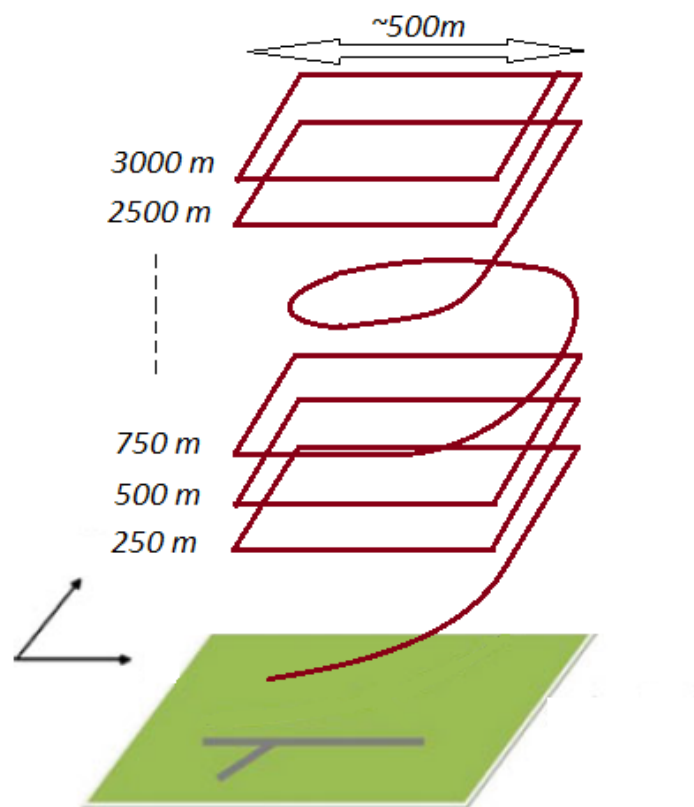


2. ábra. Repülés közben történő szélmeghatározás elve.

A módszer során a GPS koordinátákból számolt földhöz viszonyított sebesség ($\vec{GS}$), a pitot-cső nyomásadataiból származtatott valós szélsebesség ($\vec{TAS}$), továbbá az UAV

irányszög ismerete szükséges. Az repülésben az irányszög 0° és 360° közt változik és az aktuális repülési irányt (égtájat) jelöli: 0° az északi, 90° a keleti, 180° a déli, míg a 270° a nyugati irányt jelöli. Az α sodródási szög az irányszög és a haladási irány ($\vec{GS}$) segítségével számolható.

Tudva, hogy a repülőgép hossz tengelye, és így a pitot-cső is az áramlásra mindig merőlegesen helyezkedik el (*nem tekintve a kis időskálán jelentkező turbulens örvényeket*), a $\vec{TAS}$ valós szélesség iránya azonos az aktuális irányszöggel. Ezt szolgáltatja majd a mágneses irányszög mérő. (Az aktuális irányszög hiányában csak $\vec{TAS}$ nagysága ismert). A $\vec{TAS}$ nagyságának és irányának az ismeretében a földhöz viszonyított szélvektort a $\vec{TAS} - \vec{GS}$ különbség adja meg. Ennél a módszernél a szél már egyetlen vonalon történő repülés esetén is meghatározható, de a lehetséges hibák kiátlagolódása miatt több, egymástól eltérő vonalban történő repülés ajánlott.



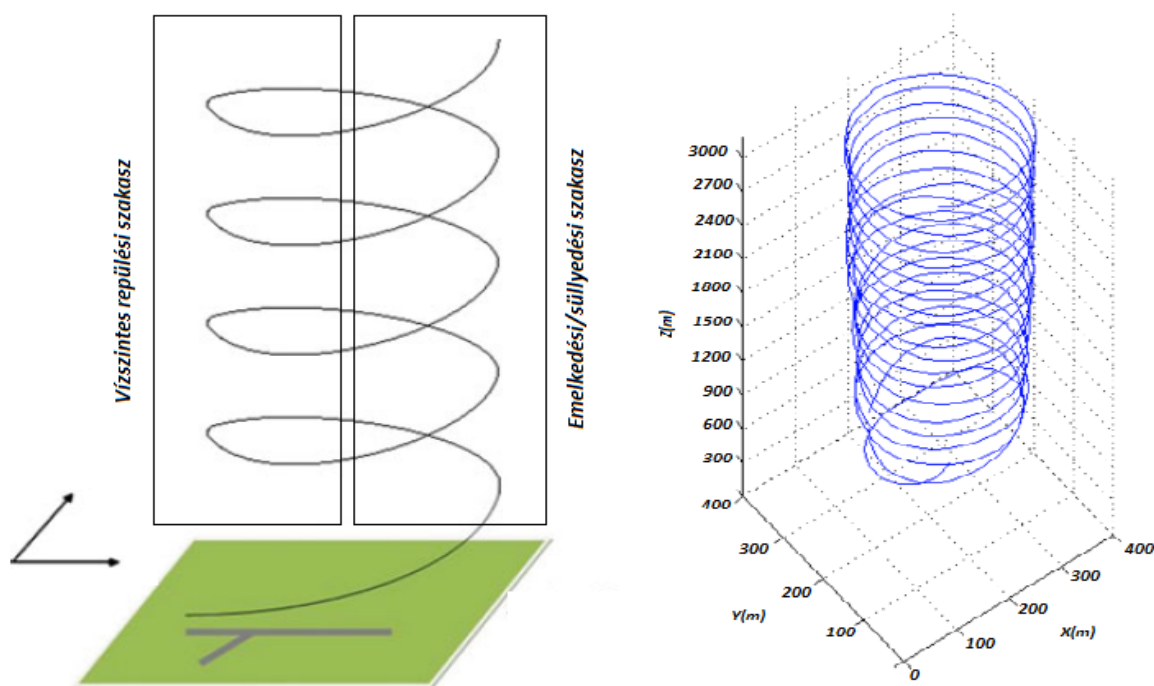
3. ábra. A repülés során minimum $500 \times 500\text{m}$ -es négyzeteket repülve célszerű a mérést végezni. Ennél kisebb oldalhosszok esetében a turbulenciából adódó eltérések jelentős hibát okozhatnak a magasabb szinteken (lásd a 4. fejezetet is).

Amennyiben az UAV nem rendelkezik mágneses irányszög adatokkal, úgy a szél meghatározásához legalább két, egymással szöget bezáró pályán történő repülés szükséges (*ideális esetben egymásra merőleges pályán, 3. ábra*). Az egyes egyenesek mentén történő repülésnél meghatározandó a $\overrightarrow{GS}$ és $\overrightarrow{TAS}$ közti különbség. Az egymásra merőleges pályákon észlelt eltérések egymáshoz viszonyított arányából és előjeléből becsülhető az eltéréseket okozó szél.

Megemlítendő, hogy ismert helyzet és aktuális emelkedési és süllyedési szögek mellett kis pontossággal, de a vertikális szélkomponens is meghatározható. Ehhez figyelembe kell venni, hogy főként kisebb levegőhöz képesti repülési sebességek ($\overrightarrow{TAS}$) esetén, emelkedés nélküli esetben (*nulla vario*) tisztán horizontális áramlási mezőben (nulla vertikális szélkomponens) a pitot-cső szöget zár be a vízszintessel. Ennek mértéke repülőgéptípusonként eltérő, az alkalmazott BXAP15 UAV esetében ez ~ 15 m/s alatt válik jelentőssé. Az adott $\overrightarrow{TAS}$ értékeknél tapasztalt szögeltérés mértékét általában szélcsatornás kalibrációval határozzák meg (*Cho et al., 2006*). Az ismert eltérés mértékében korrigálható a becsült vertikális sebesség komponens, s tovább pontosítható becsült (horizontális) szélesebesség.

3.2 Szélmérés körpályán történő repülés közben

A következőkben egy olyan esetben alkalmazható szélmérési módszert ismertetünk, amikor az UAV képes a földhöz viszonyított körpályán történő repülésre. Ilyen repülést tesz lehetővé például az interneten szabadon elérhető, szabad forráskódú autopilóta program a Paparazzi (paparazzi.enac.fr).

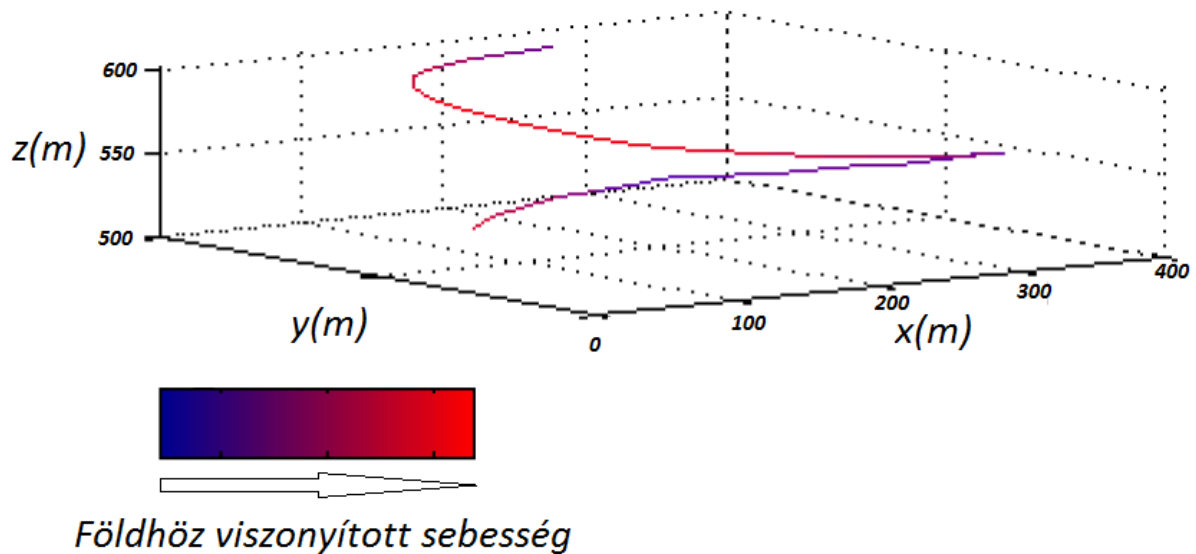


4. ábra. Aszimmetrikus spirálban, illetve folyamatosan emelkedve történő szélmérés.
A levegőhöz viszonyított sebesség közel állandó, míg a talajhoz viszonyított
sebesség változik az időben (Bonin et al., 2011).

A módszert sikerrel alkalmazták többek között, az oklahomai egyetem (*University of Oklahoma*) által végzett UAV mérésorozat részeként (Bonin et al., 2011). Repüléskor a gép földhöz rögzített koordináta-rendszerben egy aszimmetrikus spirál szerint emelkedik. A spirál két részből áll, egy vízszintes repülési félből, amikor a szélmérés zajlik, illetve egy emelkedési fél szakaszból (4. ábra).

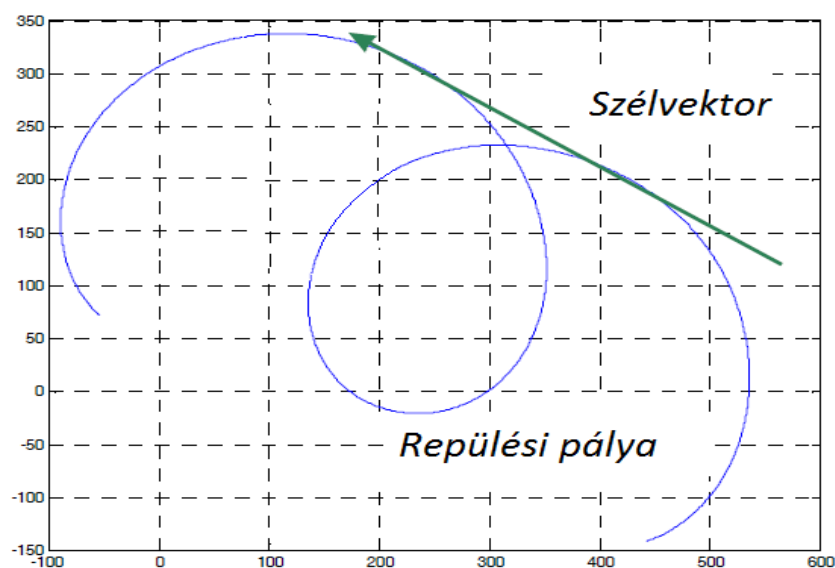
Az egyes szinteken a szélvektorok az egymás utáni félköríves, vízszintes pályákon mért $\overrightarrow{TAS}$ és $\overrightarrow{GS}$ sebességkülönbségek lesznek. A szél iránya azonos lesz a legnagyobb különbséghez tartozó irányszöggel, sebessége azonos az eltéréssel. A körözés során a

levegőhöz viszonyított sebesség közel állandó, a földhöz viszonyított sebesség szinuszosan változik (5. ábra).



5. ábra. A körpályán történő repülés során változó $\overrightarrow{TAS}$ szélessége (Bonin et al., 2011).

A pontos szélbecsléshez nem szükséges egy teljes kör repülése, így a fordulat második felében a repülőgép emelkedhet a következő mérési szintig. Az előző módszernél leírtakkal analógiában, a helyzetszögek ismeretében akár folyamatos emelkedés során is lehetséges pontos szélméreés, illetve meghatározható a vertikális komponens is.



6. ábra. Szélbecslés a gép körönkénti elsodródásából (Cho et al., 2006).

Mágneses irányszög adatok hiányában a szélirány az aktuális érintő irányából megadható, valamelyest nagyobb pontatlansággal. Amennyiben lehetséges a repülőgéppel stabil, azonos átmérőjű körök repülése a levegőhöz viszonyítva, akkor a körönként megfigyelhető sodródásból szintén könnyen meghatározható a szél iránya és sebessége (6. ábra).

Stabil körözés során, az azonos fázisokban megfigyelt pozíció eltérésének mértéke határozza meg a szél irányát és sebességét. Az azonos fázisszög meghatározása történhet egyszerűen az UAV irányszögéből (*amennyiben rendelkezik mágneses irányszög mérésére alkalmas eszközzel*), vagy számítható a szögsebességből. A pontos méréshez egymás után több forduló megtétele is szükséges. A fordulók átmérője ideális esetben legalább 250–300 m, ugyanis ekkor a forduló szabályos kör formája jobban tartható, s körtől való eltérések aránya kisebb lesz, viszont a nagyobb skálán jelentkező eltérések még nem zavarják a mérést.

4. Szélsébség és turbulencia mérések az 5HP szonda alkalmazásával – elméleti áttekintés

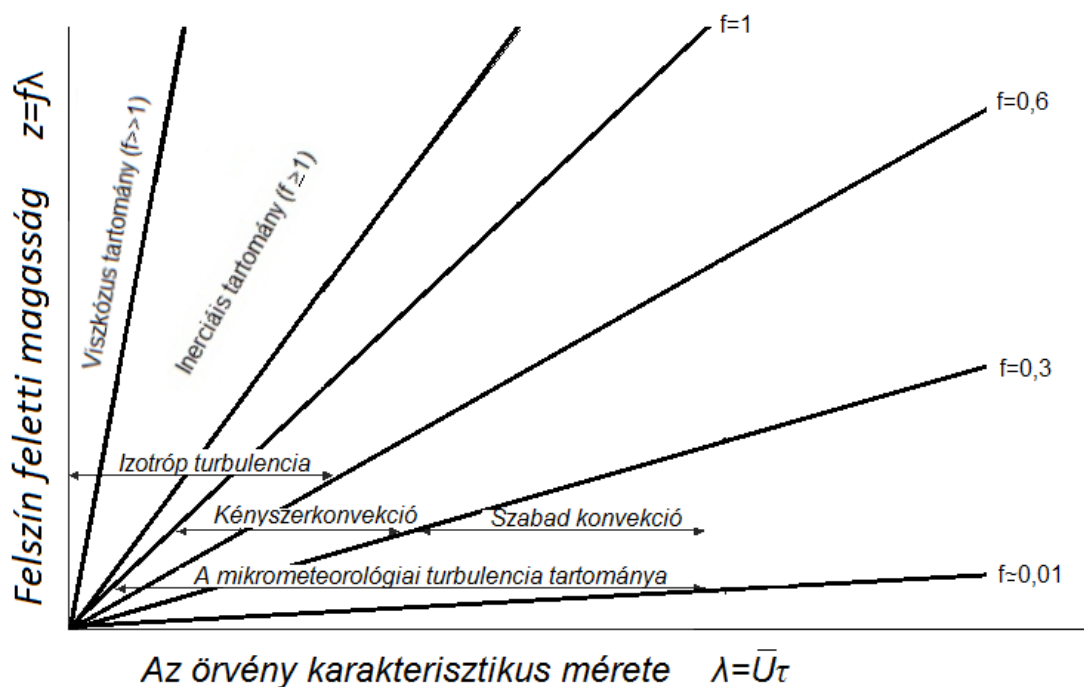
Az UAV-ken elhelyezett szenzorok két csoportra bonthatók. Az ún. lassú szenzorok a meteorológiai állapothatározók átlagos értékeit adják meg. Itt a mérések átlagolási ideje 1–10 s (< 1 Hz). A gyors válaszidejű szenzorok (> 20 –100 Hz) már alkalmasak az adott állapothatározó pillanatnyi értékeinek, s térbeli fluktuációinak a meghatározására, vagyis a turbulens áramok mérésére. A következőkben a nagy pontosságú áramlásmérés eszközével az 5HP szondával ismerkedünk meg. Ilyen berendezés fejlesztését kezdtük el a BMGE Áramlástan Tanszékével együttműködve. A nagy felbontású áramlási mező ismerete alkalmas az impulzusáram becslésére. Ha ezt a szenzort más gyors műszerekkel (*pl. gyors termolelem, vagy nyomanyag-mérés*) kombináljuk akkor az adott tulajdonság (*szenzibilis hő, nyomanyag*) turbulens áramát is meghatározhatjuk. Célunk a repülőgépes turbulens szél mérés elméleti alapjainak a bemutatása.

A légkörnek azt a rétegét, amelyre a földfelszín közvetlenül hatással van, planetáris határrétegnek (*PHR*) nevezzük. A *PHR* mechanikai és termikus eredetű turbulens örvénytestek alakítják. A napsugárzás energiájának jelentős része a földfelszínen nyelődik el és alakul át hőenergiává. Ezt az energiát a légkör felsőbb tartományaiba a turbulens átviteli folyamatok szállítják. A molekuláris diffúzió mértéke a *PHR*-ben öt-hat nagyságrenddel kisebb, mint a turbulens keveredés, így ennek hatása elhanyagolható (*Götz és Rákóczi, 1981*).

A felszín feletti magasság növekedésével a turbulens örvények karakterisztikus mérete is növekedik, egészen a planetáris határréteg tetejéig (*7. ábra*). A planetáris határréteg felett, az ún. szabad légkörben a turbulencia mértéke csekély (*eltekintve az erős konvektív cellák, továbbá a futóáramlások környezetétől*). A termikus eredetű örvények karakterisztikus mérete lényegesen meghaladja a mechanikai hatások miatt keletkező örvényekét. (*Az előbbiektől karakterisztikus méretei lényegesen nagyobbak.*) A földfelszínhez közeledve nő a mechanikai okokból keletkezett örvények dominanciája. Ezek az örvénytestek már kisebb mértékben vesznek részt a turbulens tulajdonság-szállításban, és kvázi-izentróp szerkezetűek. A *PHR* örvényeinek szerkezetét az f dimenzió nélküli frekvenciával szokás jellemezni.

$$f = \frac{z}{U\tau} \quad (4.1)$$

ahol τ az az idő amíg az örvény elhalad a mérőpont felett, z az örvény horizontális mérete, $\bar{U}$ az átlagos szélesség (Götz és Rákóczi, 1981).



7. ábra. A mikroskálájú turbulencia felosztása a felszín feletti magasság (z) és az örvények karakterisztikus mérete (λ) alapján (Rákóczi, 1988).

A Repülőgépes mérés során az $\bar{U}$ átlagos szélesség azonos lesz a $\overrightarrow{TAS}$ -el és τ értéke is ettől fog függeni. Tekintettel arra, hogy a $\overrightarrow{TAS}$ általában nagyobb $\bar{U}$ -tól, továbbá hogy a mérő berendezés nem egy pontban helyezkedik el, a felszínen használt turbulencia mérő módszerek nem alkalmazhatóak repülőgépes méréskor.

A repülőgépeken általánosan alkalmazott pitot-cső használatával a turbulens örvények nem kimutathatóak, így a turbulencia méréséhez szükségessé válik egy olyan műszer használata is, ami a haladási iránnyal párhuzamos $\overrightarrow{TAS}$ mérése mellett alkalmas az áramlás támadási szögében bekövetkező változások gyors regisztrálására is.

Egy ilyen eszköz az 5 lyukú anemométer (5HP – five hole probe), mely GPS-sel és INS-sel (Inertial Navigation System – inerciális navigációs rendszer [gyorsulásmérő szenzorok]) kombináltan történő használat esetén alkalmas a turbulens örvénytestek mérésére, illetve pontos 3D áramlás meghatározásra. Az ilyen típusú műszereket elterjedten használják az áramlástanban is, pl. szélcsatornás méréseknél (Telionis, 2009).

Az öt lyukú 5HP szonda 5 különböző dinamikus torlónyomást mér (8. ábra). A statikus nyomást a szonda oldalán elhelyezett 4 mérőlyuk segítségével határozzuk meg. A sebesség pillanatnyi értékeinek a meghatározásához ismernünk kell az 5HP repülőgéphez és a földhöz képesti térbeli helyzetét. Erre szolgál a repülőgép súlypontjához közel elhelyezett három tengelyű elfordulásmérő szenzor (IMU) ami méri a gép x , y , z tengelyek szerinti elfordulásait, továbbá a két, egyenként két tengelyes gyorsulásmérő, amelyekkel a repülőgép hosszirányú tengelyének a helyzetét pontosítják (*Ezek a műszerek is beszerzés alatt vannak, így itt az alkalmazásuk elméleti háttérével ismerkedünk*). A földhöz viszonyított sebesség $\overrightarrow{GS}$ és a repülőgép pozíciójának a meghatározása – ahogy azt korábban említettük – egy egyszerű egy antennás GPS segítségével történik általában 1Hz-es mérési frekvencián (Metzger et al., 2011).

A következőkben az 5HP szondával történő szél mérés elvével ismerkedünk Metzger et al. (2011) munkája alapján. A célunk a szélvektor meteorológiai koordináta-rendszerben (MCS) történő meghatározása, ahol az adott ponthoz rögzített Descartes-féle koordináta-rendszerben az x tengely keletre, az y tengely északra mutat, míg a z tengely jelöli ki a helyi függőlegest. A meteorológiai koordináta-rendszerben a $(\vec{V}^m)$ sebességvektor.

$$\vec{V}^m = (V_u^m; V_v^m; V_w^m) \quad (4.2)$$

ahol a három sebességkomponens rendre V_u^m, V_v^m, V_w^m .

A meteorológiai koordináta-rendszerbeli szél $(\vec{V}^m)$ az földhöz viszonyított sebesség $(\overrightarrow{GS_m})$ és a valós (repülőgéphez viszonyított) szélesebesség $(\overrightarrow{TAS^m})$ vektoriális különbsége. Az m felső index a meteorológiai, (azaz az adott pontban földhöz rögzített ortogonális) koordináta rendszerre utal:

$$\vec{V}_m = \overrightarrow{GS_m} - \overrightarrow{TAS_m} \quad (4.3)$$

A következőkben az 5HP szonda által mért értékek feldolgozásának lépéseit tekintjük át. A 5HP mérőcsatornáiból három különböző nyomásértéket nyerünk ki, mely adatokból többszöri transzformálás útján kapjuk meg először a szondához, majd a géptesthez és a földhöz viszonyított sebesség vektort. Ezek a dinamikus nyomás (p_q), továbbá az egymáshoz

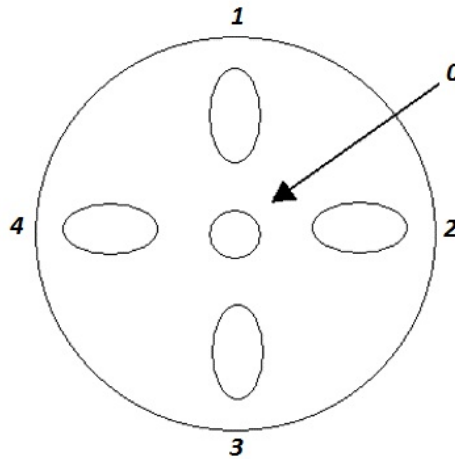
képest átellenes oldalon lévő, a központi lyukhoz képest 45°-os szögben döntött két-két lyukon (8. ábra) mért nyomás különbsége (p_α, p_β) amelyek függnek az áramlási (vagy támadási) szögektől (α, β), így azok ebből számolhatók. Itt α a horizontális, β a vertikális tengely mentén történő elfordulást adja meg (lásd a 8. és a 9. ábrát). Az α és a β szög meghatározása az egymáshoz képest átellenes oldalon mért nyomásadatok különbségéből (p_α, p_β) és a dinamikus nyomás (p_q) (a 0. nyíláson mért teljes nyomás (p_0) és a szonda oldalán mért statikus nyomás (p_s) különbsége) ismeretében. p_α, p_β, p_q alakja:

$$p_q = p_0 - p_s$$

$$p_\alpha = p_3 - p_1 \quad (4.4)$$

$$p_\beta = p_4 - p_2$$

A P_0 porton mért teljes nyomás a statikus és a torlónyomás összege. A mérőlyukak sorszámaait a 8. ábra szemlélteti.



8. ábra. Az 5HPszonda bemeneti nyílásai (portok). A 0. portot szokás t -vel is jelölni.

A mért dinamikus nyomás, és az 1-4 portokon mért nyomáskülönbségek segítségével az alábbi egyenletek szerint számolható az α és a β támadási szög (lásd még a 10. ábrát is).

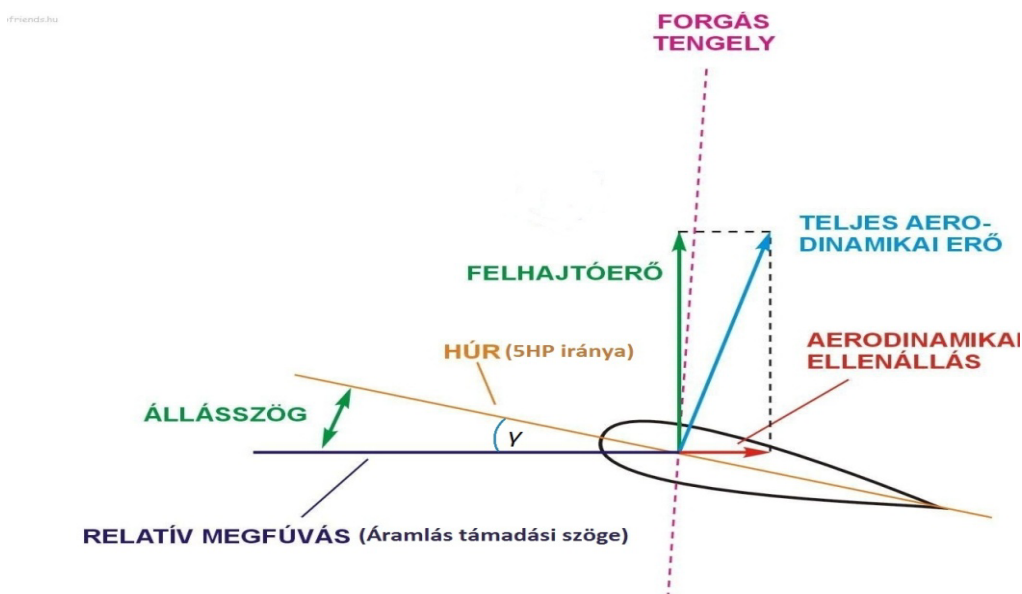
$$\alpha = \frac{2}{9 \sin(2\tau)} \frac{p_\alpha}{p_q} \quad (4.5)$$

$$\beta = \frac{2}{9 \sin(2\tau)} \frac{p_\beta}{p_q} \quad (4.6)$$

Itt τ a középső p_0 és a további oldalsó (p_1 -től p_4 -ig) lyukak által bezárt szög (általában 45°). Az α és a β szög ismeretében már megadható a D korrekciós tényező

$$D = (1 + \tan^2 \alpha + \tan^2 \beta)^{1/2} , \quad (4.7)$$

amivel a szondán mért dinamikus nyomás (p_q) értékét korrigáljuk a merőlegetől eltérő támadási szög következtében. Az állásszög és a támadási szög (v. *relatív megfúvás*, lásd a 9. ábrát is) eltérése abból adódik, hogy a 5HP szonda feje nem tökéletesen merőleges az áramlási irányra, hanem attól kissé felfelé mutat, ami szükséges a géptesten és a szárnyon létrejövő felhajtóerő létrejöttéhez (főként kisebb $\overline{TAS}$ sebességek esetén). Természetesen a sodródásból adódóan is keletkezik eltérés, a γ szög értéke mint az α , mind β szögek következménye.



9. ábra. Az emelt állásszög (γ) következtében kialakuló szögeltérés az 5HP szonda iránya és a relatív megfúvás között. Az 5HP szonda iránya a szárnyprofil hossztengelemből húzott húrral párhuzamos. (<http://aerofriends.hu>)

A dinamikus nyomás korrigált értéke (P_k) értéke *Crawford et al. (1992)* és *Metzger et al. (2011)* alapján a

$$p_k = p_q \left(\frac{9 - 5D^2}{4D^2} \right)^{-1} \quad (4.9)$$

összefüggésből számítható. Ennek ismeretében a dinamikus nyomás képlete alapján már megadható az UAV levegőhöz képesti sebessége:

$$TAS = \sqrt{\frac{P_k}{\frac{1}{2}\rho}} \quad (4.10)$$

ahol ρ a levegő aktuális sűrűsége.

Levezetés után a skalár mennyiségként megadott TAS -t vagyis az UAV levegőhöz viszonyított sebességét vektormennyiséggé kell alakítani. Ehhez először egy aerodinamikai koordináta-rendszert (ACS – *Aerodynamical Coordinate System*) kell megadnunk, aminek a középpontja maga az 5HP szonda feje. Itt az x tengely előre, az y tengely oldalra, míg a z tengely lefele mutat balsodrású derékszögű ortogonális koordináta-rendszert alkotva. Az aerodinamikai koordináta-rendszert az ^a felső indexszel jelöljük. Ebben a koordináta-rendszerben a valós szélesség komponensei közül az oldalirányú és a vertikális komponensek nullának adódnak:

$$\overrightarrow{TAS}^a = (-TAS; 0; 0) \quad (4.11)$$

A mínusz előlel természetes, hiszen az áramló közeg „szembe jön”. Mivel az aerodinamikai koordináta-rendszer minden pillanatban az áramláshoz igazodik, ami időben változik, ezért következő lépésként a $\overrightarrow{TAS}^a$ sebesség vektort átírjuk a géptesthez viszonyított koordináta-rendszerbe. A repülőgép súlypontjának a pozícióját és a repülőtest helyzetét a az elfordulásmérő szenzorok alapján ismerjük. Szintén adott az 5HP szonda repülőgép testhez viszonyított helyzete. A géptesthez viszonyított koordináta-rendszer (BCS – *Body Coordinate System*) tengelyei rendre előre oldalirányban és lefele mutatnak ismét derékszögű ortogonális koordináta-rendszert alkotva, aminek a középpontja maga az elfordulásmérő szenzor (*a gép súlypontjában, van annak közelében*).

Ez a vertikális Z^a és a keresztirányú Y^a tengelyek körüli egymás utáni forgatásokkal érhető el (10. ábra). Lenschow (1986) nyomán a forgatások az alábbi vektoroperátorban összegezhetők:

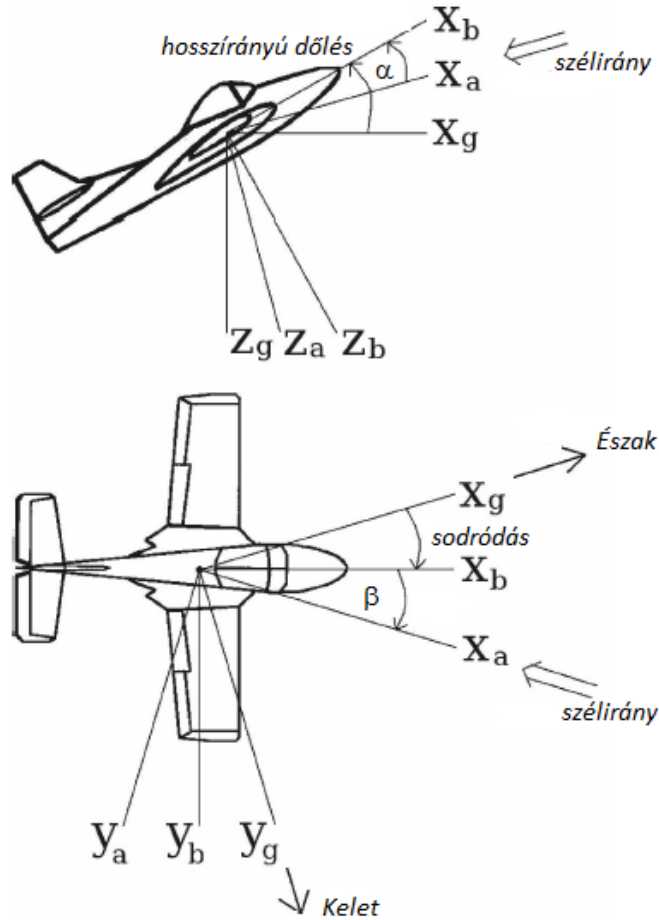
$$\vec{R}^{ab} = D^{-1} \cdot \begin{pmatrix} 1 \\ \tan \beta \\ \tan \alpha \end{pmatrix}, \quad (4.12)$$

ahol α a korábban már leírt bólintási szög (azaz a repülőgép hossz tengelyének a géptesthez viszonyított koordináta rendszer x és z irányok által meghatározott síkján vizsgált, az áramlási iránnyal bezárt szög), β a gép oldalirányú sodródási szöge (a géptest hossz tengelyének az x és y irányok által bezárt síkon történő szögeltérése az aerodinamikai áramlási iránytól). A D értéke a (4.7) egyenlet szerint számolható. Mivel a $\overrightarrow{TAS}^a$ az összes információt az első vektorkomponensben hordozza, ezért ezt a transzformációt elegendő a $-TAS$ komponensre alkalmazni.

Ez után már ismert a géptesthez viszonyított koordináta rendszerben (BCS) a szélvektor, de még mindig az 5HP fejével megegyező középponttal, aerodinamikai koordináta-rendszerben (ACS) definiáltak szerint. Ahhoz hogy a középpontot elcsúsztassuk meg kell adni az 5HP (ACS középpont) és az INS (BCS középpont) közti eltérést. Ezt az 5HP-t tartó karra ($_{lev}$ alsó indexszel jelölve) vonatkozó korrekcióval oldjuk meg (Williams és Marcotte, 2000).

$$\vec{V}_{lev}^b = \begin{pmatrix} \Omega_{\phi}^b \\ \Omega_{\theta}^b \\ \Omega_{\psi}^b \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} x^b \\ y^b \\ z^b \end{pmatrix}, \quad (4.13)$$

ahol Ω_{ϕ}^b , Ω_{θ}^b , Ω_{ψ}^b INS által mért időegység alatti szögelfordulás (szögsebesség) az X^b, Y^b, Z^b tengelyek körül (10. ábra). A 4.13 képletben szereplő x^b, y^b, z^b az 5HPszonda távolsága az X^b, Y^b, Z^b forgástengelyektől. Az egyes tagok ismeretében, a géptesthez viszonyított koordináta-rendszerben (BCS) megadott valós szélességet ($\overrightarrow{TAS}^b$) az $\vec{R}^{ab}(-TAS) + \vec{V}_{lev}^b$ vektorösszeg adja meg, ahol $\vec{R}^{ab}$ az aerodinamikai (ACS) és géptesthez rögzített (BCS) koordináta-rendszerek közötti transzformációs vektor, $-TAS$ a mért levegőhöz viszonyított valós szélesség skalármennyisége, $\vec{V}_{lev}^b$ pedig az ACS és BCS koordináta rendszerek középpontja közti eltérés mértéke a géptesthez rögzített koordináta-rendszerben.



10. ábra. A géptesthez, illetve az áramláshoz viszonyított koordináta rendszerek, és azok eltérései.
Repülés közben a géptesthez rögzített koordináta-rendszer X tagja párhuzamos a szélvektorral
(Kroonenberg et al., 2008).

Ahhoz hogy megkapjuk a (4.3) egyenletben szereplő $\overrightarrow{TAS}^m$ szélvektort, a géptesthez rögzített koordináta-rendszerben felírt $\overrightarrow{TAS}^b$ valós sebesség vektort meteorológiai koordináta-rendszerbe (MCS) kell átalakítani. A transzformáció a géptesthez rögzített koordináta-rendszer tengelyei (X^b, Y^b, Z^b) mentén történő elforgatásokkal történik.

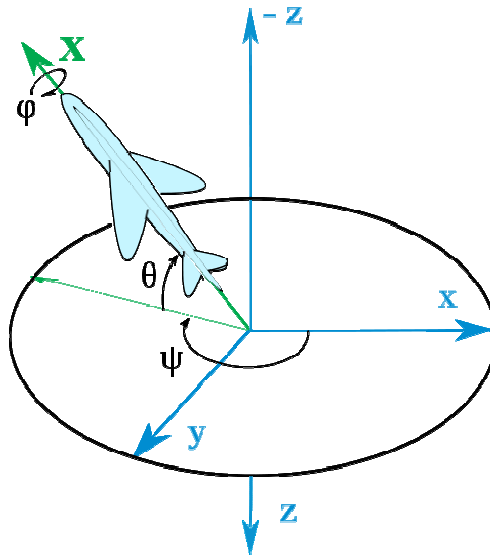
Az vektortranszformáció az alábbi operátorral végezhető el:

$$\mathbf{M}^{bm} = \begin{pmatrix} M_{11}^{bm} & M_{12}^{bm} & M_{13}^{bm} \\ M_{21}^{bm} & M_{22}^{bm} & M_{23}^{bm} \\ M_{31}^{bm} & M_{32}^{bm} & M_{33}^{bm} \end{pmatrix}. \quad (4.14)$$

A forgatási mátrix elemei rendre a következők:

$$\begin{aligned}
 M_{11}^{bm} &= \sin \psi^b \cos \theta^b, \\
 M_{12}^{bm} &= \cos \psi^b \cos \Phi^b + \sin \psi^b \sin \Phi^b \sin \theta^b, \\
 M_{13}^{bm} &= \sin \psi^b \sin \theta^b \cos \Phi^b - \cos \psi^b \sin \Phi^b, \\
 M_{21}^{bm} &= \cos \psi^b \cos \theta^b, \\
 M_{22}^{bm} &= \cos \psi^b \sin \theta^b \sin \Phi^b - \sin \psi^b \cos \Phi^b, \\
 M_{23}^{bm} &= \sin \psi^b \sin \Phi^b + \cos \psi^b \sin \theta^b \cos \Phi^b, \\
 M_{31}^{bm} &= \sin \theta^b, \\
 M_{32}^{bm} &= -\cos \theta^b \sin \Phi^b, \\
 M_{33}^{bm} &= -\cos \theta^b \cos \Phi^b,
 \end{aligned}$$

ahol Φ^b a géptest oldalirányú dőlése a földhöz rögzített Descartes-féle ortogonális koordináta-rendszer x és y tengelyei által kijelölt síkhoz képest, θ^b a géptörzs 'bólintása' az x, z irányok által bezárt síkon és ψ^b a géptest hossz tengelyének (a gép orra felé mutató irányának) az x tengellyel bezárt szöge az x, y bázisvektorok által kijelölt síkon (11. ábra). A fenti összefüggések két egymásután végzett kétdimenziós (rögzített tengely mentén történő) forgatás eredményeként adódnak.



11. ábra A forgatási tengelyek (<http://ocv.mit.edu>)

A géptesthez viszonyított koordináta-rendszer (BSC) mozgását az földhöz rögzített meteorológiai koordináta-rendszerhez (MCS) képest a (4.3) egyenlet alapján a $\overrightarrow{GS}^m$ vektor adja meg. Ez alapján a szélvektor a földhöz rögzített Descartes-féle ortogonális (*meteorológiai*) koordináta-rendszerben az alábbi egyenlettel számolható, ahol $-TAS$ a (4.11) sebességkomponens a (4.11) felírás alapján megfeleltethető a $\overrightarrow{TAS}^a$ vektorral (*Metzger et al. 2011*):

$$\overrightarrow{V}_w = \overrightarrow{V}^m = \overrightarrow{GS}^m - \mathbf{M}^{bm} \left(\overrightarrow{R}^{ab} (-TAS) + \overrightarrow{V}_{lev}^b \right). \quad (4.16)$$

4.1 Hidro-termodinamikai korrekciók

A turbulens örvények méréséhez pontos nyomásmérés szükséges. Figyelembe véve hogy a határreteg vastagsága 2–3 ezer méter is lehet, a repülés során akár 300 hPa nyomásváltozás, is lehetséges. Emellett a hőmérsékletingadozás is jelentős. Ez szükségessé teszi mind a pitot-cső, mind az 5HP szonda által mért nyomásérték, s így a repülőgéphez mért áramlási sebesség ($\overrightarrow{TAS}$) hidro-termodinamikai korrekcióját. A következőkben a szükséges korrekciókat mutatjuk be *Metzger et al. (2011)* munkája alapján.

Az 5HP szonda fejrésznél létrejövő torlódás (nyomásemelkedés) miatt, az azt körülvevő levegő hőmérséklete a valós (mért) hőmérsékletéről (T_s) az adiabatikus folyamat során megnövekvő teljes hőmérsékletére (T_t) változik. Az adiabatikus hőmérséklet emelkedés a Bernoulli-egyenlet alapján függ a torlónyomástól, ami a repülőgéphez viszonyított sebesség ($\overrightarrow{TAS}$) ismeretében a következő összefüggés alapján számítható (*Metzger et al., 2011*):

$$\overrightarrow{TAS}^2 = 2c_{p,h}(T_t - T_s) = 2c_{p,h}T_s \left[\left(\frac{p_s}{p_s + p_q} \right)^{-\kappa} - 1 \right]. \quad (5.1)$$

Mivel a T_t közvetlenül nem mérhető, ezért azt az előző egyenletből átrendezés után adiabatikus melegezés feltételezésével számoljuk:

$$T_t = T_s \left(\frac{p_s}{p_s + p_q} \right)^{-\kappa}, \quad (5.2)$$

ahol κ a Poisson szám:

$$\kappa = 1 - \frac{c_{v,h}}{c_{p,h}}.$$

A korrekciós egyenletben szereplő fajhők függenek a levegő nedvességtartalmától. A nedves levegő állandó térfogaton ($c_{v,h}$) és állandó nyomáson vett fajhője Götz és Rákóczi (1981) alapján a következő alakban adható meg a száraz levegő (d) és a vízgőz (w) állandó nyomáson és állandó térfogaton vett fajhői alapján

$$c_{p,h} = c_{p,d} \left[1 + q \left(\frac{c_{p,v}}{c_{p,d}} - 1 \right) \right] , \quad (5.3)$$

$$c_{v,h} = c_{v,d} \left[1 + q \left(\frac{c_{v,w}}{c_{v,d}} - 1 \right) \right] , \quad (5.4)$$

ahol q a specifikus nedvesség

$$q = \varepsilon \frac{e}{p_s + e(\varepsilon - 1)} . \quad (5.5)$$

Itt $\varepsilon = \frac{R_d}{R_v} = 0,622$ a száraz levegő és a vízgőz gázállandója közti arány, e a számított telítési gőznyomás. A száraz levegőre és a vízgőzre vonatkozó állandó nyomáson és térfogaton vett fajhők rendre:

$$\begin{aligned} c_{p,d} &= 1005 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} , & c_{p,w} &= 1846 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} , \\ c_{v,d} &= 718 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} , & c_{v,w} &= 1384 \text{ J kg}^{-1} \text{ K}^{-1} . \end{aligned}$$

4.2 Turbulens árammérések az 5HP szonda és egy nagy időbeli felbontású termoelem segítségével

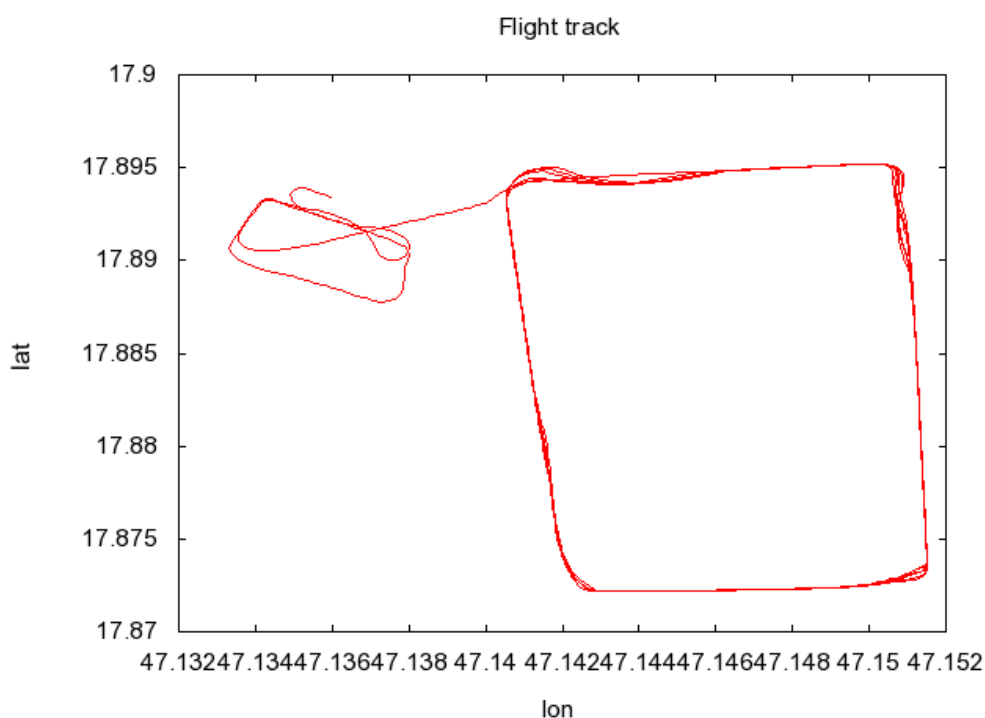
A turbulens impulzus és szenzibilis hőáram felszíni mérése szonikus-anemométerrel megoldott. A határréteg felsőbb rétegeiben azonban már csak a repülőgépes turbulens árammérések maradnak.

Ahogy már a negyedik fejezetben is említésre került, a turbulens örvényeket két főbb csoportra lehet osztani. Mechanikai okokra és termikus hatásokra kialakuló turbulens örvényekre. Ez utóbbiak a besugárzás hatására kialakuló konvektív örvények (Götz és Rákóczi, 1981). A földfelszín közelében a kisebb dimenzió nélküli frekvenciával rendelkező örvények a jellemzőek. A magasság emelkedésével a nagyobb karakterisztikus méretű örvények válnak meghatározóvá. A repülőgépes turbulencia mérésekre legelterjedtebben az ún. BAT-szondát (*Best Air Turbulence probe* – 9 lyukú, gömbfelületű nyomásmérő szonda) használják (Crawford et al. 1991). Az újabb kisebb költségű méréseknél elterjedten alkalmazzák az előző részben bemutatott 5 lyukú 5HP szondát is (Kroonenbeng et al., 2008; Reuder et al. 2009). A két áramlásmérő szonda közt csak a statikus portok számában van eltérés. Az impulzus áram méréshez a 3D áramlási mező nagyfrekvenciás ($> 20\text{--}100\text{ Hz}$) mérése szükséges. Hasonló felbontást követel a többi tulajdonság (pl. hőmérséklet, nedvesség, nyomanyag) árammérése is. Ez a mintavételezési frekvencia megegyezik a fejlesztés alatt álló 5HP szonda mérési frekvenciájával. A mérési gyakoriság meghatározásánál a földi turbulencia mérésektől eltérően, számolni kell azzal, hogy a gép valós sebességéből következően az egyes örvények haladása a szondához képest jelentősen megnő. Például egy 5 m karakterisztikus méretű légörvény kimutatásához 20 m/s -os $\overline{TAS}$ esetén legalább 10Hz-es mintavételi frekvencia szükséges, azonban ennél kisebb örvények, vagy nagyobb $\overline{TAS}$ sebesség esetén már nem kapunk információt a kis karakterisztikus átmérőjű örvényekről, s itt még csak a kimutatásról és nem az örvény belső szerkezetéről írtunk. A 4. fejezetben bemutatottak szerint az örvények karakterisztikus mérete a magassággal növekszik, így a repülőgépes mérések „érzékenysége” növekszik a magassággal. Horizontális szondázás esetén azonban kisebb frekvenciákon mérve is kimutathatóak a felszín hatására (eltérő talajborítottság) kialakuló eltérések (Reuder et al. 2009). Az impulzus és a szenzibilis hőáram mérő rendszer (5HP szonda és egy nagyérzékenységű termoelem) kialakítása a 2013-as és feladata lesz. Itt röviden a turbulens árammérések lehetőségéről szoltunk.

5. Mérések és eredmények

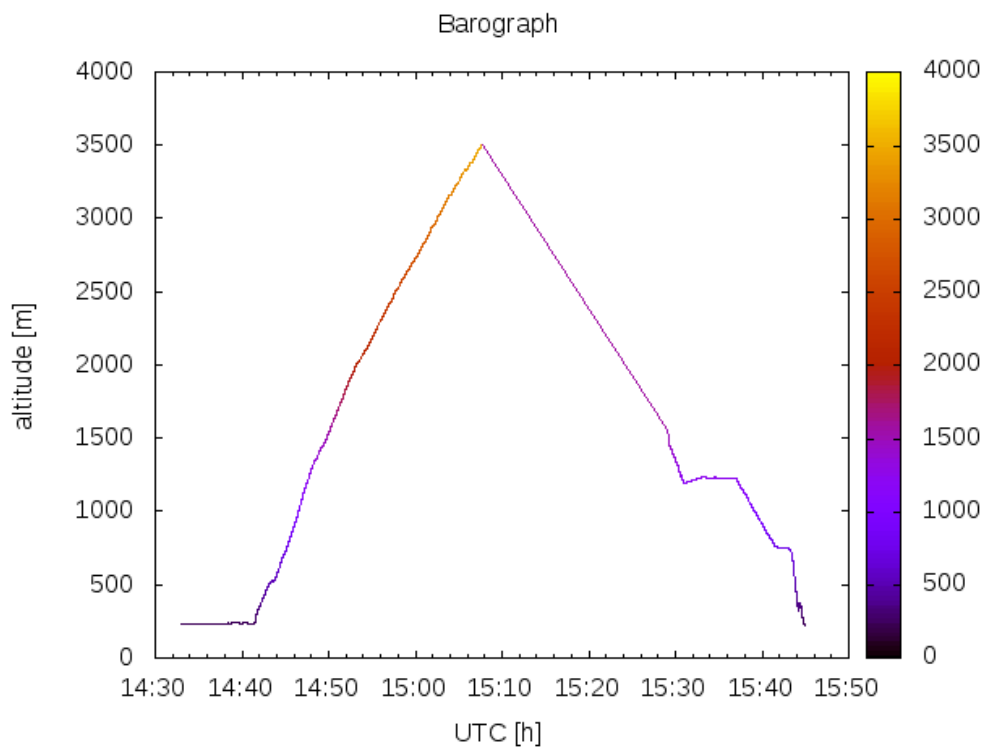
A BXAP15 pilóta nélküli repülőgép első sikeres repülése után megkezdődhetek a meteorológiai célú mérések. Jelenleg egy Vaisala HMP45 hőmérséklet és relatív nedvesség szenzor került elhelyezésre az UAV orr részén. A pozíció adatokat egy GPS szolgáltatja. A legnagyobb repülési magasságot 2012. október 19.-én délután végzett repülés során érte el a repülőgép, a továbbiakban e repülés során mért adatok bemutatásával és kiértékelésével foglalkozunk.

Az UAV 14:41 UTC-kor szállt fel a Várpalotai lőtérrel. A repülés során egy közel 2000 m oldalhosszúságú négyzet mentén egyenletes 2 m/s emelkedési sebességgel történt a repülés egészen 3500 m-es magasságig (12.- 13. ábra). A jobb átláthatóság érdekében csak az emelkedési szakaszban megtett útvonal lett kirajzolva.



12. ábra. A repülési útvonal 3500 m-es magasság elérésig 2012.10.19-én.

A teljes emelkedés megközelítőleg 30 percen keresztül tartott, ezáltal a felszín közelében és 3500 m magasságban mért adatok mérési ideje közt 30 perc eltérés van. A vertikális profil elkészítésekor ezt az eltérést elhanyagoltuk, a profilról leolvasható adatok mérési idejének a (rádiószondás felszállásokhoz hasonlóan) a felszállás időpontját vettük.

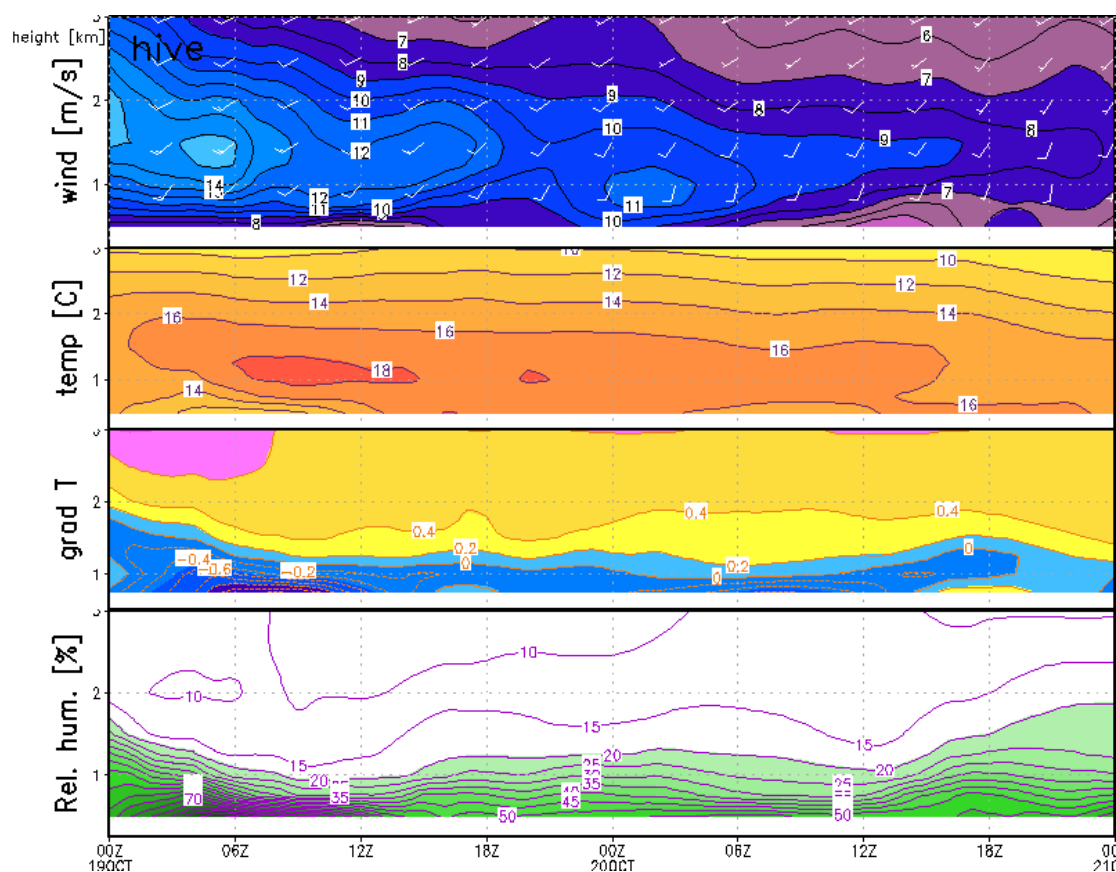


13. ábra. Az UAV magasságának változása a 2012.10.19-i méréskor. 3500m-es magasság után adatkiesés miatt szakadás figyelhető meg a barográfban.

A repülési idő és az útvonal tervezésénél figyelembe vesszük az ELTE Meteorológiai tanszékén futtatott finom felbontású WRF modell eredményeit. A területre a repülés biztosítása érdekében célprognózisok készülnek. Az előrejelzett értékek a mérés után összevetésre kerültek az UAV által mért adatokkal. A következőkben az október 19.-i tesztrepülés kiértékelését mutatjuk be. Elsőként az időjárási helyzetet elemezzük.

5.1 Az időjárási helyzet alakulása a 2012 október 19-i mérés idején

2012. október 19-én egy hazánktól délkelet felé távolodó anticiklon hátoldali áramlási mezejében voltunk, mely hatása talajszinten kevésbé érződött, azonban a magasban markánsan jelen volt. Míg talajszinten gyenge délkeleti szél dominált és országszerte 50-60%-os relatív páratartalmat regisztráltak, addig gyakorlatilag már a 925 hPa-os szinttől kezdve erős délnyugati áramlás volt jellemző, melyhez az 1000 m és 1500 m közötti tartományban erős melegadvekciónak társult, jelentős kiszáradással. Ezt az WRF modell adott nap 0:00 UTC-s futása is jelezte, mely 15:00 UTC-re közel 18°C-ot várt az 1000 m-es magassági szintre (14. ábra). Ezzel együtt várhatóan erős kiszáradást is jelzett 1000 m felett, közel 10%-os relatív nedvesség értékekkel. A szélmaximum 1000 m és 1800 m közt jelentkezett 15:00 UTC-kor 12m/s-os maximummal.

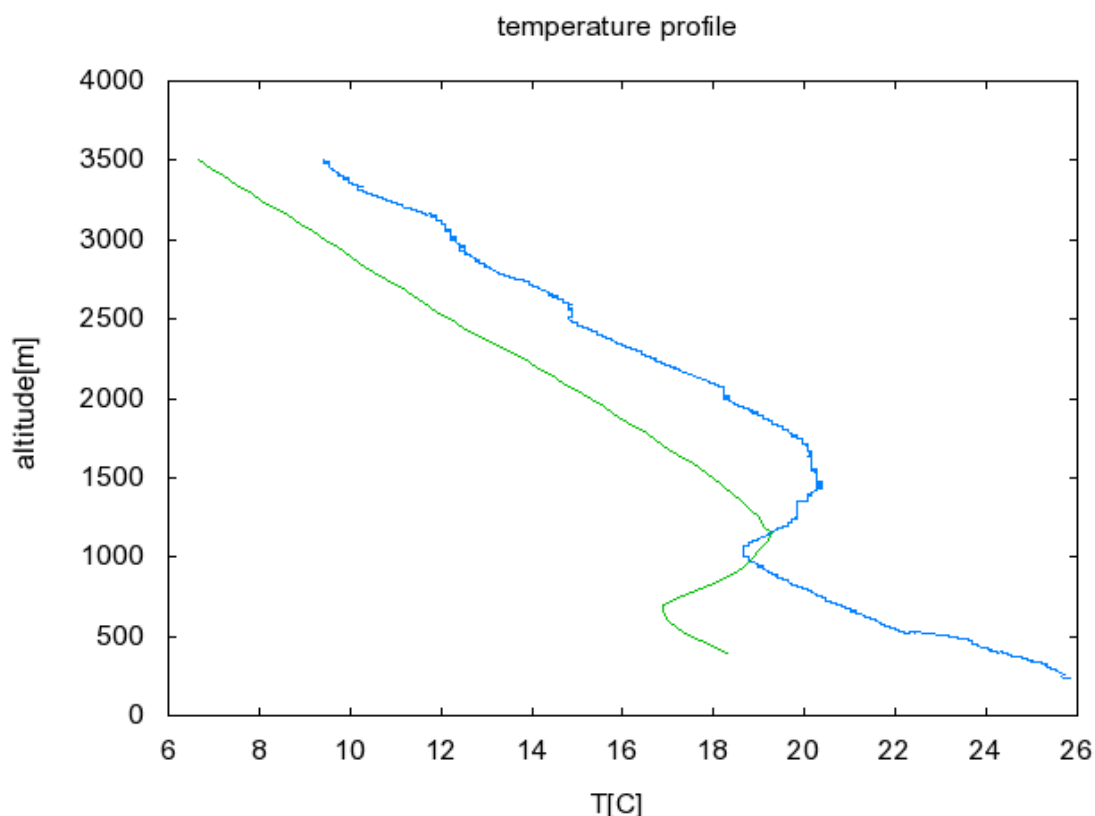


14. ábra. Az ELTE Meteorológiai tanszéken futtatott WRF modell adatokból készült meteogram a repülési napra és másnapra, a repülés helyére. Az UAV 14:41 UTC-kor szállt fel.

Az aktuális időjárási helyzet ideális volt a repülés és 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 modelladatok alapján lehetőség nyílt a *Vaisala* szenzor érzékenységének és válaszüdejének a vizsgálatára is.

5.2 Adatfeldolgozás, előállított produktumok

A mérés során egy *Vaisala HMP45* típusú hőmérséklet-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 relatív nedvességi adatok a Magnus-Tetens formula segítségével harmatpont hőmérsékletre lettek konvertálva.

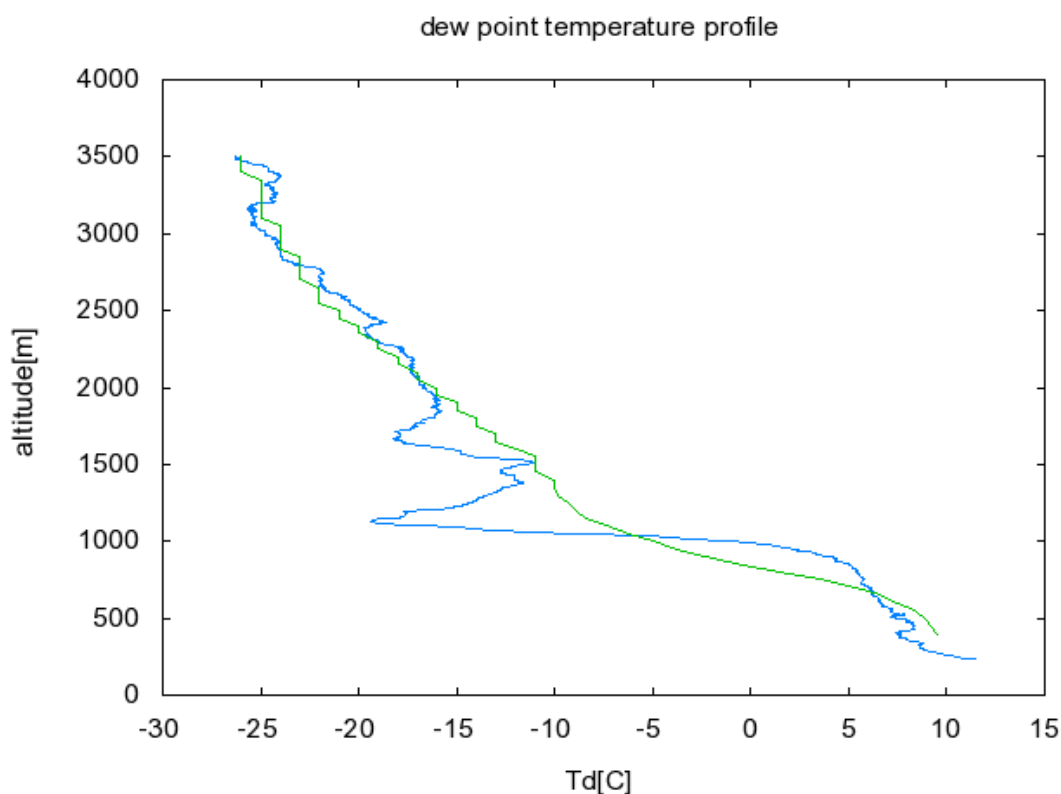


15. ábra. A WRF modell által előrejelzett (zöld) és a mért (kék) hőmérsékleti profilok.

A profilok megrajzolásánál az emelkedéskor mért adatok kerültek felhasználásra, a felszín és a 3500 m-es magasság közt. Az 15.-16. 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 részben a műszerezettségben, részben a WRF modell előrejelzésében 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 figyelhetők meg a profilon, melyek azonban nem haladják meg az 1 °C-ot. Ezek a kiíratás pontosításával eltűnnek.



16. ábra. A WRF modell által előrejelzett (zöld) és a mért (kék) harmatpont-hőmérsékleti profilok.

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 profilok 2 m-es vertikális felbontásnak köszönhetően olyan finom részek is

megfigyelhetők, amelyeket a modell nem tud előre jelezni, mint például az 1000 m és 1700 m-es magasságokban jelentkező extrém kiszáradást, holott a harmatpont hőmérséklet mindkét esetben megközelítette illetve elérte a -20°C -ot. (megjegyezzük, hogy a nagy időbeli felbontás ellenére a szenzor tehetetlensége miatt a következtetések levonásánál óvatosságnak 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 1300 m-es magasságig. Ezzel szemben a mérések szerint a relatív nedvesség (és így a harmatpont hőmérséklet is) közel 1000 m-es magasságig gyenge csökkenést mutatott, majd 1000 m felett hirtelen csökkenés kezdődött. Ez feltehetőleg az 1000 m-es magasságig megvastagodó nappali határrétegnek volt köszönhető, hiszen e felett a légtömegek közti keveredés gyenge.

6. Összefoglalás

A diákköri dolgozatban a pilótánélküli repülőgépek (UAV) meteorológiai alkalmazásával foglalkoztam. Bemutatásra került az UAV-vel történő szélszámítás több lehetséges módszere, továbbá a turbulens örvények lehetséges mérése is. Kiemelt szerepet kapott a közeljövőben alkalmazásra kerülő 5HP szonda bemutatása, ami alkalmas a 3D áramlás nagyfelbontású mérésére, a turbulens impulzusáram számítására. Foglalkoztunk a repülőgépes hőmérséklet és nedvesség profilmérésekkel is, amelyek alkalmasak pl a numerikus modellek által készített pszeudo-tempek ellenőrzésére.

A BXAP15 típusú pilótánélküli repülőgéppel (BHE Bonn Hungary Electronics ltd.) végzett hőmérséklet és nedvességmérés eredményeit egy esettanulmányon szemléltettem. A mért profilokat az ELTE Meteorológiai Tanszéken futtatott WRF modellel hasonlítottam össze. A repülőgépes mérések jól visszaadták a határréteg és a szabad légkör eltérő nedvességi szerkezetét. A mért adatok finom felbontásának köszönhetően olyan részletek is megjelentek, amik az előrejelzett profilokon nem figyelhetők meg. A mért és a modellezett hőmérsékleti értékek között közel 2°C-os eltérés volt tapasztalható, aminek oka részben a műszerezettségben, részben a modell előrejelzésében keresendő. A határréteg vastagsága mind a mért mind a modellezett hőmérsékleti és harmatpont profilok esetében jól kirajzolódott. A hőmérsékleti profil esetében jól elkülönült a határréteg felett kialakult meleg advekció, és a hatására megjelent inverziós réteg. Az UAV-ra telepített mérő-adatgyűjtő rendszer alkalmas hőmérséklet és nedvesség profilmérésekre.

A következő feladat a szélprofil számítása, illetve a nagyfelbontású szélesebség és hőmérsékletmérés, a turbulens árammérés módszertanának kialakítása. Tervezünk levegőkörnyezeti méréseket is.

A dolgozat a TÁMOP-4.2.1.B-11/2KMR-2011-0001 pályázat keretein belül készült.

Irodalomjegyzék

- Ahmed, N.A. and Pisasale, J.A., 2002: A novel method for extending the calibration range of five-hole probe for highly three-dimensional flows. *Flow Measurement and Instrumentation* **13**, 23–30.
- Axford, D.N., 1968: On the accuracy of wind measurements, using an inertial platform in an aircraft, and an example of a measurement of the vertical mesostructure of the atmosphere. *J. Appl. Meteorol.* **8** (4), 645–666.
- Balogh, M., 2006: Az AMDAR repülőgépes adatok asszimilációja az ALADIN számszerű időjárási előrejelző modellben. *Diplomamunka ELTE Meteorológiai Tanszék*.
- Bonin, T., Zielke, B., Bocangel, W., Shalamunenc, W. and Chilson, P., 2011: An analysis of wind retrieval algorithms for small unmanned aerial systems. *15th Symposium on Integrated Observing and Assimilation Systems for the Atmosphere, Oceans and Land Surface*. (ams.confex.com/ams/91Annual/webprogramschedule/15IOAS.html)
- Brown, E.N., Friehe, C.A. and Lenchow, D.H., 1983: The Use of Pressure Fluctuations on the nose of an Aircraft for Measuring Air Motion. *J. Appl. Meteorol.* **22** (1), 171–180.
- Cho, A., Kim, J., Lee, S. and Kee, C., 2006: Wind Estimation and Airspeed Calibration Using the UAV with a Single-Antenna GNSS Receiver and Airspeed Sensor. *Proceedings of the 19th International Technical Meeting of the Satellite Division of The Institute of Navigation (ION GNSS 2006)*, Fort Worth, TX, September, 3050–3058.
- Crawford, T.L. and Dobosy, R.J., 1991: A sensitive fast-response probe to measure turbulence and heat flux from any airplane. *Boundary-Layer Meteorol.* **59** (3), 257–278.
- Götz, G. és Rákóczi, F., 1981: A dinamikus meteorológia alapjai. *Tankönyv, Tankönyvkiadó Budapest*.
- Kroonenberg, A., Spies, T. and Bange, J., 2008: First wind measurements with the meteorological uav 'M2AV CAROLO' *18th Symposium on Boundary Layers and Turbulence*.
- Lenschow, D.E., 1986: Probing the Atmospheric Boundary Layer. *Amer. Meteor. Soc.* 269.
- Lievens, K.P.A., Mulder, J.A. and Chu, P., 2005: Single GPS antenna attitude determination of a fixed wing aircraft aided with aircraft aerodynamics. *AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference and Exhibit San Francisco, California 15 - 18 August* (DOI: 10.2514/6.2005-6056)
- Mayer, S., 2011: Application and Improvement of the Unmanned Aerial System SUMO for atmospheric boundary layer studies. *Diploma thesis, University of Bergen*.
- 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.
- Paulik, B., Wantuch, F., Ozoli, Z., 2012: Pilóta nélküli légi járművek meteorológiai üzemeltetése. Repüléstudományi közlemények, *Repüléstudományi konferencia különszám. XXIV/ 2*.

- Ramanathan, V., 2006: Western Pacific Autonomous UAV Campaign: Aerosol-Dust-Cloud Interactions and Climate Effects. *Presentation to NOAA, NASA and NSF* (<http://www.ramanathan.ucsd.edu>).
- Rákóczi F., 1988: A planetáris határréteg. Az „Appendix” című fejezetet írta Weidinger T., *Egyetemi jegyzet, Tankönyvkiadó, Budapest*, 186 oldal.
- 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. *Meteorologische Zeitschrift*. **18** (2) 141–147.
- Spiess, T., Bange, J., Bushmann, M. and Vörsmann, P., 2007: First application of the meteorological Mini-UAV 'M²AV' *Meteorologische Zeitschrift*. **16** (2) 159–169.
- Telionis, D., Yang, Y. and Rediniotis, O., 2009: Recent Developments in Multi Hole Probe (MHP) Technology. *20th International Congress of Mechanical Engineering, November 15-20*.