Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Földrajz- és Földtudományi Intézet Meteorológiai tanszék

# Pilótanélküli repülőgépeken alkalmazható szondázási módszerek vizsgálata és fejlesztése

DIPLOMAMUNKA



#### Készítette: Szabó Zoltán Attila Meteorológus MSc szakos hallgató

Időjárás előrejelző szakirány

Témavezetők:

## Gyöngyösi András Zénó

Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai tanszék

### Dr. Weidinger Tamás

Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai tanszék

Budapest, 2014.

## Tartalomjegyzék

Rövic	lítések	.4
Beve	zetés	. 5
1.	UAV specifikáció	. 7
2.	A mérések célja és lebonyolítása	.9
3.	Általános szondázás: szenzorok, eredmények, következtetések	11
3.1	Hőmérséklet és relatív nedvesség	11
4.	Szél	16
4.1	Szélmérési módszer körpályán történő repülés közben	17
4.2	Szélmérés mágneses irányszög adatok felhasználásával	19
4.3	Sebességkülönbséges módszerek mágneses irányszög adatok felhasználása nélkül	23
4.3.1	Földfelszínre vetített sebességkülönbséges ( $GS - GS$ ) módszer	24
4.3.2	Földre vetített és levegőhöz viszonyított sebességkülönbségen alapuló ( $GS - AS$ ) módszer	26
5.	Szélmérési módszerek összehasonlítása előrejelzett és mért értékekkel	28
6.	Turbulencia és vertikális áramlások mérése	31
6.1	Vertikális áramlás detektálása	32
6.1.1	Az "Energia módszer" használatának előzményei	32
6.1.2	UAV energetikája és az "Energia módszer"	34
6.1.3	UAV-re vonatkozó mozgásegyenletek és szükséges korrekciók	36
6.2	Légköri turbulencia mérése	43
6.2.1	Turbulencia jellemzése a sebességmérések gyors Fourier-transzformációs analízisével	45
6.2.2	Spektrális teljesítménysűrűség (PSD)	47
6.2.3	Mozgó-ablakos gyors Fourier-transzformáció és spektrális teljesítménysűrűség	49
6.2.4	Zajszűrés, jelfeldolgozás	50
7.	Esettanulmány	52
7.1	Szinoptikus helyzetek a repülésekkor	53
7.1.1	2013.05.22. Várpalota	53
7.1.2	2013.11.28. Szeged	55
7.2	Mért értékek	57

7.2.1 Általános szondázás	57
7.2.2 Szél	59
7.2.3 Emelési teljesítmény (konvekció)	61
7.2.4 Turbulencia	63
Összefoglalás	68
Köszönetnyilvánítás	70
Irodalomjegyzék	71
Függelék	75

### Rövidítések

- AMDAR Aircraft Meteorological Data Relay (Repülőgépes Meteorológiai Adatközvetítés)
- AS Airspeed (Légsebesség, levegőhöz viszonyított sebesség, IAS vagy TAS [km/h, m/s])
- $C_{drag}$  Drag Coefficient (Súrlódási veszteségfüggvény[W/(km/h)])
- $C_E$  Engine Coefficient (Motor által hozzáadott teljesítmény korrekciós együtthatója [W/W])
- $C_L$  Lifting Coefficient (Felhajtó erő együttható)
- $C_T$  Throttle Coefficient (Motoros [Vonóerő] együttható [W/W])
- $C_V$  Vertical drag Coefficient (Vertikális súrlódási együttható)
- FFT Fast Fourier Transform Gyors Fourier-transzformáció
- GPS Global Positioning System (Globális helymeghatározó rendszer)
- GS Ground Speed (Földhöz viszonyított sebesség, vektor [km/h,m/s])
- HDG Heading (Repülőgép hossztengelye és a mágneses észak által bezárt irányszög [°])
- IAS Indicated Airspeed (Torlónyomásból számított légsebesség. Nem korrigált, vektor [km/h, m/s])
- IMU Inertial Measurement Unit (9 szabadsági fokú inerciális gyorsulásmérő egység)
- MAG\_OSS Magnetic, Onboard Sensor System (Fedélzeti mérőrendszer mágneses adatait felhasználó módszer [szélmérésnél] )
- MAG\_UAV Magnetic, UAV (UAV fedélzeti mágneses adatait felhasználó módszer [szélmérésnél])
- mAGL meters Above Ground Level (Felszín feletti magasság, [m])
- mAMSL meters Above Mean Sea Level (Átlagos tengerszint feletti magasság, [m])
- $\label{eq:MLCAPE-Mixed Layer Convective Avaiable Potential Energy (Keveredési rétegbeli rendelkezésre álló konvektív potenciális energia [J/kg])$
- OSS Onboard Sensor System (Fedélzeti szenzorrendszer)
- PHR Planetáris HatárRéteg
- PSD Power Spectral Density (Spektrális Teljesítménysűrűség  $[(km/h^2)/Hz]$ )
- SODAR Sonic Detection and Ranging (Szónikus detektáló és mérő egység [szélmérésnél])
- TAS True Airspeed (Valós, korrigált levegőhöz viszonyított sebesség, vektor [km/h, m/s])
- TFFT Time Fast Fourier Transform (Időbeni, mozgó Gyors Fourier-transzformáció)
- TRK Track (Föld feletti nyomvonal és a mágneses észak által bezárt szög [°])
- UAV Unmanned Aerial Vehicle (Pilótanélküli repülő eszköz)
- WS Windspeed (Szélsebesség, vektor [km/h, m/s])

#### Bevezetés

A repülőgépek meteorológiai mérésekre történő felhasználása a repülés korai időszakára nyúlik vissza, és fejlődése szorosan kapcsolódik a meteorológia fejlődéséhez. Egészen az első világháborúig szinte kizárólag csak személyes tapasztalatokról, szubjektív megfigyelésekről beszélhetünk, melyek során a repülést végző pilóták leszállás után, illetve később, a rádiós kommunikáció megjelenésével akár repülés közben is jelentették az általuk észlelt 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 már az AMDAR (*Aircraft Meteorological Data Relay – Repülőgépes Meteorológiai Adatközvetítés*) rendszer keretében naponta több százezer szél, hőmérsékleti és egyéb adatot (pl. nyomás, magasság) regisztrálnak, melyek a numerikus időjárás előrejelző modellek számára legfontosabb, térbeli bemenő adatokat szolgáltatnak (*Balogh*, 2006).

Igény van azonban a légkör olyan tartományainak a részletesebb megismerésére is, ahol a hagyományos (közforgalmi és kereskedelmi) "nagygépes" mérések nem alkalmazhatók. Ilyen többek között a planetáris határréteg (továbbiakban PHR) vagy általánosabban a troposzféra alsó, 1–3 ezer méteres rétege. Ezen tartomány részletesebb megismerése kiemelten fontos, hiszen itt történik a repülőgépek fel- és leszállása, a légkörbe kibocsátott szennyezőanyagok forrásai is ebben a rétegben találhatóak, és nem utolsó sorban a légköri folyamatok során kulcsfontosságú energiaátvitel is ezen a rétegen keresztül történik, komplex felszín-légkör kölcsönhatások révén.

A PHR szélviszonyai, hőmérsékleti rétegzettsége, hidrosztatikai stabilitása, nedvességtartalma, mind kihatnak a repülés biztonságára (látástávolság romlás, csapadék, jegesedés valamint a légköri turbulencia révén), továbbá nagyban befolyásolják a légkörbe jutott szennyezőanyagok keveredését, hígulását, és terjedését valamint befolyással vannak a vertikális energiaátvitelre is. A határréteg folyamatainak numerikus modellekkel történő leírása folyamatosan fejlődik, ugyanakkor egyes lokálisan, illetve mikro skálán megjelenő jelenségek hatásainak figyelembevétele komplexitásuk következtében csupán parametrizációkon keresztül valósítható meg. A parametrizációk bizonytalansága, továbbá a légkörrel közvetlen kapcsolatban lévő felszín viszonyainak részletes ismeretének hiányában ezek a célprognózisok jelentős hibával terheltek. Ennek fényében elmondhatjuk,

hogy az alsó troposzféra részletes ismeretéhez elengedhetetlenül fontosak a mérések, melyek adatait az előrejelzett produktumok verifikálásában is fel lehet használni.

Az alsó troposzféra monitorozására több távérzékelési módszer is létezik, azonban ezek általában helyhez kötöttek, vagy operatív üzemeltetésük nem gazdaságos (*Kadygrov*, 2006). A pilótanélküli repülőgépek elterjedésével újabb lehetőség válik elérhetővé a közvetlen mérésre, így az UAV-k (*Unmanned Aerial Vehicle – Pilótanélküli repülő eszköz*) meteorológiai célra történő felhasználása széles körben elterjedhet. Mivel az UAV-kel a távérzékeléssel ellentétben in-situ megfigyelések is megvalósíthatóak, számos más meteorológiai és levegőkémiai mérésre is lehetőség nyílik, mint például az aeroszol koncentráció, vagy légköri nyomanyagok mérése (*Pilewskie*, 2007).

2011-ben a TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KRM-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások pályázat keretében kiemelt kutatási területként pilótanélküli repülőgépek komplex meteorológiai támogatási rendszerének a kiépítése kezdődött meg. A fejlesztés keretében speciálisan a pilótanélküli repülőgépekre veszélyes időjárási jelenségek numerikus modellekkel történő előrejelzése és az előrejelzések fejlesztése (*Gyöngyösi et al.,* 2013b), veszélyes időjárási jelenségek pilóta nélküli repülőgépekre gyakorolt hatásának a vizsgálata (*Bottyán és Tuba,* 2013), pilótanélküli repülőgépek üzemeltetésének jogi- és légügyi szabályozói környezetének fejlesztése (*Palik,* 2012), valamint UAV-n alkalmazható speciális és általános meteorológiai mérések végzése és új módszerek létrehozása (*Szabó et al.,* 2013) volt a cél. A dolgozatban sor kerül az általunk használt UAV műszerezettségének a bemutatására, továbbá részletesen tárgyaljuk a szél, vertikális áramlások és turbulencia mérésére alkalmazható módszereket is.

#### 1. UAV specifikáció

A méréseket a BHE Bonn Hungary Electronics ltd. (*http://www.bhe-mw.eu*) által tervezett és üzemeltetett BXAP15 típusú pilóta nélküli repülőgépével végeztük (3.1 ábra). A gép általános tulajdonságai (1. táblázat):

Spo	ecifikáció
Szárnyfesztávolság	3,7 m
Törzshossz	1,7 m
Maximális felszálló súly	17 kg
Hasznos teher	3 kg
Meghajtás	1200 W névleges teljesítményű,
	24V-os kefe nélküli elektromos
	motor
Utazósebesség	60–100 km/h[ IAS]
Maximális repülési magasság	3000 m+ [mAMSL]
Üzemidő	~90 perc
Hatótávolság	10–20 km (domborzatfüggő)

1. táblázat: BXAP15 UAV specifikációja.

Bár a meteorológiai mérésekre használt UAV-k elektromos meghajtása az akkumulátor élettartama következtében erősen korlátozza a repülési időtartamot, ez a meghajtás a meteorológiai mérések szempontjából sok esetben előnyös, hiszen hőtermelése alacsonyabb, mint a robbanómotoroké, így kisebb mértékben zavarja a hőmérsékleti méréseket. Ezen kívül a villanymotornak sokkal kisebb vibrációs hatása van, mint a robbanómotoroknak, és az is sokkal szűkebb tartományba esik, ezért a fedélzeten elhelyezett gyorsulásmérők hibája és a turbulencia detektálás zavarása is kisebb mértékű és könnyebben kiszűrhető.

Nem véletlen tehát hogy a gyakorlatban a meteorológiai mérésekre használt UAV-k jelentős része elektromos meghajtással rendelkezik. Az általunk felhasznált UAV a meteorológiai mérésekre használtak közül a nagyobb méretűek közé tartozik a maga 3kgos hasznos terhelhetőségével. Felszállása egyaránt történhet kézi indítással, csörlő segítségével földről indítva, vagy katapultból. Röviddel a felszállás után a repülés előre meghatározott földrajzi koordináták szerint, GPS (*Global Positioning System – Globális Helyzet meghatározó Rendszer*) vezérléssel, robotpilótával történik, de szükség esetén bármikor át lehet térni kézi vezérlésre is. A leszállás általában kézi irányítással történik. Az UAV távvezérlése kétirányú mikrohullámú kapcsolaton keresztül zajlik, ami egy pozíció adatok alapján vezérelt, gépkövető földi adóból és egy fedélzeti egységből áll. Mivel a repülés előre meghatározott fordulópontok érintésével történt, így az egyenletes körpályán történő repülés nem volt megoldott automatikus üzemmódban. Nem volt lehetséges továbbá semmilyen levegőhöz rögzített koordináta-rendszerben megválasztott pályán történő repülés sem, például sodródó körözés. Ez jelentős korlátozást jelentett a szélmérés egyes módszereinél, ugyanakkor lehetővé tette olyan mérési módszerek kidolgozását, amik kizárólag GPS alapú, földrajzi koordináták szerinti repülésnél alkalmazhatók.

#### 2. A mérések célja és lebonyolítása

Az első sikeres tesztrepülést követően elkezdődhetett a meteorológiai műszeregyüttes kiépítése. Elsődleges feladat a planetáris határréteg, illetve a troposzféra – az UAV aktuális meteorológiai körülmények között lehetséges maximális repülési magasságig történő – általános szondázása volt, mely során a légnyomás és hőmérséklet, valamint relatív páratartalom mérése mellett a szélprofil meghatározása volt a cél. Az első repülésekkor nem álltak rendelkezésre IMU (*Inertial Measurement Unit – 9 szabadsági fokú, inerciális gyorsulásmérő egység*) adatok, így a szél mérése kizárólag az  $\overline{IAS}$ (*Indicated Airspeed – Levegőhöz viszonyított sebesség*) és a  $\overline{GS}$  (*Ground Speed – Földhöz viszonyított sebesség*) sebességek egy időpontban vett értékeinek alapján ekkor nem volt megoldható. Ehhez egy teljes kör (négyzet) repülése volt szükséges az adott szinten (2.1 *ábra*).



2.1 ábra: Az alkalmazott négyzetes repülési pálya. A felső ábrán az UAV repült pályája került térbeni ábrázolásra, a magasság szerint színezve. Az alsó ábrán a repülőgép felszínhez és átlagos tengerszinthez viszonyított magasságának időbeli menete látható (2013. 11. 28./1. felszállás Szeged).

A Robotpilóta tulajdonságaihoz igazodva a négyzetes repülési pálya a későbbiekben is megmaradt, úgy hogy az egyes repülési szárak a fő égtájak irányában, a szélességi és hosszúsági körökkel párhuzamosan helyezkedtek el. Az UAV előre meghatározott koordináták érintésével repült, előre meghatározott repülési magasságokon, melyeken az emelkedési, illetve süllyedési sebességet a meteorológiai körülmények, a repülőgép aerodinamikai kialakítása valamint a hajtómű teljesítménye határozott meg. Az egyenletes emelkedő illetve süllyedő szárak között beiktatott vízszintes repülések alkalmával a műszerek válaszideje mellett az állapotváltozók esetlegesen inhomogén horizontális eloszlása is vizsgálható. Az egyes repülések általános telemetria adatai az *F.1* függelékben találhatóak. A felszállás minden esetben maximális motorteljesítménnyel történt. A repülés során mért értékek összevetésre kerültek a speciálisan az UAV üzemeltetés meteorológiai támogatására fejlesztett WRF időjárás előrejelző modell által prognosztizált értékekkel (*Gyöngyösi et al.*, 2013a).

## 3. Általános szondázás: szenzorok, eredmények, következtetések

#### 3.1 Hőmérséklet és relatív nedvesség

A repülőgépes mérések esetében, és így az UAV-vel történő méréseknél is, az intenzív emelkedési illetve süllyedési sebesség miatt szükséges a gyors reagálási idejű szenzorok alkalmazása. Kis méretük miatt a vékony fóliás, illetve fémszálas termoelemes hőmérők és a kisméretű kapacitív nedvességmérők terjedtek el (*Reuder et al.,* 2010). Amennyiben az UAV terhelhetősége megengedi, referencia mérésként "lassú" reagálású szenzorok elhelyezése is célszerű (*Kroonenberg et al.,* 2008). A tapasztalatunk azt mutatta, hogy a kisméretű "gyors" szenzorok elhelyezésénél kevésbé szükséges figyelembe venni a direkt sugárzástól való árnyékolást, azonban a "lassú" szenzorok esetében ez kiemelten fontos, ugyanis méretük miatt magának a műszerháznak is jelentős a hőkapacitása. A gyors szenzorok az erős és folyamatos áramlás mellett jelentősen kisebb érzékenységet mutattak a direkt sugárzásra (*3.2 ábra*). Ezekből kifolyólag esetünkben is két szenzor ("gyos" és "lassú" referencia) került elhelyezésre a fedélzeten (*2. táblázat*).



3.1 ábra: A mérésekhez használt BXAP15 UAV (2013. november, Szeged).

A "gyors" szenzor egy TMP102 (*Texas Instruments*) típusú termoelemes hőmérséklet szenzor, ami a gép orrészének a tetején egy levegő által szabadon átjárt műanyag műszerdobozban került elhelyezésre. Referencia szenzorként egy *Väisälä* HMP45 Humicap típusú hőmérséklet és nedvesség szenzor működött a gép orrészének jobb oldalán egy fehér árnyékoló PVC csőben (*3.1 ábra*).





3.2 ábra: TMP102 "gyors" és Väisälä HMP45 "lassú" szenzorok által mért hőmérséklet és relatív nedvesség profilok felhős (fent) és derült (lent) időben.



3.3 ábra: TMP102 "gyors" és Väisälä HMP45 "lassú" szenzorok által mért hőmérséklet és relatív nedvesség értékek időbeli menete felhős (fent) és derült (lent) időben, valamint az UAV fedélzeti és a telepített mérőrendszer (OSS) által mért légnyomás értékek.

A várakozásoknak megfelelően a *Väisälä* szenzor esetében a hőmérsékleti értékekben közel 3 perces késés jelentkezett. Emellett az árnyékolás ellenére a relatív páratartalom adatokban jelentős ingadozás figyelhető meg a műszert ért direkt sugárzás függvényében. A fluktuáció periódusideje ez esetben megegyezett a gép négyzetes pályán leírt köreinek idejével. Ezek a hibák a TMP102 "gyors" szenzornál nem jelentkeztek. Azokban az esetekben, mikor a direkt sugárzás alacsonyabb volt (felhős idő esetén) a *Väisälä* szenzor relatív hőmérsékleti hibája is lecsökkent (*3.2 és 3.3 ábra*).



Vaisala HMP45, TMP102, HIH-4030 és WRF profilok

3.4 ábra: UAV-n mért és WRF kimeneti adatok összehasonlítása hőmérséklet és relatív nedvesség értékekre a 2013. 11. 28./2. szegedi repüléskor. Az értékek 50 m-es vertikális szintekre lettek átlagolva.

A "gyors" szenzor mintavételezési sebességének köszönhetően lehetőséget teremt egyebek mellett a fel- és leáramlásokban mérhető, horizontális hőmérsékleti eltérések vizsgálatára is, így alkalmazása lassú emelkedési sebesség mellett is kifejezetten hasznos lehet. A mért értékek minden esetben összehasonlításra kerültek a WRF (*Weather Research and Forecast modell – Időjárás Kutató és Előrejelző modell*) modell által előrejelzett értékekkel (*3.4 ábra*).

Eszköz	Mért értékek	Származtatott értékek	Mintavételezés frekvenciája	Méréshatár	Átl. Mérési pontosság	Felbontás
TMP102	Hőmérséklet	,	19	-40°C - 125°C	0.5°C	0.0625°C
HIH-4030	Relatív nedvesség	·	19	0% - 100%	±3.5%	0.5%
BMP085	Légnyomás	Nyomás szerinti magasság	19	300hPa - 1100hPa	±1.0hPa	±0.2hPa
GPS uBlox 6 SPK-GPS-GS407A	ι φ, λ,	GS, TRK	4	1	I	Horiz. <2.5m
3-Axis MEMS accelerometer, 9-Axis MotionFusion	Euler-szögek (Θ,φ,ψ)		100	±16g	16384LSB/g	±16384LSB/g
HMC5883L 3-Axis digital compass with Atmega328	Mágneses szögek (MagX, MagY, MagZ)	Irányszög (HDG)	100	0-360°	1370LBS/gauss	1°
Vaisala HMP.45	Hőmérséklet		19	0 - 98%	±4.0%	1%
Vaisala HMP 45	Relatív nedvesség		19	-10 - 60°C	±0.6°C	0.1°C
Prandtl-cső	Pdin, Pstat	IAS, Nyomás szerinti magasság	100	1	1	,
5HP, HCLA 02X5EB, HCLA 12X5EU	Pdin, Pstat	IAS, Nyomás szerinti magasság, α, β	100	1	±2.5mBar	'

2. táblázat: Az UAV műszerezettsége, mért változók és a mérések pontossága.

#### 4. Szél

Bár korszerű wind-profilerekkel megoldott a troposzféra alsó tartományaiban 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 (*Szabó et al.,* 2013). A repülőgépes szélmérés komplex feladat, mely során többek között a repülőgép levegőhöz viszonyított sebességének ( $\overline{IAS}$  vagy  $\overline{TAS}$ ) és a földhöz viszonyított sebességnek ( $\overline{GS}$ ) eltéréséből számolható a szél.

Az UAV repülési tulajdonságait, és ezen keresztül az alkalmazható szélmérési módszereket, nagymértékben befolyásolja az repülőeszköz irányítása. Teljesen manuális, kézi irányítás esetén a repülési manőverek kevéssé 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, valamint korlátozott látási viszonyok között és éjszaka végzett megfigyelés. A hatótávolság növelésére az UAV-ket robotpilótával látják el. A robotpilótával történő méréskor az UAV általában előre beprogramozott, földrajzi koordináták szerint meghatározott útvonalon 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 megnőhet. Ennek kiküszöbölésére speciális robotpilótákat használnak, vagy a szélmérés során szabályos, pl. négyzetes repülési pályán repülnek (Bonin et al., 2012).

Tekintettel arra, hogy az általunk használt UAV csak sokszög alakú (a mi célunknak megfelelően négyszög) pályán történő repülésre képes, a körpályán történő repülés mellett alkalmazható szélmérési módszer áttekintése után az ilyen pályán történő szélmérési módszereket fejtjük ki bővebben.

#### 4.1 Szélmérési módszer körpályán történő repülés közben

A kutatási célokra alkalmazott kisméretű UAV-k robotpilótáinak egy része alkalmas állandó bedöntés mellett végrehajtott, stabil körpályán történő repülésre, ezért a következőkben hasonló elven, körpályán alkalmazható szélmérési módszert ismertetünk. Körpályán való repülést tesz lehetővé például az interneten keresztül szabadon elérhető, nyílt forráskódú robotpilóta program a Paparazzi is (*paparazzi.enac.fr*).



4.1 ábra: Szélbecslés a gép körönkénti elsodródásából (Cho et al., 2011).

Ilyen módszert sikerrel alkalmazták többek között, az Oklahomai Egyetem által végzett UAV méréssorozat részeként (*Bonin et al.*, 2012). Repüléskor itt a gép egy földhöz rögzített pont körül állandó távolságot tartva egy aszimmetrikus spirál pályán emelkedik. A spirál két részből áll, fél kör vízszintes repülésből, amikor a szélmérés zajlik, illetve egy emelkedési félkörből. Az egyes szinteken a szélvektorok az egymás utáni félköríves, vízszintes pályákon mért  $\overline{TAS} - \overline{GS}$  vagy  $\overline{IAS} - \overline{GS}$  sebességkülönbségek lesznek. A szél iránya azonos lesz a legnagyobb különbséghez tartozó repülési irányszöggel, sebessége azonos az eltéréssel. A körözés során a levegőhöz viszonyított sebesség ( $\overline{TAS}$  vagy  $\overline{IAS}$ ) közel állandó, a földhöz viszonyított sebesség ( $\overline{GS}$ ) szinuszosan váltakozik (első módszer).

A pontos szélbecsléshez nem szükséges egy teljes kör repülése, így a forduló második felében a repülőgép emelkedhet a következő mérési szintig. Mágneses irányszög

adatok hiányában a szélirány az aktuális érintő irányából megadható, valamelyest nagyobb hibával (*Cho et al.*, 2011).

A következő (második) módszer abban az esetben alkalmazható, amennyiben lehetséges a repülőgéppel állandó átmérőjű körök repülése a levegőhöz viszonyítva, azaz a repülőgép bedöntését a vezérlő rendszer képes stabilan azonos értéken tartani. Ekkor a körök középpontjának áthelyeződéséből, azaz az elsodródás mértékéből határozható meg a szél iránya és sebessége (*4.1 ábra*).

Állandó bedöntési szöggel végrehajtott köröző repülés során, az azonos fázisokban megfigyelt pozíció eltérések 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 elméletileg közelíthető a gép körözési szögsebességének ismeretében (*Cho et al.,* 2011). A pontos méréshez egymás után több kör repülése szükséges. A forduló körök átlagos átmérőjét úgy kell megválasztani, hogy a mért értékek valóban egy szűk területet reprezentáljanak, de arra is kell figyelni, hogy a forduló ne legyen túlzottan szűk, mert ekkor a folyamatos köröző repülés stabilitása csökkenhet, így torzulhat a repült kör alakja.

#### 4.2 Szélmérés mágneses irányszög adatok felhasználásával

A repülőgépes szélmérésnél, figyelembe véve azt, hogy a repülőgép csak a géptesthez viszonyított áramlási sebességet és irányt, valamit a földhöz viszonyított sebességet képes mérni, a szélmérés az ún. "szél-háromszög" módszeren alapszik (*Cho et al,* 2011). Ekkor a szélvektort az  $\overrightarrow{IAS}$  vagy  $\overrightarrow{TAS}$  és a  $\overrightarrow{GS}$  vektorok különbsége adja meg (4.2 ábra):

$$\overline{WS} = \overline{AS} - \overline{GS},\tag{1}$$

ahol

$$\overrightarrow{GS} = (G_x, G_y), \tag{2}$$

$$\overrightarrow{AS} = (A_x, A_y), \tag{3}$$

és

$$G_{x} = \left| \overline{GS} \right| \sin(TRK), \tag{4}$$

$$G_{\mathbf{y}} = \left| \overline{GS} \right| \cos \left( TRK \right), \tag{5}$$

$$A_{x} = \left| \overline{AS} \right| \sin(HDG), \tag{6}$$

$$A_{y} = \left| \overline{AS} \right| \cos(HDG), \tag{7}$$



4.2 ábra Szél-háromszög. A <u>GS</u>, <u>AS</u>, <u>WS</u> rendre a földre vetített, levegőhöz viszonyított sebességvektorok és a szélsebesség vektor. D a sodródási és β a támadási szögek. A wdir a szélvektor északi iránnyal bezárt szöge.

ahol *TRK* (*Track*) a repülési pálya földre vetített érintőjének északi iránnyal bezárt szöge, *HDG* (*Heading*) a repülőgép hossztengely irányának az északi iránnyal bezárt szöge. A módszer során a földrajzi koordináták változásából számolt földhöz viszonyított sebesség ( $\overrightarrow{GS}$ ) és irányszög (*TRK*), valamint a Prandtl-cső nyomásadataiból származtatott szélsebesség ( $\overrightarrow{TAS}$  vagy  $\overrightarrow{IAS}$ ) és az UAV irányszögének (*HDG*) ismerete szükséges. (A vektorok irányát minden esetben földhöz rögzített koordináta-rendszerben értelmezzük úgy, hogy a vektorok vertikális komponenseit elhanyagolható mértékűnek tekintjük.)

A rövid, néhány másodpercig hatást gyakorló turbulens örvényeket leszámítva az áramlás párhuzamos a gép hossztengelyével, így az irányszög adatot a 3 tengelyű mágneses iránytű szolgáltathatja. Az irányszög 0° és 360° közt változik, és a meteorológiában bevett gyakorlattal szemben itt az aktuális repülési irányt (égtájat) jelöli: 0° az északi, 90° a keleti, 180 ° a déli, míg a 270° a nyugati iránynak felel meg. Az irányszög (*HDG*) és a haladási irány (*TRK*) különbsége a sodródási szög (*D*), továbbá a  $\beta$  az oldalirányú támadási szög, ami normál viszonyok melletti repülésnél elhanyagolható ( $\beta = 0$ ) (4.2 ábra). Ennél a módszernél a szél már állandó irányon történő repülés esetén is meghatározható, de a tapasztalatunk azt mutatja, hogy a lehetséges hibák kiátlagolása miatt több, egymást követő, egymástól eltérő irányban végrehajtott repülési szakasz adatainak együttes figyelembevétele ajánlott.

A módszer nagy vertikális és horizontális felbontással képes szél adatokat nyújtani, azonban a kapott adatok szórása a mágneses irányszög adatok érzékenysége miatt jelentősen megnőhet (4.4–4.5 ábrák). A mágneses adatokban jelentkező hiba oka valószínűleg az elektromos motor és a mágneses szenzor kölcsönhatásában keresendő. Az UAV meghajtásáról gondoskodó elektromos motor áramfelvétele emelkedéskor esetünkben többször is meghaladta a 35 A-t, ami jelentős mágneses teret létrehozva mind a GPS, mind a mágneses adatok elvesztését okozta.

Az irányszög adatok szórása bizonyos esetekben meghaladta a 90°-ot ezáltal 45° feletti, elméletileg is irreális TRK - HDG eltérést okozva (4.3 *ábra*). A mágneses adatok sok esetben motor nélkül ereszkedő, sikló repülések során is hibával terheltek voltak, így a módszernél elengedhetetlen volt a megfelelő szűrők alkalmazása. A tapasztalatok azonban azt mutatják, hogy az irányszög adatok átlaga pontosan adja vissza a valós *HDG* értékeket, a hiba nem szisztematikus.



4.3 ábra: Az UAV áramfelvétele (bal) és mágneses irányszög adat (HDG) időbeni menete (jobb) a 2013. 11. 28./2. szegedi repüléskor.



4.4 ábra: U és V szélkomponens párok teljes repülésre, illetve a süllyedési (siklási) szakaszon, a magasság függvényében színezve. A teljes szakaszon tapasztalható hibát az emelkedéskor, a motor intenzív áramfelvétele miatt kialakuló erős mágneses tér okozza (2013.11.27./2. felszállás).



4.5 ábra: Egyedi mérési adatok és az 50m-es vertikális rétegekre átlagolt U és V szélkomponens értékek a magasság függvényében (2013.11.28./2. felszállás).

A módszer gyakorlati alkalmazása során a 4 Hz időbeli felbontással rendelkezésre álló adatokon 5 másodperces mozgóátlagolást végeztünk. Az OSS (*Onboard Sensor System – Telepített fedélzeti szenzorrendszer*) és az UAV fedélzeti  $\overrightarrow{IAS}$  értékeire külön-külön szélprofilokat készítettünk. Előbbinél a teljes, utóbbinál a süllyedő szakaszokra, álló motornál. A kapott értékeket 50 m-es vertikális rétegekre átlagolva határoztuk meg a szélprofilt.

Összességében elmondható, hogy a módszer bármilyen repülési stratégia esetében, nagy idő és térbeli felbontással alkalmazható, azonban nagy teljesítményű elektromos meghajtású repülőgépeken a mágneses szenzor motor általi zavarásának valamilyen módon való kiküszöbölését követeli meg.

## 4.3 Sebességkülönbséges módszerek mágneses irányszög adatok felhasználása nélkül

A nemzetközi szakirodalomban fellelhető eseteknél a repülési adatokból származtatott helyzet meghatározásos módszerén kívül (Cho et al., 2011) minden esetben mágneses irányszög adatok használatával történt a szélmeghatározás. Esetünkben azonban a motor nagy áramfelvételének hatására kialakuló mágneses zaj miatt olyan módszerek kidolgozásának lehetőségét is megvizsgáltuk, amelyeknél ezen adat használata nélkülözhető. Amennyiben az UAV meteorológiai mérőrendszere nem rendelkezik mágneses irányszög adatokat regisztrálni képes műszerrel, úgy a szél meghatározásához legalább két, egymással (ideális esetben 90 fokos) szöget bezáró pályán történő repülés szükséges. A gyakorlatban ez egy négyzetes pályán történő repülést jelent, ahol vagy minden száron, vagy csak egy kiválasztott száron történik az emelkedés. A helyzetszögek ismeretében folyamatos emelkedés mellett a nullától különböző támadási szög következtében fellépő  $\overrightarrow{IAS}$  eltérések korrekciója megoldható, illetve amennyiben az emelkedés csak egy száron történik, úgy ezen szár adatainak elhanyagolásával a hiba szintén kiszűrhető. Ilyen négyzetes repülési stratégia esetén több, különböző pontossággal használható szélmérési módszer is alkalmazható, melyeket a következőekben részletesen ismertetünk.

#### 4.3.1 Földfelszínre vetített sebességkülönbséges (GS – GS) módszer

A módszer során a szélbecsléshez kizárólag a szárankénti  $\overline{GS}$  adatok kerültek felhasználásra. Az *IAS* sebességet állandónak tekintve az U és V szélkomponenseket az egymással párhuzamos szárakon mért  $\overline{GS}$  magnitúdó különbségek adták.

$$U = GS(E) - GS(W), \tag{8}$$

$$V = GS(N) - GS(S), \tag{9}$$

ahol E (kelet), W (nyugat), N (észak), S (dél), a repülési irányt jelölik égtájak szerint. A módszer erősen hibával terhelt több okból is. Bár az UAV robotpilótája úgy volt programozva, hogy a repülés stabilitása szempontjából egy ideális tartományon belül tartsa az *IAS*-t, az 5 m/s körüli, vagy az azt meghaladó eltérések mégis előfordultak. Ez az átlagos *IAS*-től vett eltérés mértékével azonos hibát adhatott a becsült szélkomponensekben.



4.6 ábra Az: IAS időbeni menete (bal) és a földre vetített repülési pálya koordináta-pontok szerint (TRK), a délkeleti fordulónál (jobb). Látható hogy az IAS nem konstans repülés közben, továbbá hogy a fordulópont érintését követő erős kilengés tapasztalható a repülőgép útvonalában. A repülés Nyugat – Kelet, majd Dél – Észak irányban történt (2013.11.28./2. felszállás).

A fordulókat követően az adott szár első szakaszában a  $\overline{GS}$  sebesség erősen ingadozott addig, míg az UAV stabilizáta a repülési pályát (4.6 *ábra*). Ennek kiküszöbölésére a teljes szárra vonatkozó átlagos  $\overline{GS}$  sebességek használatát alkalmaztuk. Az egyes mért értékek a repült négyzetek teljes vertikális tartományára vonatkozóan kerültek megjelenítésre (4.7 *ábra*).

Az azonos magasságokban megjelenő eltérő értékek abból kifolyólag jelenhetnek meg, hogy a módszerrel eltérő irányú vagy sebességű szél lett meghatározva az emelkedési és a süllyedési szakaszon. Ennek oka legtöbbször a repülés közben fellépő szélirány- és sebesség változás.



4.7 ábra: GS — GS módszerrel számolt, fordulónként átlagolt U és V sebességkomponens értékek időbeni menete (felül) és magasság szerinti változása (2013. 11. 27./3. felszállás, Szeged).

## 4.3.2 Földre vetített és levegőhöz viszonyított sebességkülönbségen alapuló ( $\overrightarrow{GS} - \overrightarrow{AS}$ ) módszer

A módszer során az egyes szélkomponenseket az adott pályán mért  $\overline{GS}$  és adott irányra vett  $\overline{AS}$  (Airspeed – Levegőhöz viszonyított sebesség [ $\overline{IAS}$  vagy  $\overline{TAS}$ ]) komponens különbsége adja meg. Bár a pontos irányszög ismerete nélkül nem lehet tudni a mért  $\overline{AS}$ érték adott irányra eső komponensének pontos értékét, azonban az előző szár adataiból következtetni lehet arra, amennyiben feltételezzük, hogy a szél egy teljes kör megtétele alatt változatlan. Az oldalszél komponens így az előző száron mért  $\overline{GS} - \overline{AS}$  különbség lesz. A megfelelő oldalszél komponens ismeretében az adott száron mért  $\overline{AS}$ -ből már könnyen megadható az aktuális szárra vonatkozó komponens ( $A_x$ ,  $A_y$ ) is a Pitagorasz-tétel felhasználásával. A repülés során az első szárnál az adott irányú komponenst a  $\overline{GS} - \overline{AS}$  különbséggel közelítettük, például:

$$U = \overline{GS}(W) - A_{\chi}(W), \tag{10}$$

ahol

$$A_x^2(W) = \overrightarrow{AS}^2(W) - A_y^2(N) = \overrightarrow{AS}^2(w) - V^2, \qquad (11)$$

és

$$V = \overrightarrow{GS}(S) - A_{\nu}(S), \tag{12}$$

majd hasonló módon folytatva a sort.

A módszer előnye, hogy mágneses irányszög adatok hiányában is becslést ad az  $\overline{AS}$  oldalirányú komponenseire, így a sodródásból adódó hiba jelentősen csökken. A módszer pontossága azonos szinten repülve állandó szélsebesség mellett a repült négyzetek számával nő. Jelen módszernél elméletben már nem szükséges egy teljes négyzet repülése, a szélbecsléshez elegendő két, egymásra merőleges száron végzett repülés, azonos szinten. A kapott értékek változékonyságát a *4.8 ábra* szemlélteti.



4.8 ábra: GS – AS különbséges módszerrel számolt U és V szélkomponens értékek időbeli és magasság szerinti változása. Hibás adatok észlelése esetén a megjelenítésnél a következő érvényes adatig a legutolsó, jó érték került megjelenítésre (2013. 11. 27./3. felszállás, Szeged).

Az UAV-vel történő szélmeghatározásnál végül ennek a módszernek az eredményét alkalmaztuk, tekintettel arra hogy az 50 m-es szintekre vett átlagok esetében ennél a módszernél volt a legkisebb az becsült értékek szórása. A módszer pontosságáról a következő fejezetben található összehasonlításban részletesebb képet kaphatunk.

### 5. Szélmérési módszerek összehasonlítása előrejelzett és mért értékekkel

A következőekben az egyes módszerekkel mért, és előrejelzett szélprofilok együttes elemzését ismertetjük. Az összehasonlításban három, az UAV-n alkalmazott szélmérési módszer eredményei, továbbá SODAR (Sonic Detection and Ranging) mérési és WRF előrejelzett adatai szerepelnek, 50 m-es magassági rétegekre átlagolva. Az összehasonlítást az öt szegedi repülés adataira végeztük el, ezek közül kettő kerül bemutatásra (az első szegedi, 2013.11.27./1. és az utolsó szegedi 2013.11.28./3.). A repülések adatai a F.1 függelékben találhatóak. Az UAV-n alkalmazott módszerek közül a  $\overrightarrow{GS} - \overrightarrow{AS}$  módszer valamint a mágneses irányszög adatok felhasználásával történt  $\overrightarrow{GS} - \overrightarrow{AS}$ szélbecslési módok együttes vizsgálata történt meg. A mágneses adatokat használó  $\overrightarrow{GS} - \overrightarrow{AS}$  módszernél külön szélmeghatározás történt az UAV fedélzeti és az telepített mérőrendszer adataiból is, hiszen mind az UAV mind az OSS (telepített fedélzeti szenzorrendszer) saját mágneses irányszög és  $\overrightarrow{IAS}$  adatokkal rendelkezett. Az összehasonlítás során szisztematikus hiba egyik módszer esetében sem jelent meg, a szignifikáns szélnyírást mutató rétegek mindegyik módszer esetében jól elkülöníthetőek. Az egyes módszerek által azonos magasságra vonatkozó értékei közt az átlagos szórás meglehetősen nagy, közel 5 m/s mértékű, azonban ez nem feltétlenül jelenti azt, hogy valamelyik alkalmazhatósága megkérdőjelezendő, tekintettel arra, hogy a módszerek működéséből adódóan eltérőek az átlagolási időléptékek. Természetesen azt sem lehet kijelenteni, hogy a kapott szórás kizárólag az alkalmazott időlépcső következtében jelenik meg, feltételezhető hogy a fellépő mágneses zavarás a szűrés ellenére is megjelent az adatsorban. A SODAR adatok referencia értékként való használhatóságát korlátozza, hogy ilyen adatok maximum 500 m-es magasságig érhetőek el.

A várakozásoknak megfelelően a WRF az erős szélirány változáshoz tartozó magasságokat, valamint a vékony rétegben jelentkező erős nyírásokat kevésbé tudta prognosztizálni, ami várható is, tekintettel a modell vertikális felbontására, az alkalmazott bemenő adatokra és parametrizációs eljárásokra. A szélsebességet főként az 1000 m alatti tartományban az esetek egy részében a modell alulbecsülte (*5.1 ábra*). A mágneses adatok felhasználásával mért értékek közül az OSS adataiból származtatott adatok szórása magasabb, annak köszönhetően, hogy itt az emelkedő repüléshez tartozó pályaszakaszon mért értékek is felhasználásra kerültek. Ebből kifolyólag itt az emelkedés és süllyedési

28

szakaszok közt esetlegesen bekövetkezett változások hatása is megjelenik. A mágneses adatokat felhasználó (MAG\_UAV és MAG\_OSS) módszerekkel meghatározott értékek egyaránt tág határok közt mozognak, azonban a két profil jelentősebb kilengések esetén is szorosan követi egymást.



5.1 ábra: Mért és előrejelzett szélkomponensek az első szegedi repüléskor (2013.11.27./1.). Az U komponens esetében a  $\overrightarrow{GS} - \overrightarrow{AS}$ , V esetében a mágneses adatot felhasználó (MAG) módszerek futnak jobban együtt a SODAR eredményeivel. A MAG\_UAV a repülőgép fedélzeti mágneses adataiból, míg a MAG\_OSS a telepített mérőrendszer mágneses adataiból számolt sebességeket jelentik.



5.2 ábra: Mért és előrejelzett szélkomponens profilok az ötödik szegedi repüléskor (2013. 11. 28./2.). A mágneses adatokat felhasználó (MAG\_OSS és a MAG\_UAV) módszereknél erősebb ingadozás figyelhető meg V komponens esetében. Az 1500m magasságában jelenlévő szélfordulást mindegyik módszer jól érzékelte.

Ez arra enged következtetni, hogy ezek az eltérések nem véletlenszerű hibák az adatsorban, hanem mindkét műszerre egyszerre hatást gyakorló zajból kifolyólag jelentek meg. A mágneses adatokat felhasználó (MAG\_UAV és MAG\_OSS) módszereknél a legnagyobb hiba az alsó 200 m-es rétegben jelentkezett, aminek oka feltehetőleg a leszállás utolsó szakaszában történő kézi vezérlésre való áttérés, amely során a repülés karakterisztikája jelentősen megváltozik, élesebb, nagyobb bedöntésű fordulók és megnövekedett *IAS* fordul elő (*5.2 ábra*).

Összességében elmondható, hogy a modell által előrejelzett szélprofilhoz képest az UAV-vel mért értékek jelentős információtöbblettel rendelkeznek. Függetlenül a használt módszertől, a jelentős nyírási felületek jól elkülöníthetőek.

#### 6. Turbulencia és vertikális áramlások mérése

A termikus vagy orografikus hatásra létrejött feláramlások pontos ismeretére számos esetben szükség van. Míg az orografikus adottságok következtében kialakuló kényszerfeláramlások jól modellezhetők, addig a mikro skálájú folyamatok következtében létrejött, főként izolált, termikus konvektív cellák, "termikek" pontos helyének és méretének a meghatározása operatív előrejelző modellekkel jelenleg nem megvalósítható. Előfordulhat azonban olyan helyzet, ahol az ilyen egyedi feláramlási rendszerek megfigyelésére is szükség van, továbbá kiemelten fontos a troposzféra alsó 1000 m-es vastagságában zajló folyamatok részletes ismerete.

Ilyen helyzet lehet például egy baleset következtében, pontszerű forrásból származó szennyezőanyag terjedésének a modellezése is. A lokális, a kibocsátási pont néhány km-es körzetében bekövetkező szennyezőanyag terjedést leíró modellekben a légköri stabilitás általában a felszínhőmérsékleten és a turbulens kinetikus energia értékein keresztül vizsgálható, amit jelentős mértékben befolyásolnak a helyi terepviszonyok és a szinoptikus skálájú folyamatok kölcsönhatásai (Leélőssy, 2012). A lokális skálájú szennyezőanyag terjedési modellek esetében a peremfeltételt általában egyetlen mezoskálájú modell rácsponti értéke vagy mérési értékek adják. Tekintettel arra, hogy a modellek pont az alsó néhány száz méteres rétegtartományt írják le legnagyobb hibával, továbbá hogy a földfelszíni mérésekből, közelítésekkel számolható vertikális profilok a valóságot szintén pontatlanul közelítik, a terjedés pontos modellezésében nagy segítséget tud nyújtani egy teljes körű, a kibocsátási pontban rendelkezésre álló vertikális szondázási adatsor, ami nagy felbontással tud az általánosan mért meteorológiai változók mellett a konventív feláramlásra és a turbulens átkeveredés mértékére is pontos információval szolgálni.

A terjedési és időjárás előrejelzési modellek bemeneti adatainak pontosítása nem az egyetlen felhasználási lehetősége a légköri konvekció és turbulencia méréseknek. Tekintettel arra, hogy mindkét jelenség potenciális veszélyt jelenthet mind a pilótanélküli, mind a pilótás repülésre, e jelenségek előrejelzése kiemelt szerepet kap a repülésmeteorológiában. Komplexitásuk és karakterisztikus méretük miatt mindkét jelenség parametrizáció révén kerül a modellek kimeneti produktumai közé. Ebből kifolyólag elengedhetetlen verifikációjuk, ami kizárólag méréseken keresztül oldható meg.

31

#### 6.1 Vertikális áramlás detektálása

#### 6.1.1 Az "Energia módszer" használatának előzményei

A merevszárnyas pilóta nélküli repülőgépek elterjedésével előtérbe került azok hatásfokának és hatótávolságának a növelésének a kérdése. Több olyan módszer is kidolgozásra került, amely a tervezett repülési útvonal környezetében várható áramlási viszonyok függvényében megadja azokat az útvonalakat, ahol minimálisra csökkenthető a szükséges motor által befektetett energia, például *Langelaan*, (2007):

$$E_{engine} = \int_{t=0}^{t} P_{engine} (U, I) dt = min$$
(13)

A módszer alapvetően három alegységre osztható. Abban az esetben, amikor a légkörben a tervezett útvonalon nincsenek jelen a repülőgép számára hasonítható konvektív illetve orografikus feláramlások, a hatótávolságot főként a horizontális áramlási mező eloszlásának a figyelembevételével lehet optimalizálni. Ilyen esetben szükség van az adott terület teljes áramlási mezejének az ismeretére, amit numerikus előrejelzési produktumok biztosítanak. Ekkor az áramlási mező ismeretében az ideális útvonalat többek között Markov döntési folyamattal lehet optimalizálni (*Al-Sabban et al.,* 2013). Jelen módszernél nincs mód a repülés közben mért adatok repülés optimalizálási feladatokra történő felhasználására, így az áramlási mező pontos és megfelelően nagy felbontású előrejelzése elengedhetetlenül fontos. A módszer emellett csak csekély mértékben alkalmas kisméretű UAV-k által végrehajtott rövidtávú (1-10 km) repülések megfelelő útvonal optimalizálásához, hiszen ezen légijárművek esetében a megfelelő magasság elérése több energiát emésztene fel, mint amennyi a módszerrel nyerhető. A módszer természetesen alkalmazható 2D illetve 3D áramlási mező ismeretében is.

Amennyiben a tervezett repülési útvonal környezetében a domborzati viszonyok lehetővé teszik a gravitációs hullámok létrejöttét, úgy érdemes ezzel is számolni az útvonal tervezésénél. Az orografikus hatások miatt létrejövő vertikális áramlások kialakulása általában a nagytérségű áramlási mezővel és a hőmérsékleti rétegzettséggel van szoros kapcsolatban, amik numerikus előrejelző modellekkel általában jól prognosztizálhatóak. Ez lehetővé teszi a módszer alkalmazhatóságát akkor is, amikor nem állnak rendelkezésre a repülés közben in-situ mérési adatok a vertikális áramlásokról, illetve amikor az UAV nem képes repülés közbeni útvonal újratervezésre. A módszer a domborzati viszonyoktól függően alkalmas rövid és hosszú távú repülések optimalizálásához is (*Al-Sabban et al.*, 2013).

Előfordulhat azonban olyan helyzet is, amikor sík terep fölött, rövidtávú repülések energiafelhasználását kell minimalizálni. Ekkor kizárólag a termikus feláramlások energiájának a felhasználása lehetséges. Az ilyen termikek pontos helyének és intenzitásának az előrejelzése a folyamatot meghatározó tényezők komplexitása miatt gyakorlatilag kivitelezhetetlen, így a feláramlási zónák detektálása kizárólag a repülés közbeni in-situ mért adatokból történhet. Ennek egyik módszere a *6.2 fejezetben* részletesebben említésre kerülő 5HP (*Five Hole Probe – Ötlyukú torlónyomásmérő szonda*) szenzor segítségével történő 3D szélvektor meghatározás (*Kroonenberg et al.,* 2013). Előnye a jobb időbeli felbontás, hátránya viszont hogy elengedhetetlen hozzá a "sérülékeny" IMU és mágneses irányszög adatok használata, emellett kiemelten fontos a szonda precíz elhelyezése és a megfelelő kalibrálása is.

Ezzel szemben az "energia módszernél" elegendő a repülőgép fedélzeti, dinamikus és egy statikus nyomási adatot szolgáltató Prandtl-cső adatainak használata, ami az esetleges hőmérsékleti adatok figyelembetételével  $\overline{TAS}$  illetve  $\overline{IAS}$  sebességet szolgáltat. (A méréseink során  $\overline{IAS}$ -vel dolgoztunk, tekintettel arra, hogy a súrlódási veszteség az  $\overline{IAS}$ és nem a  $\overline{TAS}$  függvénye). A módszerhez emellett a földrajzi koordináták ismerete szükséges. A módszert a következőekben mutatjuk be.

#### 6.1.2 UAV energetikája és az "Energia módszer"

Repülés közben az UAV, mint minden mozgó szilárd test rendelkezik kinetikus  $(E_{kin})$  és pontenciális  $(E_{pot})$  energiával (*Langelaan*, 2007).

$$E_{pot} = mgh \tag{14}$$

$$E_{kin} = \frac{1}{2}m(IAS^2) \tag{15}$$

Esetünkben a kinetikus energiát a levegőhöz viszonyított koordináta-rendszerben, *IAS*-ből számoltuk, mivel az UAV robotpilóta esetében egy adott tartományba eső *IAS* szerint repült, megközelítőleg 20 m/s-os átlagsebesség mellett. Az *IAS* felhasználásával a horizontális szélkomponensek hatása kiküszöbölhető, ezzel szemben a *GS* használatánál a horizontális és a vertikális áramlások által hozzáadott energia nem lenne elkülöníthető. Az UAV teljes energiáját a kinetikus és a potenciális energia összege mellett a fedélzeten "tárolt" elektromos energia is képezi. Ennek pontos becslésére nincs lehetőség, így a motor által időegység alatt hozzáadott energiát ( $P_{engine}$ ) a motort tápláló akkumulátor feszültségéből és a motor által felvett áramból számoltuk.

$$P_{engine} = U \cdot I \tag{16}$$

ahol U a feszültség és I a motor által felvett áram. A vertikális áramlás időegységre jutó teljes energiáját ( $P_{total}$ ) az időegységre jutó potenciális és kinetikus energia, valamint a motorteljesítmény előjeles összege adja meg.

$$P_{total} = \frac{\Delta E_{pot}}{\Delta t} + \frac{\Delta E_{kin}}{\Delta t} - P_{engine} = P_{pot} + P_{kin} - P_{engine}$$
(17)

A súrlódási veszteség ( $IAS \cdot C_{drag}$ ) levonása és a motorteljesítmény hatásfok korrekciója ( $P_{engine} \cdot C_E$ ) után a korrigált teljes teljesítmény ( $P_{korr}$ ) megadja a vertikális áramlások által hozzáadott energiát:

$$P_{korr} = P_{pot} + P_{kin} - P_{engine} \cdot C_E - IAS \cdot C_{drag}$$
(18)

ahol  $C_E$  a motor által hozzáadott teljesítményre vonatkozó korrekciós együttható,  $C_{drag}$  a súrlódásból következő teljesítményveszteségre vonatkozó együttható. Ez az érték csak akkor lehet pozitív, ha az UAV motor által hozzáadott energia nélkül tesz szert potenciális vagy kinetikus energia növekedésre. Ezt feláramlások segítségével érheti el. Mivel a robotpilóta úgy lett programozva, hogy az  $\overline{IAS}$  mértékét egy szűk tartományon belül tartsa, erőteljes feláramlásba repülés esetén elsőnek a potenciális, majd később kismértékben a kinetikus energia növekedésében figyelhető meg a vertikális áramlás jelenléte.

A feláramlás pontos sebességének a meghatározásához szükséges ismerni az UAV függőleges tengelyére vett súrlódási együtthatóját is. Ez függ a levegő sűrűségétől, a vertikális áramlás sebességétől, továbbá a géptest x, y síkra vett vetületétől is, ami a bólintási és dőlési szögek függvényében változik (*6.1 ábra*). Ekkor a  $C_V$  vertikális súrlódási együttható egy többdimenziós n-ed rendű polinomként áll elő. A méréseink során nem volt lehetőség ennek a kimérésére, azonban a négyzetes repülési pályának köszönhetően a mért értékek jelentős részében maximális x, y síkra vett vetülettel számolhattunk, hiszen így az UAV a repülés jelentős részében egyenes vonalon, fordulónál szükséges mértékű bedöntés nélkül repült, azaz a vertikális súrlódás mértéke a fordulók kivételével közel állandó volt.

A repülés közben detektált feláramlás és a repülési pálya ismeretében az egyes feláramlási zónák helyének és méretének a meghatározására számos módszert dolgoztak ki pl. *Liu et al.* (2013) *és Tendolkar*, (2013). Ehhez több termikmodellt is létrehoztak (*Allen*, 2005). A feláramlási zónák méretének, intenzitásának és helyének, valamint a horizontális szélmező ismeretében lehetőség nyílik a termikek követésére, és ez által a potenciális vagy a kinetikus energia növelésére. Jelen munkának nem célja erre részleteiben kitérni, azonban a módszer kidolgozása további fejlesztési irányt jelöl ki.

#### 6.1.3 UAV-re vonatkozó mozgásegyenletek és szükséges korrekciók

Ahogy azt az előzőekben láttuk, a pilótanélküli repülőgépeknél az robotpilótával történő repüléshez használt eszközök segítségével is lehetséges a fel- és leáramlási zónák elkülönítése. Ahhoz hogy az észlelt feláramlások intenzitásáról és sebességéről kvantitatív információt is kaphassunk szükséges a gép helyzetének az ismerete is, amit egy IMU egység szolgáltathat. A motorteljesítmény ismeretében a feláramlási részek detektálásának a lehetősége a siklási szakaszokon kívül a motoros repülési szakaszokra is kibővíthető. Az így nyert adatok már nem csak a repülésre fordított energia csökkentésénél használhatóak fel, hanem horizontálisan pásztázó, ("fregoli repülési pálya") repülés során a teljes 3D áramlási viszonyok is előállíthatóak egy adott terület felett (*Reuder et al.,* 2010). Ez kiegészítő mérésekkel együtt, mint például hőmérséklet és relatív páratartalom mérés, a vertikális energiaáram tulajdonságairól is szolgáltathat információt.

Az előzőekben felsorolt egységek által nyújtott adatokból az UAV általános kinematikája földhöz rögzített koordináta-rendszerben a következő módon nyerhető *Chakrabarty és Lanelaan*, (2009) nyomán:

$$\dot{x} = IAS\cos\gamma\cos HDG + U, \tag{19}$$

$$\dot{y} = IAS\cos\gamma\sin HDG + V, \tag{20}$$

$$\dot{z} = IAS\sin\gamma + W,\tag{21}$$

ahol *IAS* a repülőgép levegőhöz viszonyított sebessége,  $\gamma$  a gép bólintási szöge *HDG* az irányszög továbbá *U*, *V W*, rendre a szél sebességkomponensei. Esetünkben az alapáramlás sebességkomponensei irrelevánsak, hiszen a repülőgép teljes kinetikus energiáját a légtömeghez viszonyított koordináta-rendszerben vizsgáljuk. A potenciális energia értelemszerűen szintén független a szélmezőtől.

A repülőgépre ható, repülési pályára merőleges és párhuzamos erők alapján a  $\gamma$  bólintási szög megadható a (*Langelaan*, 2007)

$$mg\cos\gamma = L + T\sin\alpha , \qquad (22)$$

$$mg\sin\gamma = D - T\cos\alpha , \qquad (23)$$
összefüggésekből, ahol *m* a gép tömege, *g* a nehézségi gyorsulás, *L* a felhajtóerő, *D* a súrlódási erő, *T* a motor által hozzáadott tolóerő és  $\alpha$  az áramlás vertikális támadási szöge a gép hossztengelyére (6.1 ábra).



6.1 ábra: A gépre ható erők (Langelaan, 2007).

Ez alapján az áramlási szögek kifejezhetőek a

$$\cos \gamma = \frac{\rho IAS^2 S}{mg} (C_L + C_T \sin \alpha), \qquad (24)$$

$$\sin \gamma = \frac{\rho IAS^2 S}{mg} (C_D + C_T \cos \alpha), \tag{25}$$

egyenletekből, ahol  $\rho$  a levegő sűrűsége, *S* a szárnyfelület, *m* az UAV tömege, *g* a nehézségi gyorsulás, *IAS* a levegőhöz viszonyított sebesség nagysága, *C<sub>L</sub>* a felhajtóerő együttható, *C<sub>T</sub>* a vonóerő együttható és  $\alpha$  az áramlás UAV hossztengelyére vett vertikális támadási szöge. Feltételezve hogy a bólintási szög elhanyagolhatóan kicsi, sin  $\gamma \approx 0$  és cos  $\gamma \approx 1$  értékeket vesznek fel. Továbbiakban azzal a feltételezéssel is élhetünk, hogy a *C<sub>T</sub>* sin  $\alpha$  *C<sub>L</sub>*-hez viszonyítva elhanyagolható az  $\alpha$  szög a kis értéke miatt. Az egyszerűsítéseket elvégezve:

$$mg = L = \frac{1}{2}\rho(IAS^2)SC_L , \qquad (26)$$

majd az egyenletet átrendezve az emelési együtthatóra a

$$C_L = \frac{2mg}{\rho(IAS^2)S} \tag{27}$$

összefüggést kapjuk (Langelaan, 2007).

A gép súrlódási együtthatója a felhajtóerő együttható függvényében egy egyszerű polinommal közelíthető:

$$C_D = \sum_{i=0}^n a_i C_L^i \,, \tag{28}$$

ahol  $a_i$  a polinom tagjainak szorzói. Méréseink során azt tapasztaltuk, hogy kis (5– 10 km/h-át átfogó) sebességtartományok esetében az UAV, mint rendszer teljes energiájának a repülés közbeni, súrlódásból eredő csökkenése, azaz a súrlódási veszteség (*IAS* ·  $C_{drag}$ ), az  $\overrightarrow{IAS}$  mértékének függvényében jelentős változékonyságot mutat, még a sebesség adatok 5 s-os mozgóátlagolása mellett is.

Ilyen kis sebességtartományok esetében a súrlódási veszteség, levegőhöz viszonyított sebesség szerinti függése, azaz a súrlódási veszteségfüggvény ( $c_{drag}$ ) közel lineáris regressziót mutat kis, (0,5 körüli)  $R^2$  értékek mellett. Ebből kifolyólag méréseinknél a súrlódási veszteségfüggvény meghatározása repülési adatok alapján történt, neutrális illetve stabil légrétegződés esetén, sík terepviszonyok felett, kikapcsolt motor mellett. Ennek során a siklási repülési szakaszokban vizsgáltuk úgy, az egyes szárakon mért értékeket száranként átlagoltuk, majd az így kapott *IAS* értékeket vizsgáltuk a hasonló módon szűrt teljesítményveszteség értékekkel. Szükséges megjegyezni, hogy az így kapott korrekciós függvény alkalmazása után előállt, korrigált emelési teljesítmény értékek esetében is a végső kiértékelésnél minden esetben 5 másodperces mozgó átlagokkal dolgoztunk, kiküszöbölve ezzel a pillanatnyi mérési pontatlanságokból adódó zajt, ami néhány esetben nagyságrendileg összemérhetőnek bizonyult a feláramlások okozta érékekkel (*6.2 ábra*). A mért értékekre lineáris trend illesztése történt (*6.3 ábra*).



6.3 ábra: Lesiklási szakaszon mért teljes teljesítményveszteség az IAS nagyságának függvényében, a fordulási szakaszok levonásával és a repülési szárakon mért értékek kiátlagolásával (alul) valamint a szűrés nélküli nyers eredmények (felül). Látható hogy az áramlás lökésessége következtében kis arányban pozitív értékek is előfordulhatnak, így szükséges az adatok átlagolása. (2013. 11. 28./2. felszállás, Szeged).

Fontos megjegyezni, hogy ebben a sebességtartományban a lineáris trend determinációs együtthatója ( $R^2$ ) kifejezetten alacsony, 0,53-nak adódott, és ez az érték másodfokú polinomiális trend esetében sem nem változott. A korrekció a robotpilóta által repült szakaszokon megfelelőnek bizonyult, kis hibát mindössze a leszállást megelőző



rövid szakaszon lehetett tapasztalni, ahol a kézi irányítás következtében rövid ideig jelentős sebességnövekedés és élesebb manőverek előfordultak.

6.2 ábra: Átlagolás nélküli (bal) és 5 másodperces mozgó átlagolt (jobb) vertikális áramlási teljesítmény értékek 1 Hz-es felbontással (2013. 11. 28./2. felszállás, Szeged).

A súrlódási veszteség figyelembe vétele mellett további korrekciók bevezetésére is szükség van, ugyanis a motor által leadott teljesítménynek csak kevesebb mind negyede alakul át kinetikus illetve potenciális energiává. Mind a motornak mind a légcsavarnak van egy áramfelvételtől, feszültségtől, levegő sűrűségtől és fordulatszámtól függő, nemlineáris hatásfok görbéje. Ennek a pontos kimérése kifejezetten nehéz feladat, így a motor hatásfokát szintén egy neutrális, feláramlásoktól mentes időjárási körülmények közt lezajlott repülés közben mért adatok segítségével határoztuk meg. A súrlódási energiaveszteség levonása után tapasztalható energiaveszteséget a motorteljesítmény függvényében egy harmadfokú polinommal közelítettük, ami megadja a hozzávetőleges energiaveszteséget a teljesítmény függvényében. A polinomra a  $f(x) = 0,388x^3 - 4,4 \cdot 10^{-3}x^2 - 4,6 \cdot 10^{-7}x - 1,35$  függvényt kaptuk. (6.4 ábra).

Természetesen ez az érték nem pontos a levegő sűrűségének és a teljesítményfordulatszám kapcsolatának az ismerete nélkül, azonban a hiba általában kisebb, mint a felés leáramlásokból tapasztalható nyereség illetve veszteség, így a fel- és leáramlási zónák elkülönítésénél a mérések többségénél nem okozott jelentős zavaró hatást (*6.5 ábra*).



6.4 ábra: A súrlódási veszteség levonása után kapott teljesítmény-veszteség értékek az elméleti motorteljesítmény ( $P_{engine}$ ) függvényében, valamint az értékpárokra illesztett harmadfokú polinom, mint korrekciós függvény ( $C_E$ ) (2013.11.28./2. felszállás adatai).



6.5 ábra 5 s-os mozgóátlagolt teljesítmény értékek a meghajtás hatásfoka következtében fellépő csökkenés hozzáadása előtt (bal) és után (jobb) (Szeged, 2013.11.27./3. felszállás).

Az egyes repülési alkalmak esetében azonban eltérőek voltak az általános meteorológiai körülmények, így egy repülés alkalmával meghatározott korrekciós függvény eltérő pontossággal alkalmazható a többi repülés esetében, az eltérés mértéke azonban minden esetben 50 W alatt maradt. A mért változókkal történő összehasonlításkor csak a pontosabb, lesikló repülési szakaszon mért értékekkel dolgoztunk, hogy az ilyen kismértékű hibák se jelenjelek meg.

#### 6.2 Légköri turbulencia mérése

A légköri turbulencia kvalitatív és kvantitatív meghatározása számos nehézségbe ütközik mind mérés mind előrejelzés tekintetében. Turbulens áramlás esetében egy olyan pontról beszélünk, ahol az áramlás sebessége illetve iránya időben gyorsan változik. E definíciót szükséges azonban kiterjeszteni egy adott pontról egy véges térrészre, illetve az áramlás változását szükséges térben is vizsgálni (Sándor és Wantuch, 2005). Egy rögzített földi mérőpont esetében a turbulencia az előbbi definíció alapján határozható meg (Euler-i szemlélet), míg egy repülőgépes mérés esetében az utóbbi (Lagrange-i szemlélet) definíció nyer értelmet. Euler-i szemlélet esetén egy közel stacionárius, de erős nyírási felületeket tartalmazó áramlás nem feltétlen turbulens, mivel egy adott pontban az áramlás időben nem változik, azonban Lagrange-i szemléletben ugyanez az áramlás erősen turbulens áramlásnak számít. Szükséges azonban megjegyezni, hogy a két definíció nem különíthető el szigorú értelemben egymástól, ugyanis stacioner nyírásos áramlások a természetben ritkán fordulnak elő, hiszen az erős nyírás nyírási örvényességet generál. A turbulencia definíciójának a meghatározásakor mindkét szemléletmód esetén problémát jelent a változások "gyorsaságának" és "sűrűségének" az a felső és alsó határának a meghatározása is, ahonnan az áramlást még/már turbulensnek lehet nevezni. Az áramlásokat leíró modellekben (és így az előrejelzési modellekben is) a turbulencia mértékének a megadására gyakran a turbulens áramlások sebességingadozásait, azaz a turbulens kinetikus energiát használják (Zdunkowski and Bott, 2003):

$$k = \frac{1}{2}(\bar{u}^{\prime 2} + \bar{v}^{\prime 2} + \bar{w}^{\prime 2}).$$
<sup>(29)</sup>

Repülőgépes mérés esetében a repülőgép földfelszínhez és légtömeghez képest végzett mozgása miatt a Lagrange-i értelemben vett turbulenciát mérjük, ugyanakkor a mérés itt is az áramlási sebesség mérésére korlátozódik. Ekkor az áramlás géptesthez vett sebességének és irányának a változásait vizsgáljuk az időben. Az áramlási sebesség mérése a repülőgépeken az ún. Prandtl-cső segítségével történik. A műszer áramlásra merőleges felületén tapasztalható dinamikus torlónyomás alapján a statikus nyomással történt korrekció után ad sebességadatokat. A valós áramlási sebesség általában különbözik az  $\overline{IAS}$ -től tekintettel arra, hogy a hidrosztatikus nyomás a magassággal csökken, így azonos

torlónyomás eléréséhez nagyobb  $\overrightarrow{TAS}$  (True Airspeed – Korrigált, valós levegőhöz viszonyított sebesség) sebességre van szükség, mint a földfelszínen. Méréseinknél a sebességfluktuáció megadásánál az  $\overline{IAS}$ -t használtuk fel, tekintettel arra, hogy ekkor a nyomással és a hőmérséklettel történő korrekciót nem szükséges elvégezni, azonban az *IAS* használatánál a sebesség fluktuáció alapáramláshoz viszonyított mértéke nem változik a  $\overline{TAS}$ -hez képest. A turbulens áramlás irányának a változékonyságának mérésére pontosabb adatot szolgáltat az ún. 5HP áramlásmérő szonda, ahol a statikus nyomás mellett öt különböző dinamikus nyomásérték is keletkezik. Ennél a központi, a szonda hossztengelyére merőleges lyuk mellett négy másik, a központi lyukkal meghatározott szöget bezáró lyuk található (6.6 ábra). A lyukak egymással bezárt szögének ismeretében az áramlás támadási szöge megfelelő kalibráció után megadható (Brown et al., 1983). Fontos megjegyezni, hogy sem a nyomáskülönbség sem pedig a sima  $\overline{IAS}$  változásánál nem lehet eldönteni, hogy az áramlási sebesség vagy a támadási szög változik-e. A turbulencia repülés közben történő meghatározása ebből adódóan csak kvalitatív jellegű lehet, pontos kvantitatív meghatározása erősen hibával terhelt. A mérések során a fedélzeten elhelyezésre került egy 5HP szonda is, aminek az adatainak feldolgozása a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi egyetem Áramlástani tanszékén történt, így ennek eredményeire jelen dolgozatban nem térünk ki.



6.6 ábra: Prandtl-cső és 5HP szonda elhelyezése az UAV orrészén valamint az 5HP támadási szögeinek jelzése.

## 6.2.1 Turbulencia jellemzése a sebességmérések gyors Fouriertranszformációs analízisével

A légkörben a turbulens áramlást kialakító tényezők egy szűk, (néhány 10 m illetve 100 m-es) térrészben általában csak kis mértékben változnak, így a kialakult turbulens örvények karakterisztikája is hasonló (*Sándor és Wantuch*, 2005). Az ilyen turbulens közegen történő átrepüléskor a tapasztalható nyomás illetve sebesség értékek változékonysága valamilyen periodikusságot mutathat (*Dehghan et al.*, 2008). Ilyen diszkrét mért értékek esetében az adatsorban tapasztalható periodikusság vizsgálatára az időben ekvidisztáns mérés miatt alkalmas a gyors Fourier-transzformáció (továbbiakban FFT). Diszkrét mérési adatok esetében konstans  $\Delta t$  időközzel az egyes mért értékek egy *N* dimenziós  $\vec{x}$  vektort alkotnak. Ekkor  $\vec{x}$  diszkrét Fourier transzformáltja a

$$y_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{\frac{-2i\pi kn}{N}} \qquad \qquad k = 0, 1, ..., N-1,$$
(30)

elemekből álló *N* dimenziós  $\vec{y}$  vektor, aminek értékei az adott *k* diszkrét frekvenciákhoz tartozó amplitúdókat adja meg. A módszerrel meghatározhatjuk az adatsorban diszkrét frekvenciákhoz tartozó kilengések magnitúdóját. Ha az adott frekvencián periodikusság nem figyelhető meg az adatsorban, akkor ahhoz a frekvenciához tartozó amplitúdó érték nulla lesz.

Repülés állandó repülési pálya és motorteljesítmény közben. mellett sebességváltozást (illetve 5HP esetében nyomáskülönbség változást) a turbulens örvénytesten történő átrepülés okozhat. Habár a turbulens örvénytestek főleg a kisebb karakterisztikus örvényméret felé haladva ritkán rendelkeznek szabályos sebességeloszlással, az általuk okozott nyomás- és sebességfluktuáció periodikussága révén mégis információt szolgáltathat a közegben jelenlévő turbulens örvények karakterisztikájáról, mint például az átlagos örvényméretről. Ehhez szükség van a repülőgép közeghez viszonyított haladási sebességének az ismeretére is. Ismert IAS mellett a nyomás vagy a sebesség fluktuációjának a frekvenciájából (k) szabályos örvénytesteket feltételezve az örvények átmérőjére a

$$d = \frac{IAS}{k} \tag{31}$$

egyenlet adhat becslést, ahol *IAS* a közeghez viszonyított átlagos sebesség, k a sebességfluktuáció frekvenciája. Ennél a becslésnél azzal a feltételezéssel élünk, hogy az örvény szabályos, továbbá hogy az UAV az örvény középpontján repül át.

Frekvencia [Hz]	Örvényátmérő 20 m/s átlagos IAS mellett [m]
0,1-0,4	200 – 50
0,4 - 0,8	50 – 25
0,8 - 2,0	25 – 10
2,0 – 9,5	10-2,1

3. táblázat Állandó 20 m/s-os IAS mellett adott frekvenciatartományokhoz tartozó idealizált elméleti örvényátmérő.

#### 6.2.2 Spektrális teljesítménysűrűség (PSD)

Abban az esetben, ha az észlelt nyomás, illetve ebből számolt sebességfluktuáció valódi periodikus rezgésként jelenne meg a légkörben, úgy a frekvencia és amplitúdó értékekből számolható lenne az egyes diszkrét frekvenciatartományokhoz tartozó teljesítmény (*Brown et al.*, 1983). Ezt az értéket a turbulens területek pontosabb elkülönítése végett kísérleti célból alkalmaztuk, hiszen általa a jelentősebb turbulens kinetikus energiával rendelkező területeket jobban el lehet különíteni, azonban a kapott értékek nem reprezentálják az örvények által képviselt valós energiát (*Brown et al.*, 1983 *illetve Reuder et al.*, 2010). Ennek több oka is van. Egyrészt abban az esetben is, ha minden egyes örvény szabályos merev testként forgó örvény vagy Rankine-örvény lenne, egy átrepülés során végzett mérésből nem lenne megállapítható annak forgástengely mentén mérhető hossza, illetve az sem ismert, hogy az örvény melyik részén haladt át az UAV. Ezekből kifolyólag a repülés során akár teljesen azonos karakterisztikájú turbulens örvények is megjelenhetnek eltérő jelként az adatsorban.

A spektrális teljesítménysűrűség általánosan az adatsorban megjelenő periodikus jel (hullám) amplitúdójának a négyzetes közepét adja meg diszkrét frekvenciánként:

$$PSD = |y_k|^2. \tag{32}$$

A vizsgálat során nem vesszük figyelembe az egyes frekvenciákhoz tartozó jelek egymáshoz viszonyított fázisát. A PSD számításánál a teljes adatsor diszkrét  $2^m$ , m = 1, 2, ..., n hosszúságú "buffer" szakaszokra darabolódik, a PSD számítás minden egyes szakaszra külön történik. Nem időfüggő PSD számításánál az eredményül kapott PSD általában az egyes szakaszok PSD-jének a lineáris átlaga. Esetünkben a PSD változását is vizsgáljuk az idő függvényében, így az átlagolás helyett az egyes PSD-k időrendben kerülnek ábrázolásra. A kapott PSD mértékegysége itt  $(km/h)^2/Hz$ .

Tekintettel arra, hogy az egyes szakaszok mindig a 2 valamilyen hatványának megfelelő értéket tartalmaznak, az utolsó szakaszt, ami a maradék értékekből áll a megfelelő adatmennyiség eléréséig 0 értékekkel töltődik fel, mely az eredményt nem befolyásolja, hiszen nem képez periodikus jelet.

A meghatározott szakaszhosszok másik következménye, hogy előfordulhat, hogy a szakaszhatár nem feltétlenül lokális minimum vagy maximumhelyre esik. Ilyenkor a kezdődő, vagy végződő "maradék" hullámok a valósnál nagyobb frekvenciájú zajt okoznak. A probléma kiküszöbölésére ún. ablakfüggvényeket alkalmazhatunk, melyekkel az adott szakaszt megszorozva csökkenthető a keletkezett nagyfrekvenciás zaj. Az ablakfüggvények szakaszhatárokon általában 0 értéket vesznek fel, így a függvénnyel megszorozva a vizsgált szakaszt a "töredék" hullámok eliminálódnak. Vizsgálataink során szimmetrikus Hann ablakfüggvényt (w(n)) alkalmaztunk:

$$w(n) = 0.5 \left( 1 - \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) \right), \tag{33}$$

ahol *N* a vizsgált mintaszakaszok hossza, és  $0 \le n \le N - 1$ , N páratlan. Esetünkben mind a "vágásból" adódó, mind az ablakfüggvény használatából következő zaj minimális, ugyanis az adatsort előzetesen szűrtük az irreleváns, elméletileg lehetséges tartományon kívülre eső frekvenciákra (*lásd: 6.2.4 fejezet*). A PSD adott esetben lehet teljesítmény dimenziójú, ehhez azonban úgy kell megválasztani az y tengelyt, hogy a kapott függvény alatti terület arányos legyen a végzett munkával (*Brown et al.*, 1983). A PSD idővel vett szorzataként megadható a spektrális energiasűrűség:

$$ESD = PSD \cdot id \tilde{o}. \tag{34}$$

Megfelelően hosszú időre átlagolva a PSD értéke a frekvencia növelésével 5/3-os meredekséggel csökken, előállítva ezáltal a Kolmogorov, turbulens közegben létrejövő energia eloszlásra vonatkozó "5/3-os" törvényét (*Augier et al.*, 2012). Ehhez természetesen az szükséges, hogy a közeg ne tartalmazzon kitüntetett örvényméreteket.

# 6.2.3 Mozgó-ablakos gyors Fourier-transzformáció és spektrális teljesítménysűrűség

Az adatok Fourier-transzformációját nem a teljes adatsorra végeztük el, hanem a teljes repülés időtartamát egyenlő hosszúságú részekre osztva a spektrum időbeni menetét is vizsgáltuk. A módszer a mozgó, vagy mozgó-ablakos Fourier-transzformáció (Krakovsky, 2006). Ez alapján vizsgálható, hogy az egyes légköri jelenségek, mint például a megfigyelt termikek környezetében hogyan módosul az áramlási mező és milyen mértékű a turbulencia. Ahogy arról már korábban írtunk, a turbulencia esetében nem szabható meg egzakt határ az örvények méretére és forgási sebességére vonatkozóan (Sándor és Wantuch, 2005). A vizsgálatok elvégzésekor azonban szükséges volt egy adott mérettartományra szűkíteni a megfigyeléseket. A nagyon nagy frekvenciák vizsgálatának egyrészt a mintavételezés gyakorisága is határt szab, másrészről a nagy frekvenciákon már megjelennek a műszer pontatlanságából eredő értékek is, amik ugyan kis amplitúdóval jelennek meg, de egy szűk frekvenciatartományra korlátozódva hamis információt adhatnak. Bár a kinetikus energia teljes disszipációja ebben a frekvenciatartományban történik meg, a sebességváltozások amplitúdója kisebb a nagyobb örvényekhez képest, így ezek jelentéktelen csúcsokat hoznak létre a teljes spektrumban. A repülőgépes mérések esetében kiemelkedően fontos a gép karakterisztikáiból adódó rezgések elkülönítése. A szakirodalomban találhatóak olyan esetek ahol megfigyelhetőek az adott gépre jellemző frekvenciák (Brown et al., 1983). Esetünkben gyakorlatilag észrevehetetlenek voltak a motor vibrációja által okozott hatások, de a géptesten elhelyezett szenzorok által keltett rezgések, főként a motor leállítása után már jelentős hibát okoztak egy szűk frekvenciatartományban (6.7 ábra). Ez a tartomány esetünkben 0,6 Hz körülinek adódott. Ennek kiküszöbölését a kérdéses frekvenciatartomány és annak harmonikusainak a kiszűrésével oldottuk meg.

#### 6.2.4 Zajszűrés, jelfeldolgozás

Tekintettel arra, hogy a vizsgálat elsősorban kísérleti jelleggel történt a turbulencia esetleges kvalitatív meghatározására, a vizsgálatokat a teljes repülés süllyedési szakaszára végeztük el, amikor az UAV motor használata nélkül vitorlázva repült. Ezzel egyrészt a motor által keltett rezgések kiszűrése, másrészről a detektált vertikális áramlással való párhuzamos vizsgálat lehetőségének a megteremtése volt a cél. A tapasztalat azt mutatta, hogy mind a konvekció, mind a turbulencia mérésénél a süllyedő szakaszon pontosabb információ nyerhető, így összehasonlításhoz is ezt használtuk. Sajnos a későbbi repüléseken, mikor az 5HP szonda mellett több más műszer is elhelyezésre került az UAV fedélzetén, nem várt vibráció jelent meg a motor leállítását követően. (*6.7 ábra*).





Ez a periodikus zaj legjobban az UAV fedélzeti Prandtl-cső adatain jelent meg, így szükséges volt a vizsgálatot elvégezni a fedélzeti mérőrendszer *IAS* adataival, továbbá az 5HP szonda által mért értékekkel is. A rezgés itt is megjelent, azonban jelentősen kisebb amplitúdóval, illetve az 5HP esetében a szűréshez megfelelően szűk frekvenciatartománnyal. A gép rezgései által keltett zaj kiküszöbölésére emellett a kérdéses (pl. 0,6 Hz körüli) frekvenciatartományokra sávzáró szűrőt alkalmaztunk,

beleértve az adott frekvenciatartomány összes harmonikusát is (*6.8 ábra*). A teljes adatsor esetében sáváteresztő szűrés is történt a szignifikáns örvényméretek és a mintavételezés gyakoriságának a figyelembevételével. A vizsgált értékek így a fedélzeti Prandtl-cső által szolgáltatott adatoknál 0,1 Hz–2 Hz, míg a fedélzeti mérőrendszer esetében 0,1 Hz–10 Hz közötti frekvenciatartományokba estek (*3. táblázat*).



6.8 ábra: FFT spektrumok (fent) és IAS értékek (lent) az alkalmazott szűrők előtt (bal oldal) és után (jobb oldal) (2013. 11. 28. /2 felszállás mért értékei).

Abból kifolyólag, hogy az *IAS* értékekben tapasztalható fluktuáció mértéke a frekvencia növelésével általában logaritmikusan növekszik, a teljes vizsgált frekvenciatartományt szakaszokra bontottuk (*3. táblázat*). Ennek köszönhetően a megjelenítésnél elkülöníthetőek a nagyobb frekvenciához tartozó kisebb csúcsok is. A logaritmikus y tengely alkalmazását a 3D megjelenítés miatt nem alkalmaztuk. Az egyes frekvenciatartományokat, illetve a vizsgálat során alkalmazott beállításokat a függelékben található táblázat foglalja össze (*F.2 függelék*).

## 7. Esettanulmány

A légkörben az egyes állapotjelzők között, komplex kölcsönhatásokon keresztül szoros kapcsolat van. Ez kiemelten igaz a légkör alsó tartományára, ahol a folyamatok sora a földfelszínnel való kölcsönhatásokkal bővül. A PHR-ben (*Planetáris HatárRéteg*) zajló folyamatok jelentős része ma is a kiemelt kutatási területek közé tartozik. E folyamatok komplexitásuk révén az előrejelzési modellekben parametrizációkon keresztül jelennek meg. Ahogy a szinoptikus skálájú jelenségekre, itt is igaz, hogy a folyamatok együttes vizsgálata több információt hordoz, mint az egyes változók külön-külön végzett analízise. Ebből kifolyólag a repülések során végzett megfigyelések együttes vizsgálata ad érdemi információt az egyes módszerek hatékonyságáról és hiányosságairól.



7.1 ábra: Domborzati viszonyok az összehasonlított két repülés környezetében. Bal oldalon a májusi várpalotai, jobb oldalon a novemberi szegedi helyszín.

A továbbiakban két, eltérő időjárási és domborzati (7.1 ábra) körülmények közt végzett mérés párhuzamos vizsgálatával mutatjuk be a mérések gyakorlati működését, érzékenységét a légköri jelenségekre. Egy késő tavaszi, labilis nappali határrétegben, változatosabb domborzati viszonyok mellett és egy késő őszi, stabil rétegződési viszonyok mellett, anticiklonális helyzetben, sík terep felett végzett repülés lett kiválasztva az összehasonlításhoz.

#### 7.1 Szinoptikus helyzetek a repülésekkor

#### 7.1.1 2013.05.22. Várpalota

Az összehasonlításban szereplő első repülés 2013. Május 22-én 10Z-kor Várpalotán volt. Május 22-én Európa szerte több alacsony nyomású zóna helyezkedett el. A Kárpátmedence időjárását egy országunktól ÉNy-ra elhelyezkedő, Északi-tenger feletti nyomási középponttal rendelkező fejlődő ciklon, és egy szicíliai középpontú mediterrán ciklon köztes áramlási mezejében kialakuló hatások határozták meg (*7.2 ábra*). Az Alpok térségében az átvonuló hidegfront után további hullámvetés jelent meg.



7.2 ábra: 500 hPa-os Geopotenciális magasság és légnyomás valamint 300 hPa-os geopotenciális magasság és pozitív örvényességi advekciós értékek 2013. 05. 22. 12Z -kor. GFS reanalízis (Forrás: wetter3.de).

A Kárpát-medencéhez ÉNy felől egy hidegfront közeledett, aminek előoldalán a mediterrán ciklonnal való kölcsönhatásban az alsó troposzférában meleg és nedves levegő áramlott térségünkbe. Az ország nyugati felét a keleti országrészben jelenlévő konvergencia mentén, réteges felhőzetből hulló csapadék nem érintette. A területen a reggeli óráktól kezdve zavartalan volt a besugárzás, a felszíni hőmérséklet hamar elérte a gomolykiváltó hőmérsékletet<sup>1</sup>. 12Z-re a 2 m-en mért hőmérséklet megközelítette a 20 °C-ot és 300 J/Kg körüli MLCAPE értékek halmozódtak fel (*7.3 ábra*).

<sup>&</sup>lt;sup>1</sup> Gomolykiváltó hőmérséklet: Az a hőmérséklet, aminek hatására a felszínről indított légrész szabad konvekció révén eléri a kondenzációs szintet.



7.3 ábra: 2 m-es hőmérséklet és MLCAPE értékek 2013. 05. 22. 12Z -kor. GFS reanalízis (Forrás: wetter3.de).



7.4 ábra: A repülés ideje alatt megfigyelhető sekély konvekció a Terra Modis nagyfelbontású látható tartományú felvételén (balra), továbbá a legközelebbi, Budapest-Lőrinci 2013. 05 .22. 00Z rádiószondás felszállás mért értékei (Források: rapidfire.sci.nasa.gov, weather.uwyo.edu).

A konvekciót segítette a magasban megfigyelhető erőteljes pozitív örvényességi advekció is (7.2 *ábra*). A körülmények hatására gyorsan megindult a gomolyképződés, melynek maximális magasságát a 700 hPa-os szint körül megfigyelhető erős kiszáradás szabta meg. A nap időjárását az alacsonyabb felhőtetővel rendelkező kisebb, sűrűn elhelyezkedő gomolyfelhők határozták meg, amikből a délután folyamán kisebb záporok is kialakultak (7.4 *ábra*).

### 7.1.2 2013.11.28. Szeged

A másik repülés 2013. November 28-án szintén 10Z-kor Szegeden volt. A Kárpátmedence időjárását egy a Brit-szigetek feletti középponttal rendelkező, kiterjedt anticiklon határozta meg, mely hatására még a repülés helyszínén is 1030 hPa-t meghaladó tengerszintre számított légnyomás volt mérhető (7.5 ábra). A Földközi tenger térségében egy leépülő fázisban lévő mediterrán ciklon helyezkedett el, aminek melegfronti szakaszából a mérést megelőző napokban az országunktól délre eső területeken jelentősebb mennyiségű hó hullott.



7.5 ábra: 500 hPa-os geopotenciális magasság és légnyomás valamint 300 hPa-os geopotenciális magasság és pozitív örvényességi advekciós értékek 2013. 11. 28. 12Z -kor. GFS reanalízis (Forrás: wetter3.de).



7.6 ábra: 2 m-es hőmérséklet és MLCAPE értékek 2013. .11. 28. 12Z -kor. GFS reanalízis (Forrás: wetter3.de).

A mérés helyszínén a felszínt nem fedte hó, azonban a hóval borított területek határa délre mindössze ~15 km távolságban húzódott (7.7 *ábra*). Az anticiklonban kialakuló erőteljes leáramlás következtében egész nap felhőmentes időjárás volt és stabil határréteg viszonyok uralkodtak. A napi maximum hőmérsékletek kevéssel fagypont felett alakultak (7.6 *ábra*).



7.7 ábra: Elvonuló altocumulus felhőzet és hóval borított felszín Szeged közelében a Terra Modis nagyfelbontású látható tartományú felvételén (balra), továbbá a legközelebbi, Szegedi 2013. 11 .28. 00Z rádiószondás felszállás mért értékei (Források: rapidfire.sci.nasa.gov, weather.uwyo.edu).

### 7.2 Mért értékek

# 7.2.1 Általános szondázás

A repülés mindkét esetben négyzetes repülési pályán történt. A májusi repüléskor 2608 m míg a novemberinél 2243 m tengerszint feletti magasságig emelkedett az UAV (7.8 ábra).



7.8 ábra: GPS és nyomás szerinti magassági adatok a májusi (fent) és a novemberi (lent) repülésnél.

A várakozásoknak megfelelően a májusi mérés idején, az erős besugárzás hatására a 750 hPa-os nyomási szintig "kirúgódott" az állapotgörbe. Az emelkedő és a lesikló szakaszokon mért hőmérsékletek együtt futnak, az eltérés minimális és nem szisztematikus. Egyedül valamivel a 800 hPa-os nyomási szint felett figyelhető meg kisebb változékonyság a szintre jellemző átlagos hőmérsékleti értékekben. Megfigyelhető emellett, hogy az felszállásra várakozó gépen, ahol a hőmérséklet szenzor kifejezetten közel volt a talajhoz, ~7 °C-al magasabb hőmérséklet volt mérhető a felszállást követő értékekhez képest. A felszállás után a hőmérsékleti adatok gyorsan elérték a normál értékeket. A november végi repülés esetében nem figyelhető meg a talaj feletti sekély, néhány 10 cm-es légrétegben jelentős eltérés a felszállás után mért értékekhez képest. A süllyedéskor illetve az emelkedéskor mért értékek ebben az esetben is szorosan egymás mellett futnak, azonban három, két kisebb és egy jelentős inverziós réteg is megfigyelhető. A szegedi repüléskor már relatív nedvességre vonatkozó adatok is elérhetőek voltak, valamint elhelyezésre került a Väisälä HMP45 referenciaszenzor is. A hőmérsékleti értékeknél minimális eltérés tapasztalható a "gyors" és a referencia-szenzor adatai közt. A Relatív nedvesség értékeknél, a Väisälä műszer esetében műszert ért sugárzásból eredő hiba figyelhető meg. A relatív nedvesség minimuma ekkor a felszínhez legközelebb eső inverzió magasságában volt. Az átlagos értékek a magassággal emelkedtek (7.9 ábra).



7.9 ábra: Hőmérsékleti (május, november) és relatív nedvességi (november) profilok. A májusi mérésnél csak a TMP102 szenzor adatai érhetőek el, a Vaisala és a HIH-4030 szenzorok ekkor még nem voltak telepítve.

#### 7.2.2 Szél

A májusi repülés idején még nem kerültek rögzítésre olyan adatok, amiből széladatokat lehetett volna származtatni. Ebből kifolyólag az összehasonlításhoz a májusi repülésnél az adott napon 9:00Z-ra WRF modell által előrejelzett értékeket használtuk fel (7.10 ábra). Ezen a magassággal erősödő és enyhén balra forduló szél figyelhető meg, jelentősebb nyírási felület nélkül. Hatására lassan DNy - ÉK irányban helyeződtek át a kialakult gomolyfelhők.



7.10 ábra: WRF által előrejelzett U és V szélkomponens profilok 2013. 05. 22. 9Z-re Várpalotára.

A novemberi mérés esetében már rendelkezésre álltak több szélbecslési módszerhez is szükséges adatok. A mért értékek mellett itt is feltüntettük a WRF által előrejelzett szélprofilt (7.11 ábra). Ezen a májusihoz képest élénkebb, az alsó ~1500 m-es rétegben nyugatias-délnyugatias szél figyelhető meg, ami az 1500 m-es magasság felett lassan délkeletire fordult. Ebben a magasságban egy élesebb nyírási zóna is megfigyelhető.



7.11 ábra: Mért és előrejelzett szélkomponens profilok a 2013. 11. 28./2. repülésnél. A MAG\_UAV és a MAG\_OSS a mágneses adatok felhasználásával készült szélbecsléseket jelzik.

Összességében elmondható, hogy a májusi előrejelzett szélprofilhoz képest kisebb eltérések előfordulhattak a lokális konvektív cellák hatására. A nappali határréteg felső határánál kialakult egy szélfordulási réteg, ~1600 m-es magasságban, de a turbulens területekért feltehetőleg inkább a konvektív feláramlási cellák és nem a vertikális nyírás volt a felelős. A novemberi repülés esetén az ~1500 m-es szint közelében szintén megjelent egy jelentősebb szélfordulási réteg, ugyanakkor ahogy a továbbiakban látható lesz, ez nem hozott létre jelentősebb turbulenciát az adott rétegben.

#### 7.2.3 Emelési teljesítmény (konvekció)

A következőekben a két repülésre, a teljes és a lesiklási repülési szakaszokban mért emelési teljesítmény ( $P_{korr}$ ) értékeket mutatjuk be. A májusi, konvektív helyzetben történt repülés értékeit elemezve több jelentős csúcsot is elkülöníthetünk, míg a novemberi adatsornál mindössze két gyengébb szakasz tűnik fel (7.12 *ábra*). A közvetlenül a felszállás utáni és leszállás előtti szakaszok értékeinél a kisebb eltérések nem feltétlenül a vertikális áramlásokból adódnak, hiszek ebben a szakaszban a repülés már kézi irányítással történik, amikor élesebb manőverek, illetve az átlaghoz képesti jelentősebb sebességnövekedés is előfordul, amik kisebb mértékű hibát okozhatnak.



7.12 ábra: Emelési teljesítmény menete a két repülés teljes szakaszára (balra a májusi, jobbra a novemberi repülés adatai láthatóak).

A májusi repülésnél alapvetően két fajta csúcsot lehet megkülönböztetni. Egyrészt egymás után több, 100 W–150 W értéket is meghaladó, diszkrét értékekből álló szakaszokat, másrészről egyenletesen emelkedő, majd süllyedő, határozottan elkülöníthető határú csúcsokat. Az első típusú csúcs kialakulása feltételezhetően annak köszönhető, hogy az UAV egy fejlődő termik felső, turbulens részén repült keresztül. A termikus feláramlások fejlődő fázisában a feláramlási csatorna felső szakasza gyakran turbulens. A termik ezen szakaszában előfordul, hogy a feláramlási zóna határán az erős nyírásból adódóan örvények keletkeznek, melyek idealizált esetben egy toroid örvénygyűrűt hoznak létre (*Allen,* 2005). A másik, közel szabályos csúcsok kialakulására két elmélet létezik. Az első szerint az UAV ekkor egy szabályos, 3D haranggörbével leírható, vertikális

sebességmezővel rendelkező, izolált feláramlási csatornán repült keresztül. A középponti feláramlást kompenzálandó az azt körülvevő térrészben leáramlás keletkezett.

A másik elmélet feltételezi, hogy a 7.13 ábrán is látható kettős feláramlási csatorna valójában egyetlen zárt konvektív cella része. Zárt Rayleigh-Bénard cellás konvekció esetében a cella központi részében leáramlás alakul ki (*Ruby*, 1975). Ilyen zárt cellán történő átrepülés esetén az idősorban kettős feláramlási rendszer jelenik meg. Hasonló megfigyelés *Childress*, (2010) munkájában található.



7.13 ábra: A lesiklási szakaszokon vett emelési teljesítmény értékek a májusi (bal) és novemberi (jobb) méréseknél.

A novemberi repülésnél a két kisebb, 40 W-os csúcs a felszállástól számított 1400. és 1700. másodpercben volt megfigyelhető (*7.12 ábra*). Ekkor az UAV emelkedő szakasz közben rövid vízszintes repülést folytatott, megközelítőleg 1800m-es magasságban. Az hogy a megjelenő csúcsok a vízszintes repülés miatt lecsökkenő motorteljesítmény és a nem megfelelő veszteségfüggvény együtteseként álltak elő kizárható, ugyanis a veszteségfüggvény monoton, így mivel a kapott értékek sem nagy sem zéró motorteljesítmény mellett nem eredményeznek pozitív értékeket, így ez a köztes tartományban sem fordulhat elő. A megjelenő pozitív értékek oka lehet az éppen a vizsgált magasságban jelenlévő hirtelen szélfordulás, ami az adott rétegben kisebb Kelvin-Helmholtz hullámokat generálhatott (*7.12 ábra*), azonban ez nem bizonyítható.

#### 7.2.4 Turbulencia

A májusi repülésnél kizárólag az UAV fedélzeti *IAS* adatai voltak elérhetőek, így az összehasonlításhoz is ezeket az értékeket használtuk fel. A továbbiakban előbb a mozgó gyors Fourier-transzformált majd a PSD értékeket mutatjuk be, frekvenciatartományokra bontva. A bal oldali oszlopban a májusi, míg a jobb oldalon a novemberi mérések adatai találhatók. A tengelyek mozgó ablakos FFT esetében rendre (x, y, z) idő, frekvencia és magnitúdó, PSD esetében idő, frekvencia és teljesítménysűrűség. A két módszer esetében értelemszerűen azonos jelenségek figyelhetőek meg. A várakozásunk az volt, hogy a májusi, konvektív helyzetben végzett repülés esetében a feláramlások környezetében jelenik meg egyértelműen detektálható turbulencia, míg a novemberi stabil légköri viszonyok mellett folytatott repülésnél nem, vagy csak kis mértékben észlelhetünk turbulenciára utaló jeleket. A Novemberi mérésnél az "energia módszernél" kapott eredmények alapján esetleges turbulenciára a talaj közeli rétegben lehetett számítani, ugyanis itt figyelhető meg még az átlaghoz képesti erősebb teljesítményingadozás.

Alacsony frekvenciatartományban a májusi repülés teljes szakaszában erősebb fluktuáció jelent meg. Ez többek közt annak köszönhető, hogy az UAV a süllyedő repülési szakasz teljes ideje alatt gyengébb-erősebb feláramlási csatornákat keresztezett.



#### TFFT 0,1 Hz - 0,4 Hz

7.14 ábra: Mozgó-ablakos gyors Fourier-transzformált 0,1 Hz és 0,4 Hz között a májusi (bal) és novemberi (jobb) repülési adatsorra. Az ábrák nagyobb méretben az F.3 függelékben megtekinthetők.

A legnagyobb csúcs a süllyedési szakasz első felében jelent meg, azon a területen, ahol az emelési teljesítményben szintén erős ingadozás volt tapasztalható (*7.14 ábra*).

A vizsgált frekvencia növelésével az alacsonyabb magasságokban jelennek meg szignifikáns maximumok, míg a korábbi részen egy kisebb másodlagos maximum található (7.15 *ábra*). Ennek egyik oka a közvetlenül a leszállás előtti szakaszban megemelkedett *IAS* lehet, ugyanis ilyenkor a korábban is jelen lévő fluktuációk a megnövekedett sebesség miatt a magasabb frekvenciatartományokban észlelhetők. A megfigyelés alátámaszthatja azt az elméletet is, miszerint a felszínhez közeledve az átlagos örvényméret csökken, ezáltal a sebesség ingadozás a magasabb frekvenciák felé tolódik. A novemberi repülés esetében az alkalmazott sávzáró szűrés eredménye ebben a tartományban jelenik meg.



#### TFFT 0,4 Hz – 0,8 Hz

7.15 ábra: Mozgó-ablakos gyors Fourier-transzformált 0,4 Hz és 0,8 Hz között a májusi (bal) és novemberi (jobb) repülési adatsorra. Az utóbbinál széles sávban jelenik meg az alkalmazott sávzáró szűrő. Az ábrák nagyobb méretben az F.3 függelékben megtekinthetők.

A 4 Hz-es mintavételezés miatt az 1 Hz feletti frekvencián már erős zaj jelenik meg. Ez a frekvencia megközelíti az elméletileg lehetséges mérési küszöböt is. Ebben a tartományban ismét a májusi repülés nagyobb magassági szintekhez tartozó szakasza válik dominánssá, de már a novemberi repülés esetében is relatíve magas értékek jelennek meg (7.16 ábra).

#### TFFT 0,8 Hz – 2,0 Hz



7.16 ábra: Mozgó-ablakos gyors Fourier-transzformált 0,8 Hz és 2,0 Hz között a májusi (bal) és novemberi (jobb) repülési adatsorra. Az ábrák nagyobb méretben az F.3 függelékben megtekinthetők.

Az egyes maximumok PSD esetében jobban elkülönülnek, így a következő ábrákon hasonló összevetésben ezek az értékek kerülnek bemutatásra (7.17 - 7.19 ábrák).



PSD 0,1 Hz - 0,4 Hz

7.17 ábra: Spektrális teljesítménysűrűség idősor a 0,1 Hz – 0,4 Hz frekvenciatartományra a májusi (bal) és a novemberi (jobb) repülésnél. A módszer alkalmazásával a szignifikáns csúcsok jobban elkülönülnek. Az ábrák nagyobb méretben az F.3 függelékben megtekinthetők. A PSD értékek esetében az első frekvenciatartományban a májusi repülésnél, a lesiklás megkezdését követően tapasztalható turbulens szakasz jobban elkülönül, mint a TFFT esetében. A novemberi repülésnél ekkor már szinte teljesen sík képet mutat az értékek 3D grafikonon történő ábrázolása (*7.17 ábra*). A vizsgált tartomány magasabb frekvenciák felé történő eltolásával itt is a leszállás előtti turbulens terület válik hangsúlyosabbá. A novemberi, szegedi repülés adatai továbbra sem mutatnak turbulenciára utaló jelet, a zaj a TFFT-hez képest itt is mérsékeltebb (*7.18 ábra*).



PSD 0,4 Hz - 0,8 Hz

7.18 ábra: Spektrális teljesítménysűrűség idősor a 0,4 Hz – 0,8 Hz frekvenciatartományra a májusi (bal) és a novemberi (jobb) repülésnél. Az ábrák nagyobb méretben az F.3 függelékben megtekinthetők.

A 0,8 Hz – 2,0 Hz közötti frekvenciatartományban a TFFT-hez hasonlóan újra a korábbi csúcs emelkedik ki. Emellett az tapasztalható, hogy míg a májusi repülésnél a határozottan elkülönülő csúcs mellett a zaj megnövekedett, de még mindig nem zavaró mértékű, addig a novemberi repülés esetén már jelentős mértékűvé válik az 1 Hz frekvenciáig bezáróan (7.19 ábra).

Összefoglalásként elmondható, hogy a PSD esetében minden frekvenciatartományra vonatkozóan jobban elkülöníthetőek a turbulens területek.

#### PSD 0,8 Hz - 2,0 Hz



7.19 ábra: Spektrális teljesítménysűrűség idősor a 0,8 Hz – 2,0 Hz frekvenciatartományra a májusi (bal) és a novemberi (jobb) repülésnél. A novemberi idősor esetében ennél a tartományban feltehetőleg további rezgések jelentek meg a fedélzeten elhelyezett műszerek áramlásmódosító hatásának következtében. Az ábrák nagyobb méretben az F.3 függelékben megtekinthetők.

# Összefoglalás

A pilótanélküli repülőgépek elterjedésével azok meteorológiai mérésekben való használhatósága is létjogosultságot kapott. Használatukkal a drágább, vagy a műszerek felépítéséből adódóan helyhez kötött módszerek széles repertoárját lehet kiváltani. Segítségükkel a légkör olyan területeinek a részletes szondázása is megvalósult, amik korábban korlátokba ütköztek. Az UAV-s mérések azonban rövid múltjuknak köszönhetően még számos téren kiforratlannak mondhatóak, emellett a módszer által nyújtott lehetőségek is csak kis mértékben vannak kihasználva. A dolgozatban egy pilótanélküli repülőgéppel végzett szondázás lehetőségeit, előnyeit és korlátait vizsgáltuk meg valós, mért adatok segítségével. A repülések megkezdésével együtt folyamatosan zajlott a fedélzeti műszer együttes fejlesztése. Ennek köszönhetően sikerült észrevenni, és leírni néhány olyan jellegzetességet, ami a mérés természetéből adódott, és más vertikális szondázási eszközöknél általában nem, vagy máshogy jelentkezik.

A dolgozat első felében bemutatásra került a mérésekhez használt UAV és a rajta elhelyezett szenzorrendszer. Ezt követően mért értékeken keresztül bemutattuk az általános hőmérsékletre és relatív nedvességre vonatkozó szondázási lehetőségeket, műszereket, azok előnyeit és hátrányait. Kitértünk a műszerek árnyékolásának a problémájára és lehetőségeire is, hiszen a módszer újszerűsége miatt még nincs erre vonatkozó nemzetközi szabvány.

Részletesen vizsgálat alá vontuk a repülőgépeken alkalmazható szélmérési módszereket is, külön tekintettel az UAV vezérlési és repülési tulajdonságaira. Ennek keretén belül két olyan módszer is fejlesztésre és bemutatásra került, mely segítségével megoldott a repülőgépes szélmérés mágneses irányszög adatok hiányában is. Foglalkoztunk a mágneses irányszög adatok ismeretében alkalmazható módszerek előnyeivel és hátrányaival is, különös tekintettel az elektromos hajtásból származó mágneses zaj problémájára és annak szűrésére.

A dolgozat második részében a légköri termikus és orografikus vertikális áramlások, illetve a turbulencia kvalitatív és kvantitatív mérésének a lehetőségeit vizsgáltuk. Elsőnek az UAV helyzeti és kinetikus energiáinak a változásából, a súrlódási veszteség és a meghajtás hatásfokának a megfelelő korrekciójával kapott teljesítmény értékekből következtettünk a fel- és leáramlások helyére és intenzitására. Azt tapasztaltuk, hogy a módszer alkalmas kisebb feláramlások pontos detektálására is. Használatával a

68

továbbiakban olyan módszerek fejlesztésére van lehetőség, amellyel a vertikális energia transzport is mérhetővé válik a termikekben. A feláramlási csatornák ismeretében az UAV repülési idejének a növelése is lehetséges a vertikális áramlások energiájának felhasználásával. E módszer felhasználásával lehetőség nyílik az UAV-k automatikus "vitorlázásának" továbbfejlesztésére is.

Végezetül a Prandtl-cső által mért IAS értékek fluktuációjából származtatható turbulencia karakterisztikák vizsgálata került lejegyzésre. A fejezetben a mozgó-ablakos módszerével gyors Fourier-transzformáció vizsgáltuk а sebességfluktuáció változékonyságát és mértékét. Az általános gyors Fourier-transzformált mellett a számított spektrális teljesítménysűrűség értékek is meghatározásra kerültek kísérleti jelleggel. A teljes repülési adatsort diszkrét frekvenciatartományokra bontva sikerült különböző karakterisztikájú turbulens területeket elkülöníteni. A módszerek hatékonyságát és korlátait egy összehasonlító esettanulmányon keresztül mutattuk be, mely során egy konvektív és egy stabil időjárási helyzetben vett mérés eredményeit vetettük össze. Az összehasonlítás eredményeként elmondható, hogy a bemutatott módszerek együttes alkalmazásával átfogó kép nyerhető az alsó troposzféra hőmérsékleti, nedvességi és áramlási viszonyairól, továbbá detektálható az abban zajló konvekció mértéke és minősége, beleértve az egyes területek turbulens áramlási tulajdonságait is.

Összességében elmondható, hogy az UAV-vel történő szondázás a meteorológiai mérések egy új irányát jelölik ki. Az UAV-s meteorológiai rendszerek továbbfejlesztésével egy sokoldalúan használható, pontos és gazdaságos eszköz nyerhető, melye használható operatív légköri szondázásra, időjárás felderítésre valamint kutatási célra. Fontos megemlíteni, hogy a numerikus időjárás előrejelző modellekben alkalmazott, planetáris határrétegre vonatkozó parametrizációk széles köre vált validálhatóvá a módszer megjelenésével, így feltehetőleg a jövőben az ilyen alkalmazási területek száma növekedni fog.

69

# Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni témavezetőmnek, Gyöngyösi András Zénónak a támogatását, különös tekintettel az adatfeldolgozó programcsomag fejlesztésében nyújtott segítségét, mely tudást feltehetőleg a továbbiakban is széles körben tudok majd felhasználni.

Köszönöm Dr. Weidinger Tamásnak a munka során nyújtott ösztönzését, és azt hogy lehetővé tette, hogy a kutatás keretében TDK és OTDK dolgozat is készülhessen.

A dolgozat a TÁMOP-4.2.1.B-11/2/KRM-0001 Kritikus infrastruktúra védelmi kutatások, az OTKA NN-109697 és az OTKA-83909 pályázat támogatásával készült, amiért ezúton is köszönetet mondunk.

# Irodalomjegyzék

Allen, M. J., 2005: Autonomous Soaring for Improved Endurance of a Small Uninhabitated Air Vehicle. 43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, Aerospace Sciences Meetings, American Institute of Aeronautics and Astronautics, 18

Al-Sabban, W.H., Gonzalez, L.F., Smith, R.N., 2013: Wind-energy based path planning for Unmanned Aerial Vehicles using Markov Decision Processes. 2013 International Conference on Robotics and Automation (ICRA), 6-10 May 2013, Australia, Brisbane, 784–789

Augier, P., Galtier, S., Billant, P., 2012: Kolmogorov laws for starified turbulence. Journal of Fluid Mech. 2012. vol. 709., 659–670

Balogh, M., 2006: Az AMDAR repülőgépes adatok asszimilációja az ALADIN számszerű időjárási előrejelző modellben. Diplomamunka ELTE Meteorológiai Tanszék, 71

Bonin, T. A., Chilson, P. B., Zielke, B. S., Klein, P. M., and Leeman, J. R. 2012: Development and comparisons of wind retrieval algorithms for small unmanned aerial systems. *Geosci. Instrum. Method. Data Syst. Discuss.* 2, 953–979

*Bottyán, Zs. Tuba, Z.,* 2012: Felületi jegesedést okozó időjárási helyzetek statisztikai vizsgálata és a jégakkréció becslése pilóta nélküli repülőeszközök (UAVs) esetében. *Repüléstudományi közlemények XXIV. évfolyam 2012.2. szám,* 642–651

Bottyán, Zs., Wantuch, F., Gyöngyösi, A. Z., Tuba, Z., Hadobács, K., Kardos, P., Kurunczi, R., 2013: Development of a complex meteorological support system for UAVs. World Academy of Science, Engineering and Technology Vol:7, 648–653

Brown, E. N., C. A. Friehe, D. H. Lenschow, 1983: The Use of Pressure Fluctuations on the Nose of an Aircraft for Measuring Air Motion. Journal Climate Appl. Meteor., 22, 171–180

Chakrabarty, A., and Langelaan, J. W., 2009: Energy Maps for Long-Range Path Planning for Small- and Micro – UAVs Guidance. Navigation and Control Conference, August 10-13, 2009, Chicago, Illinois, 13

Chakrabarty, A., and Langelaan, J. W., 2011:. Flight Path Planning for UAV Atmospheric Energy Harvesting Using Heuristic Search. AIAA Guidance, Navigation, and Control Conference 2 - 5 August 2010, Toronto, Ontario Canada, 18

*Childress, C. E.,* 2010: An Empirical Model of Thermal Updrafts Using Data Obtained From a Manned Glider. *Master's Thesis, University of Tenesse, Knoxville,* 51

*Cho, A., Kim, J., Lee, S., Kee, C.,* 2011:, Wind Estimation and Airspeed Calibration using a UAV with a Single-Antenna GPS Receiver and Pitot Tube. Aerospace and Electronic systems, Volume: *47 Issue 1, january 2011,* 109–117

Dehghan, M. M., Tamadonfar, P., Soltani, R., Ghorbanian, K., Masdari, M., 2008: Power Spectrum and FFT-Based Signal Analysis in Turbulence Measurements. Proceedings of World Academy of Science: Engineering & Technology Jun 2008, Vol. 42, 265–269

Gyongyosi, A. Z., Kardos, P., Kurunczi, R., Bottyan, Zs., 2013a: Development of a complex dynamical modeling system for the meteorological support of unmanned aerial operation in Hungary, 2013 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS), 28-31 May 2013, Atlanta, GA, 8–16

Gyongyosi, A. Z., Kardos, P., Kurunczi, R., Balczó, M., Bottyan, Zs., 2013b: Időjárás kutató- és előrejelző modell alkalmazása pilóta nélküli repülések komplex meteorológiai támogatására Magyarországon. Repüléstudományi közlemények XXV. évfolyam 2013.2. szám, 435–458

*Kadygrov, E.N.* 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*, 33.
Krakovsky, V, Y. 2006: Moving-window discrete Fourier transform. J. of Real-Time Image Proc. 2006:1, 153–161

Langelaan, J. W., 2007: Long distance/duration trajectory optimization for small uavs. AIAA Guidance, Navigation and Control Conference and Exhibit, American Institute of Aeronautics and Astronautics Paper 2007-6737, 14

Leélőssy, A. 2012: Baleseti kibocsátásból származó légszennyezőanyagok lokális skálájú terjedésének modellezése, Diplomamunka, Budapest, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai tanszék, 56

Liu, Y., Longo, S., Kerrigan, E. C., 2013: Nonlinear Predictive Control of Autonomous Soaring UAVs Using 3DOF. Models In proceeding of: European Control Conference (ECC'13) Zürich, Switzerland, 1365–1370

Palik, M., 2012: A pilóta nélküli légijárművek hazai szabályozói környezete fejlesztésére irányuló K+F projekt bemutatása. *Repüléstudományi közlemények XXV. évfolyam 2013.2. szám*, 483–489

Pilewskie, P., 2007: Aerosols heat up. Nature 448, 541-542

*Reuder, J., Jonassen, M. O., Ólafsson, H.,* 2010: The Small Unmanned Meteorological Observer SUMO: Recent developments and applications of a micro-UAS for atmospheric boundary layer research. *Acta Geophysica, October 2012, Volume 60, Issue 5,* 1454–1473

Ruby, K., 1975: On Cellular Cloud Patterns. Part 1: Mathematical Model. J. Atmos. Sci., 32, 1353–1363

Szabó Z. A, Istenes Z., Gyöngyösi A. Z., Bottyán Zs., Weidinger T. Balczó M., 2013: A Planetáris határréteg szondázása pilótanélküli repülő eszközzel. Repüléstudományi közlemények, XXV. évfolyam 2013. 02., 422–434

Sándor, V., Wantuch, F., 2005: Repülésmeteorológia. Országos Meteorológiai Szolgálat, Budapest, 272 Tendolkar, G., 2013: Autonomus soaring of UAVs using thermals, Diploma thesis, Department of Aerospace Engineering, Indian Institute of Technology, Bombay, 44

Van den Kroonenberg, A., Tim., M., Buschmann, M., Bange, J., Vörsmann, P., 2008: Measuring the Wind Vector Using the Autonomous Mini Aerial Vehicle M2AV. Journal of Atmospheric & Oceanic Technology Nov. 2008, Vol. 25 Issue 11, 1969–1982

Zdunkowski W., Bott, A., 2003: Dynamics of the Atmosphere, Cambridge University Press, Cambridge, 719

# Függelék

## F.1 Repülési adatok

	maj.	maj.	nov.	nov.	nov.	nov.	nov.	nov.
	22/1	22/2	12	27/1	27/2	28/1	28/2	28/3
Repülési idő [s]	4568	2933	3717	848	674	1445	2814	3166
Siklási idő idő [s]	2189	1272	1028	430	262	949	1183	1537
H0 [mAMSL]	235	219	243	105,6	64,5	95,2	83,3	64,4
Hmax [mAMSL]	2608	2847	2946	636	548	1165	1962	2242
Tmin [°C]	-2,47	-2,91	0,06	-3,44	-2,35	-5,91	-6,33	-5,92
Tmax [°C]	16,32	17,4	15,04	2,49	2,85	5,94	-0,16	15,7
Rhmin [%]	na	na	57	66,81	66,44	62,37	63,34	48,09
Rhmax [%]	na	na	85	88,08	81,87	93 <i>,</i> 93	91,94	84,56
IASmax [m/s]	27,72	26,95	42,22	30	26,03	22,9	24	25,25
IASmax siklási								
szakaszon [m/s]	26,72	26,95	26,5	22,75	23,3	20,1	20,08	21,33
IAS D [m/s]	11,71	12,98	15,88	13,75	28,38	5,52	6,57	11,94
IAS D Siklási								
szakaszon [m/s]	8,52	8,99	6 <i>,</i> 85	2,25	7,44	1,5	1,38	2,17
IAS Átlag [m/s]	17,05	16,82	17,03	20,25	20,83	18,8	18,67	19,7
IAS Átlag siklási								
szakaszon [m/s]	15,88	16	18,73	19,3	18,13	17,6	17,63	17,83
Teljesítmény [W]	-148,6	-121,2	-109	-45	-48	-560	-47	51
Teljesítmény								
siklási szakaszon								
[W]	175,2	101,3	44	168	52	43	68	71

## F.2 TFFT beállítások repülésenként

Donülác	2012 OF 22 /1 Várnalata			
Repules	2013.05.22./1. Varpaiota			
Szenzor	UAV Prandtl-cső			
Szakasz	Süllyedő			
Alkalmazott előszűrés	Tartomány áteresztő szűrés 0,1 – 2Hz Harmonikusok szűrésével			
Minták időköze [s]	0,25			
		FFT szegmens	FFT szegmensek	Eltolás két szegmens
	Frekvenciatartomány (Hz)	hossza	száma	között
1	0,1-0,4	2048	100	182
2	0,4-0,8	2048	100	182
3	0,8 - 2,0	1024	100	192
4	-	-	-	-

Repülés Szenzor Szakasz	2013.05.22./2. Várpalota UAV Prandtl-cső Süllvedő			
Alkalmazott előszűrés Minták időköze [s]	Tartomány áteresztő szűrés 0,1 – 2Hz Harmonikusok szűrűsűvel 0 25			
	Frekvenciatartomány (Hz)	FFT szegmens hossza	FFT szegmensek száma	Eltolás két szegmens között
1	0,1-0,4	2048	100	103
2	0,4-0,8	1024	100	113
3	0,8 - 2,0	1024	100	133
4	_	_	_	-

Repülés Szenzor	2013.11.27./1. Szeged UAV Prandtl-cső			
Szakasz	Süllyedő			
Alkalmazott előszűrés	Tartomány áteresztő szűrés 0,1 – 2Hz Harmonikusok szűrűsűvel			
Minták időköze [s]	0,25			
		FFT	FFT	Eltolás két
		szegmens	szegmensek	szegmens
	Frekvenciatartomány (Hz)	hossza	száma	között
1	0,1-0,4	256	100	31
2	0,4 - 0,8	256	100	31
3	0,8 – 2,0	256	100	31
4	-	-	_	-

Repülés	2013.11.27./2. Szeged				
Szenzor	UAV Prandtl-cső				
Szakasz	Süllyedő				
Alkalmazott előszűrés	Tartomány áteresztő szűrés 0,1 – 2Hz Harmonikusok szűrűsűvel				
Minták időköze [s]	0,25				
		FFT	FFT	Eltolás két	
		szegmens	szegmensek	szegmens	
	Frekvenciatartomány (Hz)	hossza	száma	között	
1	0,1-0,4	256	100		24
2	0,4-0,8	256	100		24
3	0,8 – 2,0	256	100		24
4	_	_	-		_

Repülés Szenzor Szakasz	2013.11.27./3. Szeged UAV Prandtl-cső Süllyedő				
Alkalmazott előszűrés Minták időköze [s]	Tartomány áteresztő szűrés 0,1 – 2Hz Harmonikusok szűrűsűvel 0,25				
	Frekvenciatartomány (Hz)	FFT szegmens hossza	FFT szegmensek száma	Eltolás két szegmens között	
1	0,1-0,4	512	100	43	3
2	0,4-0,8	512	100	43	3
3	0,8 – 2,0	512	100	43	3
4	-	-	-	-	-

Repülés Szenzor	2013.11.28./1. Szeged UAV Prandtl-cső			
Szakasz	Süllyedő			
Alkalmazott előszűrés	Tartomány áteresztő szűrés 0,1 – 2Hz Harmonikusok szűrűsűvel			
	0,25	FFT	FFT	Eltolás két
		szegmens	szegmensek	szegmens
	Frekvenciatartomány (Hz)	hossza	száma	között
1	0,1-0,4	512	100	104
2	0,4 - 0,8	512	100	104
3	0,8 – 2,0	512	100	104
4	-	-	-	-

Repülés	2013.11.28./2. Szeged			
Szenzor	UAV Prandtl-cső			
Szakasz	Süllyedő			
Alkalmazott előszűrés	Tartomány áteresztő szűrés 0,1 – 2Hz Harmonikusok szűrűsűvel			
Minták időköze [s]	0,25			
		FFT	FFT	Eltolás két
		szagmans	szagmansak	szegmens
		szegmens	SZEGINENSEK	Szegmens
	Frekvenciatartomány (Hz)	hossza	száma	között
1	Frekvenciatartomány (Hz) 0,1 – 0,4	hossza 512	száma 100	között 114
1	Frekvenciatartomány (Hz) 0,1 – 0,4 0,4 – 0,8	hossza 512 512	száma 100 100	között 114 117
1 2 3	Frekvenciatartomány (Hz) 0,1 – 0,4 0,4 – 0,8 0,8 – 2,0	hossza 512 512 512 512	száma 100 100 100	között 114 117 117

Repülés Szenzor Szakasz	2013.11.27./1. Szeged OSS Prandtl-cső Süllyedő				
Alkalmazott előszűrés Minták időköze [s]	Tartomány áteresztő szűrés 0,1 – 10Hz Harmonikusok szűrűsűvel 0,053				
	Frekvenciatartomány (Hz)	FFT szegmens hossza	FFT szegmensek száma	Eltolás két szegmens között	
1	0,1-0,4	2048	100		52
2	0,4 - 0,8	2048	100		52
3	0,8 – 2,0	2048	100		52
4	2,0-9,5	512	100		57

Repülés		2013.11.27./2. Szeged				
Szenzor		OSS Prandtl-cső				
Szakasz		Süllyedő				
Alkalmazott előszűrés	;	Tartomány áteresztő szűrés 0,1 – 2Hz Harmonikusok szűrűsűvel				
Minták időköze [s]		0,053				
			FFT szegmens	FFT szegmensek	Eltolás két szegmens	
		Frekvenciatartomány (Hz)	hossza	száma	között	
	1	0,1-0,4	2048	100		36
	2	0,4 - 0,8	2048	100		36
	3	0,8 – 2,0	2048	100		36
	4	2,0 –9,5	512	100		41

Repülés	2013.11.27./3. Szeged				
Szenzor	OSS Prandtl-cső				
Szakasz	Süllyedő				
Alkalmazott előszűrés	Tartomány áteresztő szűrés 0,1 – 2Hz Harmonikusok szűrűsűvel				
Minták időköze [s]	0,053				
	Frekvenciatartomány (Hz)	FFT szegmens hossza	FFT szegmensek száma	Eltolás két szegmens között	
1	0,1-0,4	2048	500		41
2	0,4-0,8	2048	500		41
3	0,8 – 2,0	2048	500		41
4	2,0 -9,5	1024	500		43

Repülés Szenzor Szakasz	2013.11.28./1. Szeged OSS Prandtl-cső Süllyedő				
Alkalmazott előszűrés Minták időköze [s]	Tartomány áteresztő szűrés 0,1 – 2Hz Harmonikusok szűrűsűvel 0,053				
	Frekvenciatartomány (Hz)	FFT szegmens hossza	FFT szegmensek száma	Eltolás két szegmens között	
1	0,1-0,4	2048	500		98
2	0,4 - 0,8	2048	500		98
3	0,8 – 2,0	2048	500		98
4	2,0-9,5	2048	500		98

Repülés	2013.11.28./2. Szeged			
Szenzor	OSS Prandtl-cső			
Szakasz	Süllyedő			
Alkalmazott előszűrés	Tartomány áteresztő szűrés 0,1 – 2Hz Harmonikusok szűrűsűvel			
Minták időköze [s]	0,053			
		FFT	FFT	Eltolás két
		szegmens	szegmensek	szegmens
	Frekvenciatartomány (Hz)	hossza	száma	között
1	0,1-0,4	2048	400	138
2	0,4 - 0,8	2048	400	138
-				
3	0,8 – 2,0	2048	400	138

#### F.3 Esettanulmány TFFT és PSD ábrák











PSD 0,1 Hz - 0,4 Hz, Május és November





#### PSD 0,8 Hz - 2,0 Hz, Május és November