

Salavec Péter, Bordás Árpád, Bozóki Zoltán, Joan Cuxart Rodamilans,
 Istenes Zoltán, Horváth Gyula, Gemma Simó, Nagy Zoltán,
 Tordai Ágoston Vilmos, Torma Péter, Weidinger Tamás, Burkhard Wrenger

REPÜLÉST VESZÉLYEZTETŐ MIKROSKÁLÁJÚ LÉGKÖRI JELENSÉGEK A 2015-ÖS SZEGEDI PLANETÁRIS HATÁRRÉTEG-MÉRÉSI ADATSOROKBAN

A PABLS-2015 planetáris határreteg mérési expedíció során az alsó 100–200 méteres légréteg profilmérései (köttött ballon, kvadrokopter) és az Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ) Szegedi Magaslégköri Observatórium megfigyelései mellett felszíni energiaháztartási mérések is folytak a közeli repülőtéren 2015 nyarán. Két szónikus anemométer került telepítésre 10 Hz-es mérési frekvenciával. A turbulens áramokat a nemzetközi gyakorlatban elterjedten használt TK3 (Bayreuthi Egyetem) és az EddyPro (Li-Cor) szoftverrel számítottuk 5 és 30 perces átlagolási időtartamokkal. Elvégeztük a mérési adatok minőségbiztosítását. Két eset-tanulmányon keresztül mutatjuk be az olyan mikroskálájú jelenségeket (porvihar, zivatar kifutófrontja), amelyek általában nem láthatók a hagyományos repülőtéri meteorológiai észlelésekben, s így váratlan, veszélyhelyzetet teremthetnek. Mindez felhívja a figyelmet a hagyományos mérések és a gyors válaszidejű műszerek együttes alkalmazására, az átlagértékek mellett a szórások és a turbulens áramok meghatározására.

Kulcsszavak: PABLS-2015 Szeged, mikrometeorológia, repülésbiztonság, turbulencia

BEVEZETÉS

Az időjárás egyes jelenségei veszélyeztetik a biztonságos légi közlekedést, ezért elengedhetetlen i) a veszélyes időjárási jelenségek minél korábbi felismerése, ii) kialakulási és bekövetkezési valószínűségük előrejelzése és iii) a felhasználók felé történő megbízható és gyors kommunikációja.

A repülőgépes balesetek nem elhanyagolható része még mindig valamilyen időjárási eseményhez, jelenséghez köthető [1][2][3]. Ezek nagy többsége le- vagy felszállás közben történik, amikor a repülőgép a légkör legalsó rétegében, a planetáris határretegben (PHR) tartózkodik. A planetáris határreteg áramlásainak fő tulajdonsága, hogy ott a Föld felszíne, annak tereptárgyai jelentősen befolyásolhatják az alapáramlást, létrehozva olyan jelenségeket, mint például a belső súrlódás miatt fellépő turbulencia, a felszín nappali inhomogén melegedése miatt létrejövő termikek stb. Ezek a nagyobb veszélyeket rejtő jelenségek – mint egy frontátvonulás, egy-egy zivatar kísérőjelenségei, vagy a köd – mellett szinte bármilyen időjárási alaphelyzetben okozhatnak kellemetlen meglepetéseket a pilóták számára. A PHR szerkezetéről, az ott lejátszódó folyamatokról lásd részletesebben Arya [4], vagy Stull [5] monográfiáját.

A planetáris határretegben zajló folyamatok jobb megismerésére irányuló mérési kampányok fő célja a határreteget leíró elméletek pontosítása, ellenőrzése, s így a numerikus modellek javítása. Általában nem céljuk kiszorgálni a légi irányítás meteorológiai szolgálatát, ugyanakkor a repülőterek környéke kiválóan alkalmas ilyen mérési kampányok lebonyolítására. Nagy ki-

terjedésű, horizontálisan homogénnek tekinthető területek, mely tulajdonság a legtöbb határréteg-elmélet alapfeltevése. Többek között ezért esett a választásunk a Szegedi repülőtérre (PABLS-2013, PABLS-2015 mérési programok) [6][7][8].

A repülőgépek fel- és leszállásánál kiemelt szerepe van a turbulencia ismeretének. A repülőtéri észlelések során leginkább az átlagos szélviszonyokat és a legerősebb széllekeket adják meg. A repülőtéri előrejelzésekben, ha szükségesnek ítélik, szerepel a turbulencia megadására is [9][10]. Az időjárás-előrejelző modellek – amelyekből a repülőtéri előrejelzéseket is készítik – meglehetősen korlátozottan, vagy gyakran sehogy sem képesek leírni a repülésre veszélyes turbulenciát (bár parametrizációk léteznek), de annak előrejelzése legtöbbször az előrejelző szolgálatban lévő szak-emberek tapasztalata alapján történik. A repülőtéri észlelők megfigyelései sokszor nem elég részletesek, illetve célirányosak. A turbulencia-előrejelzések ellenőrzése gyakran csak a pilóták észlelései alapján történik.

A repülőtereken végzett mikrometeorológiai mérési programok lehetőséget biztosítanak a felszínközeli turbulencia detektálására, az előrejelzések ellenőrzéséhez. A PABLS-2015 (Pannon Atmospheric Boundary Layer Experiment in Szeged, 2015) mérési kampány során (2015 nyarán) többször előfordult olyan időjárási helyzet (frontátvonulások, zivataros helyzetek), amikor a határrétegben a turbulencia erős térbeli és időbeli változékonyságot mutatott. Ezek nyomaira bukkantunk a nagy frekvenciás szónikus anemométer adatok feldolgozása során.

A PHR tulajdonságainak vizsgálatok általában a határréteg nappali és éjszakai szerkezetére, az átmeneti időszakok folyamataira (a stabilitás változása napfelkelte után, illetve napnyugta környékén), vagy az energiamérleg lezárhatóságára vagyunk kíváncsiak. Az ezekhez szükséges számítások a Reynolds-átlagolásos módszeren alapulnak. Eszerint egy f változó időbeli átlaga (\bar{f}), pontosabban várható értéke az

$$\bar{f}(t_0, T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f(t) dt$$

integrál alapján számolható, ahol t_0 az integrálás kiinduló időpontja, T , az átlagolási idő. Az átlagértékek alapján megadhatók a fluktuációk (az átlagtól vett eltérések)

$$f'(t) = \bar{f}(t_0, T) - f(t)$$

majd ezek alapján a turbulens áramok (F), vagyis az adott tulajdonság (f) és a vertikális sebesség (w) fluktuációinak a kovarianciája.

$$F(t_0, T) = \frac{1}{T} \int_{t_0}^{t_0+T} f'(t)w'(t) dt$$

Megjegyezzük, hogy a vertikális sebesség átlagértékét (első közelítésként) nullának vesszük, továbbá teljesül, hogy az átlagolási periódussal összemérhető, vagy annál kisebb időskálán az átlag (pontosabban a várható érték) időbeli változása elhanyagolható a fluktuációkéhoz képest.

A nem-stacionárius (időben változó várható értékű) folyamatok leírására nem alkalmasak a Reynolds-módszeren alapuló elméletek. Ugyanakkor a mért pillanatnyi értékek és a számolt turbulens

karakterisztikák alapján becslést adhatunk arra, hogy az elmélet mennyire jól alkalmazható, a kapott eredmények mennyire reprezentatívak a légkör valódi állapotára. Ezekre minőségbiztosítási módszerek állnak rendelkezésre, pl. Foken és Wichura (1996) stacionaritási tesztje, Foken et al. (2004) integrál turbulencia karakterisztika tesztje, mely a turbulencia fejlettségét méri (lásd még Foken et al., 2012), vagy a Spoleto-teszt (a CarboEurope-IP 2004-es Spoleto-i konferencián hozott döntésekről¹ lásd Göckede et al. (2004) és Mauder et al. (2013) cikkét is) [11][12][13][14][15]. A stacionaritás sérüléséért felelhetnek műszeres, vagy a mérési körülményekből származó (pl. hulló csapadék, köd stb.) hibás adatok, de előfordulhat, hogy olyan időjárási jelenségek „zavarják” a mérést, amelyek miatt nem tudjuk leírni a turbulencia valódi állapotát a Reynolds-módszert alkalmazó elméletekkel. A „gyors” és „nagy” változások miatt sérül a stacionaritás, vagyis az átlagos időjárás változása összemérhető a fluktuációkkal a T átlagolási idő alatt.

A két szónikus anemométer és a direkt árammérésre használt H₂O/CO₂ szenzor jeleit 10 Hz-es frekvenciával (másodpercenként 10-szer), míg a többi meteorológiai műszer méréseit perces átlagolással rögzítettük. A turbulens áramokat a nemzetközi gyakorlatban elterjedten használt TK3 programmal (Bayreuthi Egyetem, [16]), valamint a Li-Cor cég által fejlesztett EddyPro [17][18] programcsomaggal számítottuk ki 5 és 30 perces átlagolási időtartamokkal. Elvégeztük a mérési adatok és a turbulens áramok minőségbiztosítását is [16][19]. Az alkalmazott módszertanról, a számítási eredményekről részletesebben lásd Salavec Péter 2016-ban készült diplomamunkáját [20].

Repülésbiztonsági szempontból a fent említett jelenségek nagy kockázattal rendelkeznek. Nemcsak a jól látható jeleket mutató eseményekről van szó, mint a zivatarok vagy a frontátvonulás kísérőjelenségei, hanem olyan veszélyforrásokkal is számolnunk kell, mint a váratlanul megélnékülő szél, az általa keltett hirtelen megerősödő turbulencia, egy-egy erősebb termik áthaladása a területen, amelyek nem hordoznak vizuális jegyeket. Ezek kis méretük és rövid élettartamuk miatt még a nagyfelbontású regionális időjárás előrejelző modellek számára is előrejelezhetetlenek, de az észlelők elől is könnyen rejtve maradnak. Ugyanakkor a mikrometeorológiai mérések elég pontosak és gyorsak ahhoz, hogy észrevehessük azokat, így rövidítve a reakcióidőt az ilyen helyzetekben bekövetkező veszélyhelyzetekre.

A következőkben ismertetjük a PABLS-15 mérési kampány műszerezettségét, majd két esettanulmányon keresztül bemutatjuk a mikrometeorológiai mérések repülésmeteorológiai alkalmazhatóságát. A cikket összefoglalás és részletes irodalomjegyzék zárja.

A MÉRÉSI ELRENDEZÉS

A PABLS-2015 mikrometeorológiai mérési kampány helyszínéül a szegedi repülőtér és az OMSZ közelben lévő Magaslégköri Observatóriuma szolgált. A mérési program 2015. június 16. és szeptember 8. között zajlott. Az intenzív mérési periódus (10 nap) július első felében volt. Ekkor került sor a kötött ballonos és a kvadropteres mérésekre. A mérésekben részt vevő főbb intézmények, a telepített műszerek, és az általuk szolgáltatott adatok az alábbi listán szerepelnek (ahol az külön nincs jelezve, a mérések a repülőtér délnyugati végében felállított mikrometeorológiai állomáson zajlottak; É. sz. 46°14'23,13", K. h. 20°5'22,72").

¹<http://carboeurope.org/ceip/products/spoleto.htm> (2017. 03. 06)



1. ábra Balra a BME-vel közös örvénykovariancia-mérések, a két szinten elhelyezett 2D szónikus anemométer és a Väisälä hőmérséklet-nedvesség szenzorok, jobbra a METEK USA-1 szónikus anemométer a „háromlábos” a PABLS-15 expedíció során

→ **Bolyai Tehetséggondozó Gimnázium, Zenta**

- Kvadrokopteres mérések;
 - Légnyomás, hőmérséklet és nedvesség profilok az alsó 100 m-es rétegben a repülőtér központi területén.

→ **BME Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék**

- Campbell 2D szónikus anemométer (Campbell WINDSONIC 4-L) (1. ábra);
 - Két darab szenzor, 0,5 és 2 méter magasan, szélsébség-komponensek (u, v) mérése;
- Väisälä HMP-45 hőmérséklet és relatív nedvesség szenzorok a 2D szónikus anemométerrel megegyező magasságokban;
- Örvény-kovarianciamérő állomás (1. ábra);
- Az alábbi műszerek egy oszlopon, 1,5 méter magasan lettek elhelyezve, és tíz másodpercenként szolgáltatották az adatokat:
 - Campbell CSAT3 szónikus anemométer;
 - Három szélkomponens és szónikus hőmérséklet;
 - Campbell EC150 gázanalizátor;
 - CO₂- és vízgőz-koncentráció, környezeti („állomásszinti”) légnyomás és hőmérséklet;

→ **Debreceni Egyetem, Meteorológiai Tanszék**

- METEK-PCS.2000-64 Doppler SODAR;
 - Az alsó 300–500 méter szélsébség és turbulencia intenzitás adatai 2015. július 24-ig. A műszer az OMSZ-állomáson lett felállítva.

→ **ELTE, Meteorológiai Tanszék**

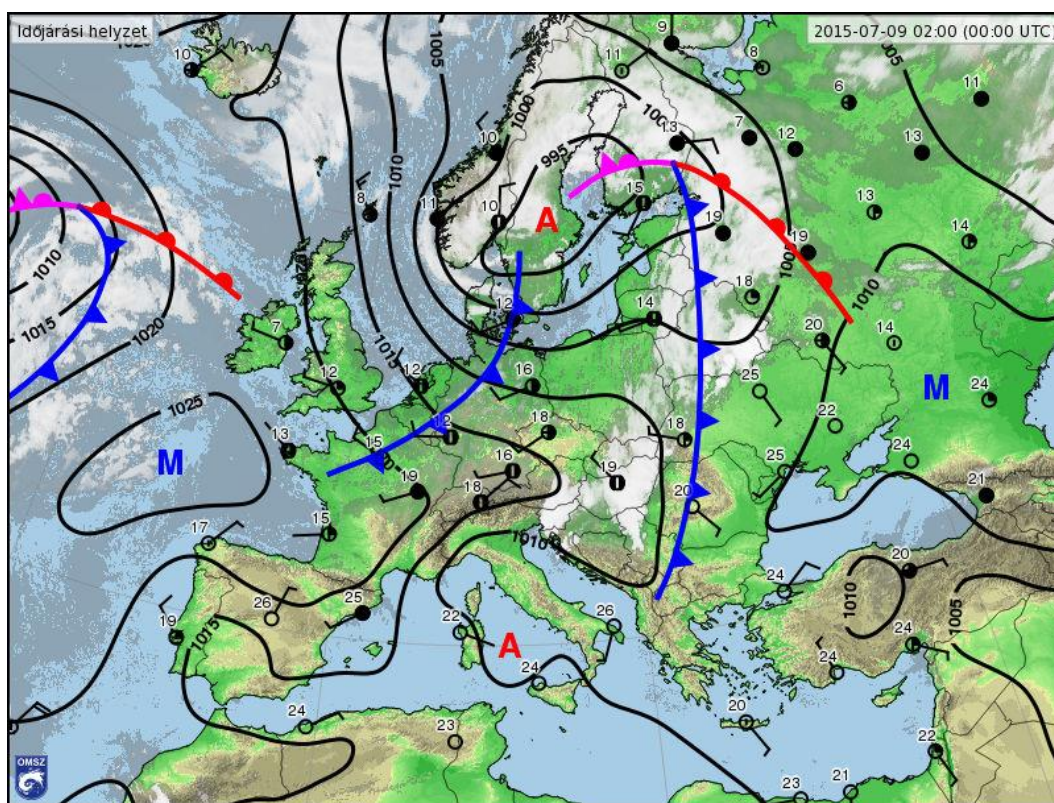
- METEK-USA1 szónikus anemométer (1. ábra);

- Három szélkomponens és szónikus hőmérséklet tizedmásodpercenként, 2,6 m magasan;
 - Sugárzásmérő oszlop;
 - Minden alább felsorolt műszer egy oszlopon, 180 cm magasan volt elhelyezve, és perces átlagolt adatokat szolgáltatott:
 - Kipp & Zonen CNR1 és Campbell-Q7 sugárzásegyenleg mérő;
 - Kipp & Zonen PAR-Lite direkt és visszavert fotoszintetikusán aktív sugárzás;
 - Schenck-1043 piranométer, globálsugárzás;
 - Campbell IRTS-P infravörös hőmérő, felszínhőmérséklet;
 - Talaj-energiaháztartás mérések:
 - Campbell-107 talajhőmérők (2, 5, 10 és 20 cm-es mélységben);
 - Campbell CS616 talajnedvesség mérő szenzorok 5, 10 és 20 cm mélyen;
 - 2 db Campbell HFP01SC önkalibráló hőárammérő 8 cm mélyen;
 - Campbell 237-L levélnedvesség-mérő;
 - Young 52202 billenőkanalas csapadékmérő.
- **Hochschule Ostwestfalen-Lippe**
- MEMSIC eKo-S2000 teljes mikrometeorológiai mérőállomás: csapadék, hőmérséklet, légnedvesség, légnyomás, sugárzási komponensek perces átlagai;
 - Kvadrokopteres mérések az alsó 200 m-ben: infravörös sugárzás (hőmérséklet, nedvesség) és magasságmérések az intenzív mérési periódusok alatt.
- **Országos Meteorológiai Szolgálat, Szegedi Magaslégköri Obszervatórium**
- Az állomás (12982) standard meteorológiai mérései;
 - Väisälä és GRAW rádiószondák;
 - Napi két felszállás, 00 és 12 UTC-kor;
 - Radiometrics MP-3000A radiométer;
 - Hőmérséklet és nedvességprofilok tízpercenként;
 - Väisälä LAP-3000 windprofiler és RASS-SODAR;
 - Szél- és virtuális hőmérsékleti profilok, turbulencia intenzitás a mérési kampány második felében;
 - GRAW DFM-09 típusú rádiószonda;
 - Hőmérséklet, relatív nedvesség, légnyomás, geopotenciál, GPS jel alapján számított szélesebbesség, szélirány és magasság másodpercenként.
- **Universitat de les Illes Balears, Equip de Turbulencia Atmosférica**
- Saját tervezésű szonda és kötött ballon;
 - Hőmérséklet, légnedvesség, szélesebbesség (hődrótos szenzor) a repülőtér központi részén az IOP-ok (intenzív mérési periódusok) alatt;
 - Campbell 107 talajhőmérők;
 - Talajhőmérséklet csupasz talaj, elszáradt és zöld fű alatt 1cm mélyen, saját árnyékolóval 5 és 10 cm magasan, továbbá az OMSZ-os szellőztetett (aspirációs) árnyékolóival 20, 30, 50 és 100 cm magasan a mikrometeorológiai mérőplatformon a kifutópálya végénél.

A mérőrendszer kialakításáról, az adatfeldolgozás első eredményeiről részletesebb ismertetés található Cuxart et al. (2016) és Tordai (2016) munkájában [8][21]. A következőkben a szónikus anemométeres mérésekre koncentrálunk. Két repülésmeteorológiai szempontból érdekes esetben vizsgáljuk a meteorológiai állapotjelzők és a turbulencia-karakterisztikák viselkedését.

ESETTANULMÁNYOK

Olyan helyzeteket elemeztünk, amikor a hivatalos időjárás előrejelzések alapján várható volt valamilyen gyors lefolyású időjárás változás. Ezekben az esetekben a nagyfrekvenciás adatsorokból számolt turbulens karakterisztikák egy része irreális értékeket vett fel, rossz adatminőségi jelzőkkel. A gyorsan zajló változások miatt sérültek a Reynolds-módszer alkalmazhatóságához szükséges feltételek. Az események lefolyását a hivatalos észlelések és a nagyfrekvenciás mérési adatok elemzésével rekonstruáljuk. Megkíséreljük feltárni az irreális értékek keletkezésének az okát. A turbulencia-karakterisztikákat (turbulens áramok és szórások) a CSAT3 – EC150 rendszer adataira támaszkodva a TK3 (TurbulenzKnecht 3.11, Mauder és Foken, 2015) szoftver alkalmazásával mutatjuk be [16]. A két szónikus anemométer, illetve a két – korábban említett – adatfeldolgozó program összehasonlításáról Salavec (2016) munkájából tájékozódhatnak [20].



vonult át a front, ami már az éjféle órákban elhagyta Szeged térségét (2. ábra). A frontról részletesebb tanulmány született Horváth Ákos jóvoltából, amely az Országos Meteorológiai Szolgálat honlapján elérhető². A délkeleti eseményekről pedig a delmagyar.hu hírportál élőben közvetített³. (A mikrometeorológiai méréseket – a villámveszély miatt – 22:40 UTC-kor leállítottuk.)

Az események leírása a repülőtéri és a szinoptikus észlelések alapján

A Szegeden történt zivataros események a hidegfront második hullámához tartoztak. Az első hullám zivatarjai észak felől elkerülték a környéket, azonban a talajfront mögött északnyugatra fordult és átmenetileg megélnkült a szél, porvihart okozva a repülőtér környékén és a kb. 1,5 km-re lévő szinoptikus állomáson is. A repülőtéri észlelések között 17:13 UTC-kor jelent meg az első SPECI távirat 30 kt-s (15 m/s) széllelkéssel (SPECI LHU081713Z AUTO 24008G30KT //// ///// 32/16 Q1007=), majd egy perc múlva követte a porvihar–homokvihar jelenidő. Az addigi tiszta (CAVOK) látási viszonyokról 5 km-re csökkent a látástávolság, és tornyos gomolyfelhők jelentek meg (SPECI LHU081714Z 25009G29KT 5000 DS SS FEW053TCU SCT083 32/18 Q1007=). A szél 17:26 UTC-re északnyugatra fordult, a levegő hőmérséklete pedig mintegy 6 °C-kal csökkent (SPECI LHU081726Z AUTO 32020G34KT //// ///// 26/18 Q1008=). 18:15 UTC-re aztán „megnyugodott” az időjárás (METAR LHU081815Z 35008KT 9999 FEW040TCU 24/18 Q1007=). A szinoptikus észlelésekben 17 UTC-ről (AAXX 08171 12982 41760 32004 10333 20162 39960 40052 55006 70300 81282 333 81856 555 10036 55091=) 18 UTC-re (AAXX 08181 12982 11958 33109 10249 20174 39983 40078 53023 60002 70130 81062 333 10365 30/// 90710 91117=) az északnyugatra forduló megélnkülő szél látható, elmúlt időben por- vagy homokvihar, valamint a távirat végéről leolvasható az elmúlt órában mért 17 m/s-os maximális széllelkés.

Az előző átmeneti időjárás változás után a fő események csak később következtek be. 20 UTC-kor észleltek először villogást (AAXX 08201 12982 41970 23503 10225 20181 39981 40077 52021 71300 81082 555 10076=), 22 UTC-kor pedig már dörgött az ég, és újra megerősödött a szél, ismét előfordultak 17 m/s-os lökések is (AAXX 08221 12982 41665 63210 10216 20145 30019 40115 52045 71792 83980 333 81940 82846 555 10064 55174=). A repülőtéri észlelések szerint 20:58 UTC-kor érkezett egy 24 kt-s (12 m/s) széllelkés (SPECI LHU082058Z AUTO 31014G24KT //// ///// 22/17 Q1011=), két perc múlva pedig meghallották az első dörgést (SPECI LHU082100Z 31014KT 9999 TS FEW040CB SCT083 22/17 Q1011=). A csapadék 21:49 UTC-kor érkezett (SPECI LHU082149Z 33021G35KT 9999 TSRA FEW040CB SCT083 21/15 Q1012=), így a 22 UTC-s SYNOP táviratba még nem került bele. A zivatar és a csapadék ezután hajnalig kitarzott, majd reggelig gyengülő zivatartevékenység és mérséklődő szél volt jellemző. (A mikrometeorológiai mérések reggeltől folytatódtak.)

A repülőtéren észlelt mikrometeorológiai jelenségek

A repülőtéren zajló mikrometeorológiai mérésekből származó adatsorokon is végig követhető az események alakulása. A hidegfront első hulláma olyan változásokat okozott, amelyek irreális, kiugró értékeket eredményeztek a félórára átlagolt turbulens karakterisztikákban (3. ábra).

²http://www.met.hu/ismeret-tar/erdekessegek_tanulmanyok/index.php?id=1350&hir=Forro_periodust_zaro_zivataros_hidegfront,_szupercellakkal_julius_8-an

³http://www.delmagyar.hu/idojaras/ejfel_elott_ert_ide_a_vihar_fakat_csavart_ki_a_szel_de_szeged_fel-frissult_-_fotok/2437087/

A nyomás minimuma a front első hullámának érkezése előtt, még 16 UTC körül állt be. 17 UTC után, a porvihar érkezésekor, egy átmeneti nyomásmaximumot láthatunk, majd az átmeneti csökkenés után a zivartevékenység „leállásig” folyamatosan nyomásemelkedés volt tapasztalható, kb. 1 hPa/óra intenzitással. A szél 17 UTC után északira fordult és megélnkült, majd az éjszakai zivatarok érkezése előtt átmenetileg újra legyengült. A front első hulláma közel 10 °C-os hőmérséklet-csökkenést hozott kevesebb mint egy óra alatt, valamint némi nedvességet is (csapadék hullás közben egyébként a direkt árammérő műszer nem tudta jól mérni a nedvességet, lásd később a másik esettanulmányt).

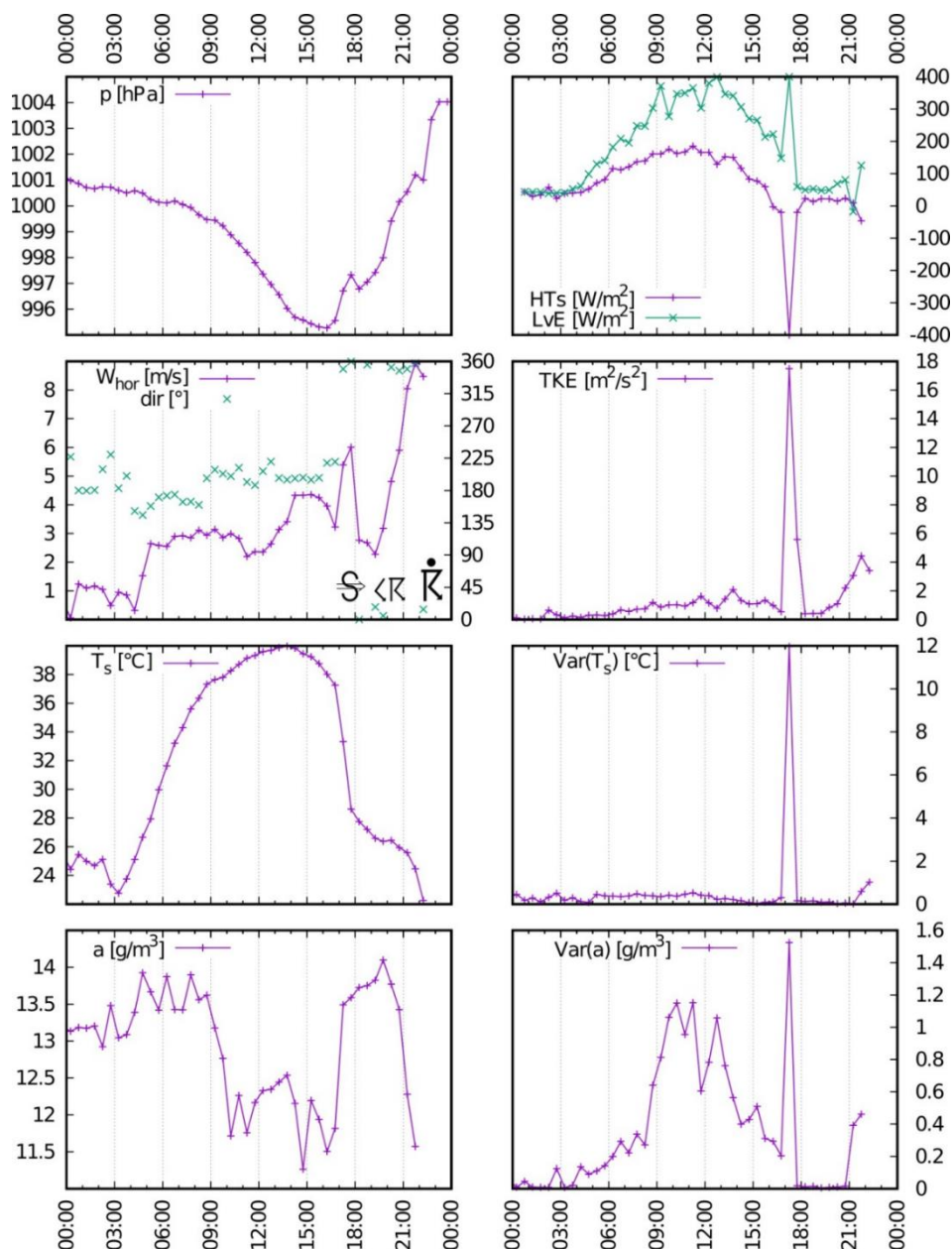
A turbulens karakterisztikák közül a szónikus hőmérsékletből számolt szenzibilis hőáram (HT_s) a porvihart magában foglaló fél órára irreálisan alacsony értéket mutat, holott amikor a meleg felszín fölé hideg levegő érkezik, akkor pozitív kiugrást kellene tapasztalnunk. Ennek magyarázatát később megadjuk. A látens hőáram (L_vE) az érkező nagyobb nedvességtartalmú levegő és a szél megerősödése miatt szenved pozitív kiugrást. A turbulens kinetikus energia (TKE), valamint a szónikus hőmérséklet ($Var(T_s)$) és az abszolút nedvesség ($Var(a)$) szórásai szintén irreálisan magasra ugranak. A TKE esetében ez nem magyarázható a szélerősődéssel, hiszen akkor az esti zivatarok érkezésekor is hasonlóan magas értékeket kellene detektálnunk. Érdekes még, hogy az abszolút nedvesség szórása a porvihar után gyakorlatilag eltűnik, csakúgy, mint a látens hőáram. Ennek oka valószínűleg az, hogy az advekción által érkező nagyobb nedvességtartalmú levegő, illetve a besugárzás megszűntével lecsökkent a párolgás és megszűnt a termikképződés is. Az addig pozitív sugárzási egyenleg előjelet váltott.

UTC	16:45	17:15	17:45	18:15
$ITC(W_{hor})$	1	7	4	1
$ITC(w)$	2	2	3	2
$ITC(T_s)$	1	4	3	4
$stat(u'w')$	1	4	1	1
$stat(T_s'w')$	1	5	3	3
$stat(a'w')$	1	5	2	3
u^*	1	8	3	1
HT_s	1	6	5	1
L_vE	1	6	3	4

1. táblázat Foken és Wichura (11) sémája szerinti adatminőségi értékek (részletek: Mauder és Foken, 2015, 4. fejezet (16)) 2015. július 8-án, a porvihar ideje alatt. Az időpontok az átlagolási intervallumok közepét jelölik. A legjobb adatminőség az 1-es, a legrosszabb a 9-es. W_{hor} a horizontális, w a vertikális sebesség, T_s a szónikus hőmérséklet, u^* a súrlódási sebesség, a az abszolút nedvesség. A vesszős tagok a fluktuációkat jelölik. HT_s a szenzibilis, L_vE a látens hőáram. ITC az integrál turbulencia karakterisztika, $stat$ a stacionaritási teszt.

A következő lépésben megvizsgáljuk a direkt árammérések adatminőségét (1. táblázat). Az általunk használt osztályozási rendszerben (16) az 1-es érték jelenti a legjobb minőséget. A legrosszabb a 9-es, amelyeket semmiképpen sem szabad felhasználni. A 7–8 kategóriában, bár az adatminőség rossznak mondható (a stacionaritási teszt alapján), az adatok feldolgozása során még mindig jobbakká tekinthetők, mint ha helyettük valamilyen interpolált értéket használnánk. A porvihar fél órájában e kategóriát mindössze a szélesebb, és ezen keresztül a súrlódási (vagy dinamikus) sebesség érte el. (A súrlódási sebesség az impulzusáram gyökével arányos.) Minden

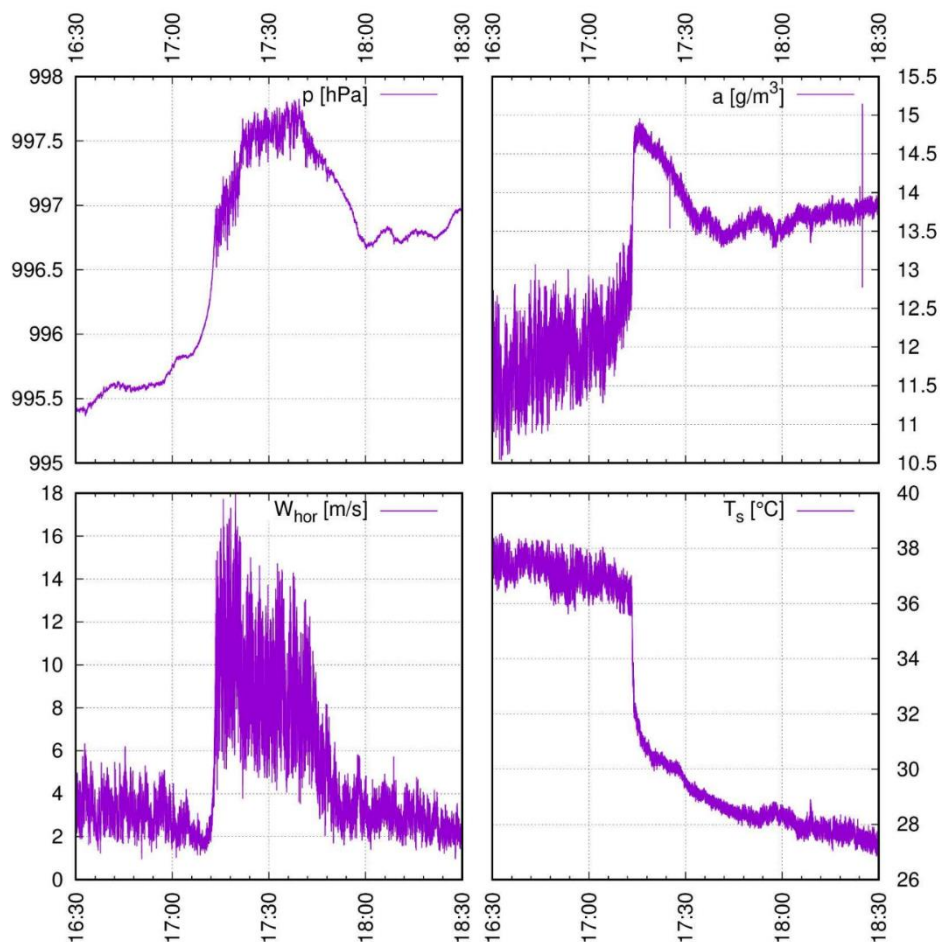
más turbulencia karakterisztika adatminősége a 4–6 tartományban maradt (ezeket elméletek ellenőrzésére nem használhatjuk, de az adatsorban megszorítás nélkül benne maradhat). Ez arra utal, hogy az adatsorokban észlelhető jeleket, változásokat meteorológiai jelenség okozta.



3. ábra Félórás időszakra átlagolt turbulens karakterisztikák a CSAT3 – EC150 rendszer adatai alapján 2015. július 8-án. Bal oldalon fölülről lefelé az átlagos nyomás (p , [hPa]); a szélesség (u , [m/s], lila) és az átlagszél iránya (dir , [fok], zöld); az átlagos szónikus hőmérséklet (T_s , [°C]) és az átlagos abszolút nedvesség (a , [g/m³]).

Jobb oldalon a szenzibilis (HT_s , [W/m²], lila) és a látens (L_vE , [W/m²], zöld) hőáram; a turbulens kinetikus energia (TKE , [m²/s²]), a szónikus hőmérséklet szórása ($Var(T_s)$, [°C]) és az abszolút nedvesség szórása ($Var(a)$, [g/m³]). A szél diagramjában a szinoptikus állomáson (12982) észlelt jelenidők piktogramjai is szerepelnek

Az esti időszakban, amikor a zivatarok megérkeztek, a nedvességet tartalmazó turbulens karakterisztikák mind 8-as, vagy 9-es minőségi értékeket kaptak. Az EC150 műszer csapadékos időben hibásan méri a légnedvességet, így a látens hőáram értékei használhatatlanná váltak (ezt követően le is állítottuk a mérést).



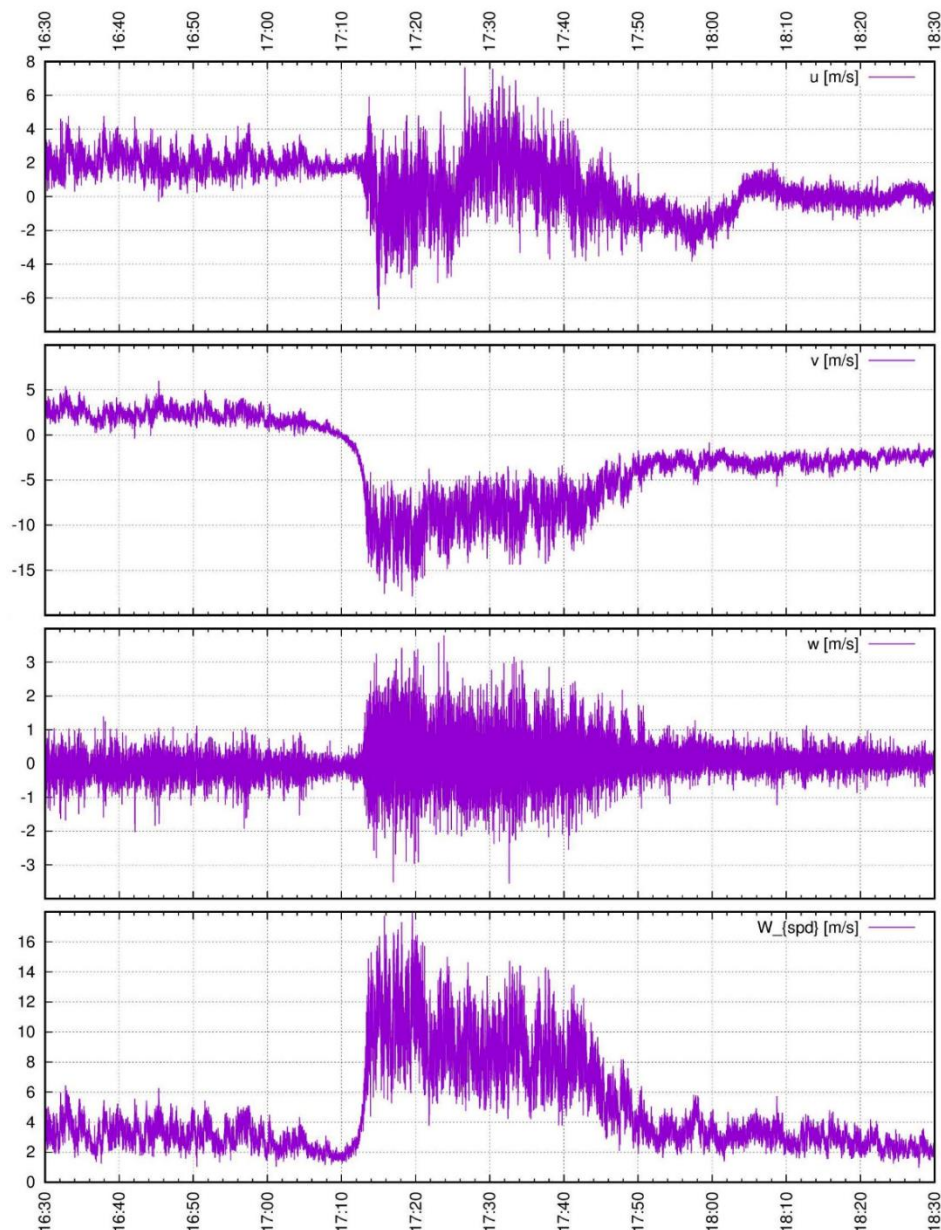
4. ábra A CSAT3 – EC150 rendszer által szolgáltatott 10 Hz-es adatok a porvihar körülölelő időszakban 2015. július 8-án: légnyomás (p , [hPa], balra fent), horizontális szélesség (W_{hor} , [m/s], balra lent), abszolút nedvesség (a , [g/m³], jobbra fent), szónikus hőmérséklet (T_s , [°C], jobbra lent).

Végül vizsgáljuk meg a nagy felbontású adatsorokat! A porvihar körülölelő időszak eseményei jól elemezhetők a 4. ábra alapján. A porvihar okozó szelerősödés időtartama kb. fél óra volt, ez alatt több fokkal visszaesett a hőmérséklet, és „benedvesedett” a levegő. Fontos észre venni a turbulencia intenzitás-változását. A porvihar érkezésekor hirtelen megerősödött a szél, és bár utána folyamatosan mérséklődött, csak fél óra múlva állt vissza a porvihar előtti szélesség értékre (iránya északias maradt).

A porvihar előtt erősen emelkedni kezdett a légnyomás, s a porvihar alatt érte el maximumát, utána átmenetileg ismét csökkent. Érdekesség, hogy ebben az időszakban megjelent a nyomás jelentős, néhány tized hPa-t átfogó fluktuációja (az EC150 nyomásmérési frekvenciája egyébként 1 Hz). Az abszolút nedvesség szintén jelentősen megnőtt a porvihar érkezésekor, majd fokozatosan csökkent kb. 17:40 UTC-ig, fluktuációja viszont erősen visszaesett. Ezzel együtt a hőmérséklet először mintegy 6 °C-kal esett vissza, majd további lassuló csökkenést figyelhetünk meg. A fluktuációk szintén lecsökkentek.

A 4. ábra közölt menetek magyarázataként szolgálhat, hogy az addig instabil nappali felszínközeli rétegződésű légtömegbe északnyugat felől betört a nem messze elhaladó zivatarok kífutófrontja, mely a környezeténél hidegebb, és nedvesebb volt. Ebben a légtömegben neutrális rétegződés

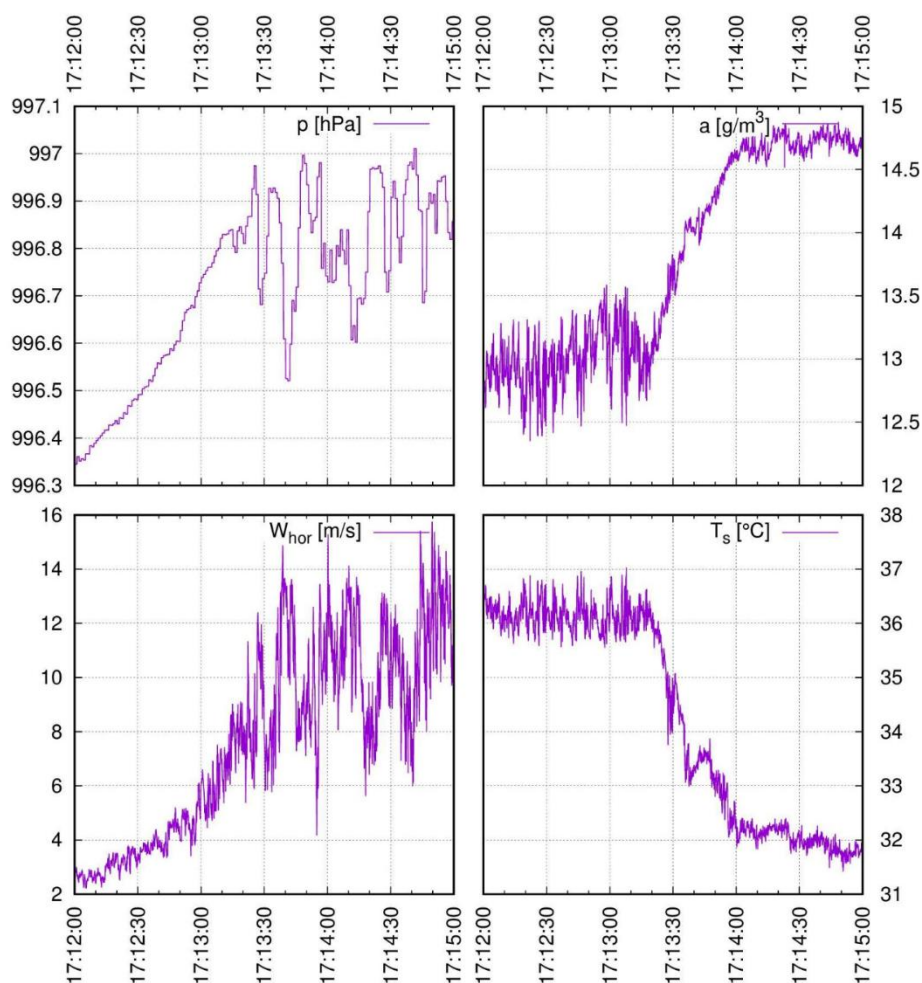
alakulhatott ki, az addig képződő termikék megszűntek, s a párolgás – ahogy korábban már említettük – a növekvő légköri relatív páratartalomnak is köszönhetően jelentősen csökkent. A neutrális rétegződésben szintén a termikék hiánya miatt csökken a hőmérséklet fluktuációja. A szélkomponensek menetét az 5. ábra mutatja. Ezeken jól látszik, hogy az áramlás északi komponense (v) nőtt jelentősen, így a szélirány átmenetileg északira fordult. Jelentősen megnőtt a vertikális áramlás fluktuációja is, vagyis az erősödő áramlásból (jelentősen nőtt a szélesebbesség) származó mechanikai turbulencia sokkal erősebb volt, mint korábban a termikus turbulencia.



5. ábra A CSAT3 – EC150 rendszer által szolgáltatott szélkomponens-adatok (u , v , w és a 3D áramlási sebesség W_{spd}) a porvihart körülölelő időszakban 2015. július 8-án. A szokásos jelölések szerint a koordináta-rendszerünk x , y , z tengelye rendre keletre, északra és a helyi függőleges irányába mutat

Ilyen esetekben könnyen előfordulhat, hogy a kifutófront érkezésére az észlelők nem számítanak, így az épp leszálló repülőgépek komoly veszélyhelyzetbe kerülhetnek. Hasonló veszélyhelyzetek akkor háríthatók el, ha a pilóták még a repülőtér közelébe érkezésük előtt értesülnek a várható változásról. Ez akkor lehetséges, ha a jelenséget legalább néhány perccel korábban

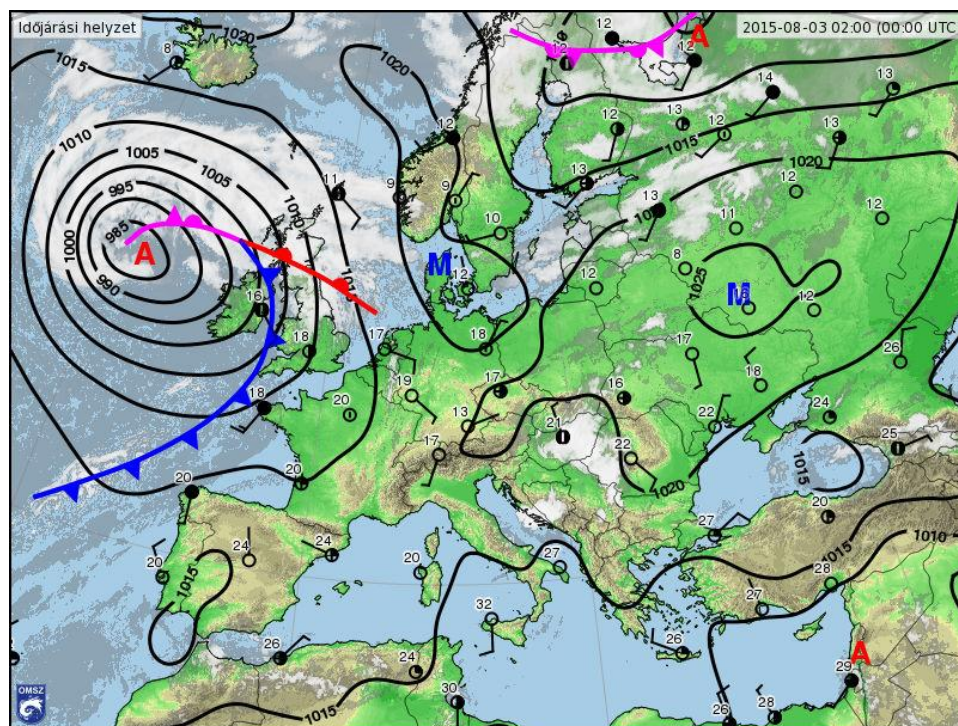
felfedezik, és azonnal jelzik a pilóták felé. Ilyen helyzetben mindenképp segítene, ha a mikrometeorológiai mérések folyamatosan a repülőtéri észlelők rendelkezésére állnának, így valós időben nyomon követhetnék a hirtelen bekövetkező változásokat.



6. ábra A CSAT3 – EC150 rendszer által szolgáltatott 10 Hz-es adatok a porvihar érkezésének három percében 2015. július 8-án: légnyomás (balra fent), szélesség (balra lent), abszolút nedvesség (jobbra fent), szónikus hőmérséklet (jobbra lent)

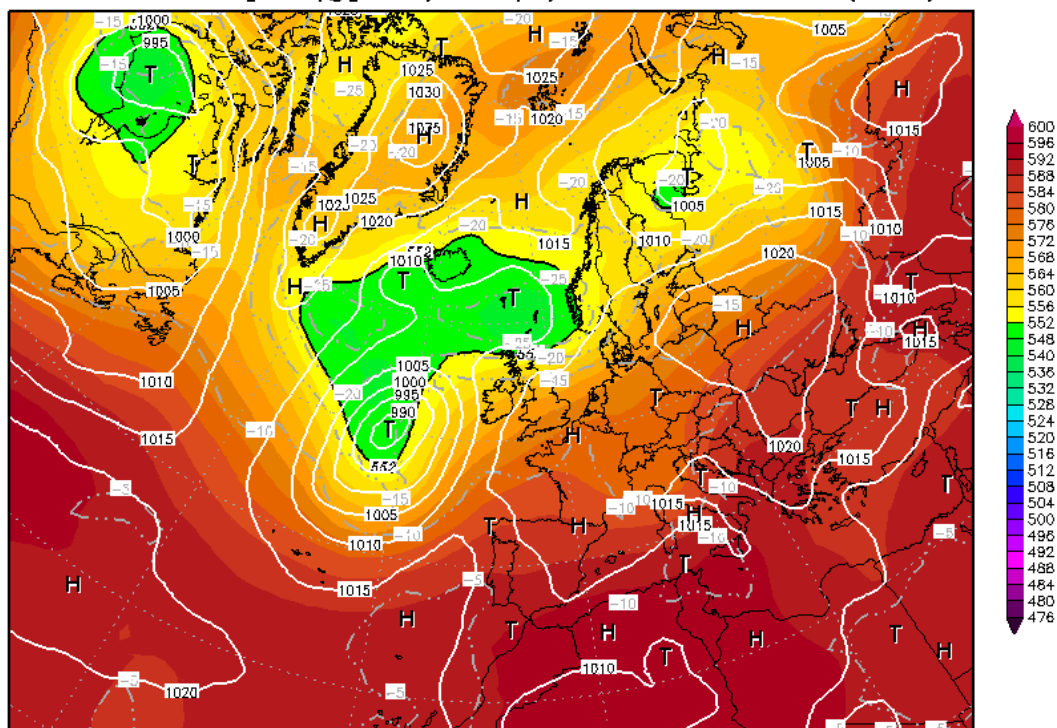
2015. 08. 02. Délutáni, esti zivatarok

E napon az előrejelzések alapján magassági hidegörvény hatására egyre labilisabbá váló légkörben zivatarok, a déli országrészben heves zivatarok kialakulására lehetett számítani. Az előző esethez képest jóval kevésbé előzte meg fokozott várakozás e napot, hiszen a heves események valószínűsége jóval kisebb volt, és jóval kisebb területre is korlátozódott. A médiában sem lehetett sokat hallani a zivatarok lehetőségéről. Az OMSZ frontanalízis térképén (7. ábra) csak a Kárpát-medencétől északkeletre lévő anticiklon peremén látható egy ciklonális görbület. A GFS előrejelzési modell reanalízisen (8. ábra) viszont már felfedezhető tőlünk nyugatra a gyenge magassági hidegörvény.



7. ábra Az OMSZ frontanalízis térképe 2015. augusztus 2-án 00 UTC-kor

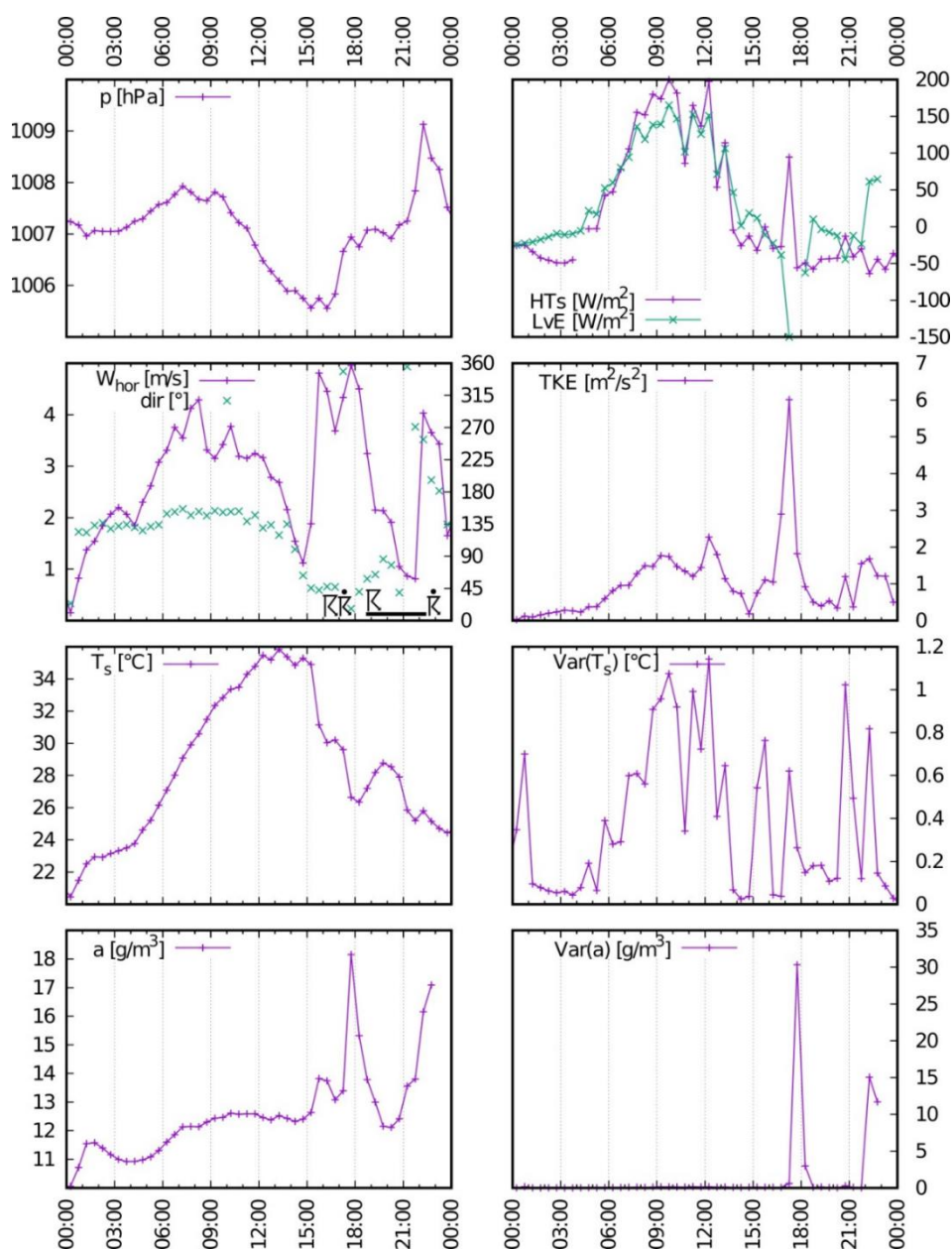
Init : Sun,02AUG2015 00Z Valid: Sun,02AUG2015 00Z
 500 hPa Geopot.(gpm), T (C) und Bodendr. (hPa)



Daten: GFS-Modell des amerikanischen Wetterdienstes
 (C) Wetterzentrale
 www.wetterzentrale.de

8. ábra A GFS reanalízise az 500 hPa-os nyomási szinten 2015. augusztus 2. 00 UTC-re. A jobboldali színskála a geopotenciál magasságokat jelöli [gpm]. Az izotermákat [°C] a szürke szaggatott vonalak, a tengerszíni légnyomás izobárjait [hPa] fehér folytonos vonalak jelzik

Az események leírása a repülőtéri és a szinoptikus észlelések alapján



9. ábra Félórás intervallumokra átlagolt turbulens karakterisztikák a CSAT3 – EC150 rendszer adatai alapján 2015. augusztus 2-án. A jelölések megegyeznek a 3. ábra közöltekkel

Az események Szeged térségében helyi idő szerint fél öt körül indultak, amikor a város mellett erős zivatar alakult ki. Ez a repülőtér közvetlen közelében, attól északra kezdett el fejlődni, majd észak-északkelet felé vonult. Az OMSZ 14:40 UTC-s radarképén jelent meg először. Érdekesége, hogy sem a repülőtéren, sem a közelebb eső OMSZ állomáson nem észlelték magát a zivatart. Mindkét helyen csak a zivatarfelhőt látták (METAR LHUO 021445Z 07003KT 9999 FEW040CB SCT051 31/18 Q1016=, AAXX 02151 12982 41675 70702 10307 20178 30062 40156 56011 70322 85382 333 82940 83850 555 10046=). Később a nyugatabbra kipattant zivatartok már „eltalálták” Szegedet. A repülőtéren 16:07 UTC-kor észleltek zivatart (SPECI LHUO 021607Z 02010KT 9999 TS FEW026 BKN033CB 26/18 Q1016=), a szél azonban csak jóval később, 17:26 UTC-re élénkült meg (SPECI LHUO 021726Z AUTO 30012G34KT //// // 26/17 Q1017=), amikor a zivatar a város fölött megerősödött, és ekkor is csak átmenetileg. A

zivatartevékenység ezután kb. 00 UTC-ig kitartott kisebb megszakításokkal, közben még egy átmeneti szélerősődéssel 22:11 UTC-kor (SPECI LHUO 022211Z AUTO 21012G24KT //// // 22/18 Q1020=). A hőmérséklet visszaesése már az első, közelben kipattant zivatar elvonulása után megtörtént (METAR LHUO 021545Z 01012KT 9999 BKN040 BKN200 27/18 Q1016=).

A repülőtéren észlelt mikrometeorológiai jelenségek

Az előző esettanulmány gondolatmenetét követve elsőként a félórás átlagolással számított turbulencia-karakterisztikákat mutatjuk be. A 9. ábra látható, hogyan jelentkezik ezekben az állomás közelében kipattant zivatarok hatása. A délutáni, kora esti órákban a környéken, vagy kissé nyugatabbra kipattant zivatarok „kerülgették” a repülőteret kb. 3–5 km-es távolságban, majd kis szünet után éjfél körül egy fejlettebb, de leépülő félben lévő zivatarlánc érkezett délnyugat felől.

A szónikus hőmérséklet félórás (szórás értékei egész nap jelentős ingadozásokat mutatott, így nem lehet eldönteni, hogy a 14:30 UTC után jelentkező ingadozások a zivataroknak tudhatókébe. Ugyanakkor maga az átlag 15 UTC-ig nem mutat jelentős változásokat (belesimul a várt napi menetbe), 15 UTC után azonban már megjelenik a zivatarok hűtő hatása. A légnyomás minimuma is ekkor „állt be”, a szél pedig délkeletiről északkeletre fordult. A szenzibilis (HT_s) és a látens (L_vE) hőáram, a turbulens kinetikus energia (TKE) és az abszolút nedvesség (a) adatsoraiban a legjelentősebb kiugrások 18 UTC előtt jelentkeznek. A szónikus hőmérsékletben ekkor egy újabb visszaesés következett be, s egy újabb szélmaximumot is láthatunk. Az utolsó zivatar ideje alatt, éjfél körül, csak az abszolút nedvesség szórása és a légnyomás emelkedett meg, a szél iránya pedig 2–3 óra alatt 360° -os fordulatot tett, ahogy a zivatar körül kialakuló lokális áramlások a cella vonulása közben folyamatosan módosították a szélirányt.

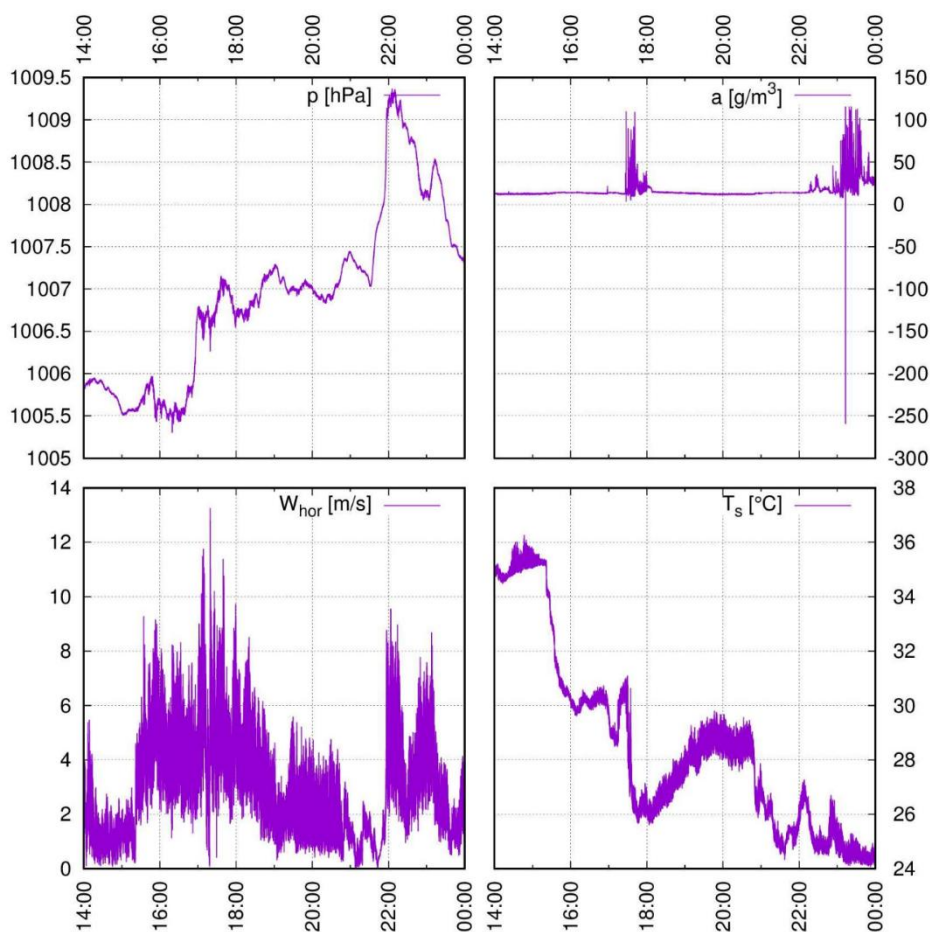
UTC	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23
ITC(W_{hor})	3 3	6 2	2 7	1 3	1 2	5 4	3 5	6 6	3 2	4 2
ITC(w)	2 2	1 2	1 6	3 1	1 1	1 2	1 1	3 3	1 1	1 2
ITC(T_s)	7 2	7 6	4 7	2 3	2 2	4 2	3 8	6 6	6 3	1 1
stat($u'w'$)	2 1	4 1	1 4	3 1	1 1	1 1	1 4	4 4	1 1	1 1
stat($T_s'w'$)	7 1	5 7	6 6	6 1	1 2	3 1	1 6	5 4	4 3	2 1
stat($a'w'$)	2 1	3 2	6 4	6 9	7 2	6 1	1 6	5 4	3 3	9 9
u_*	3 3	7 1	1 8	5 3	1 1	5 3	3 5	7 7	3 1	3 1
HT_s	8 1	6 8	7 7	7 4	1 2	4 1	1 7	6 5	4 4	5 4
L_vE	2 1	4 2	7 7	7 9	8 2	7 1	1 7	6 5	6 4	9 9

2. táblázat Foken és Wichura (1996) (11) sémája szerinti adatminőségi értékek (részletek: Mauder és Foken, 2015, 4. fejezet (16)) 2015. augusztus 2-án, a zivatarok ideje alatt. Az időpontok az órát jelölik, a két érték az adott óra első és második félóráját jelöli

A következő lépésként megvizsgáljuk az adatminőségi értékeket. Azokban az időszakokban, amikor erősebb volt a szél (14, 17, 18 és 23 UTC), az adatminőség csökken, vagyis fejlettebb a turbulencia. Hasonló mintázatot láthatunk a szónikus hőmérséklet és a súrlódási sebesség (u_*) esetén is. A statisztikai tesztek a Reynolds-feszültségre (impulzusáram) nem adnak magas értékeket, 4-es a legrosszabb. A hőáramok esetében azonban gyakran fordul elő 7-et elérő, vagy meghaladó érték, a nedvességmérés hibája miatt (amit a csapadékhullás okoz) pedig a 17:45 UTC körüli fél órában, valamint 23 UTC-kor nem is született értelmezhető eredmény a látens hőáramra. (A szenzibilis hőáram és az impulzusáram méréséhez elég a szónikus anemométer.) Jelen esetben tehát nem tudjuk eldönteni, hogy az észlelt jeleket valóban meteorológiai jelenségek okozták-e: a látens

hőáram esetében egyértelműen közrejátszanak mérési hibák (csapadéktevékenység), míg a Reynolds-feszültség esetében fel lehet tételezni, hogy a műszer mérései jó eséllyel valós állapotokat tükröznek, bár a csapadékhullás befolyásolhatja a szónikus anemométer méréseit is). A szenzibilis hőáram esetén a hőmérséklet mérésében jelentkeznek problémák. Ha feltesszük, hogy a műszer nem hibás, akkor az időjárásban olyan változékonyságnak kell lennie, melyből következően a Reynolds-átlagoláson alapuló módszerek már nem alkalmazhatók a turbulens áramok számítására. Ha megvizsgáljuk a 10 Hz-es adatokat, az segíthet eldönteni, hogy mérési hibájáról van-e szó, vagy az időjárás változásából erednek-e a rossz minőségi értékek.

A 10. ábra leolvasható, hogy nem sokkal 15:30 UTC előtt történt a szél első megélénkülése. A szélirány már korábban elkezdett délkeletiről északkeletire fordulni. A szónikus hőmérséklet (jó közelítéssel megegyezik a virtuális hőmérséklettel) egy gyors visszaesés után lassuló ütemben 35 °C-ról 16 UTC-ig 30 °C-ra csökkent. Ennek okozója az első, közelben kipattant zivatarok egyikének kifutófrontja lehetett. Ezt követően a nyugat felől érkező, erősödő zivatarok hatására 17 UTC körül egy újabb átmeneti kisebb, majd egy erősebb, tartós hőmérséklet-csökkenés következett be. Újabb 4 °C-kal lett hűvösebb, amit további szélerősödés, és légnyomás emelkedés kísért. E zivatarok is éppen csak elkerülték az állomást, bár csapadékot már kapott belőlük a repülőtér. A gyenge intenzitású csapadékhullás alig fél óráig tartott, s mindössze 0,4 mm hullott (AAXX 02191 12982 41570 70305 10222 20186 30071 40168 52010 72992 8496/ 333 83926 82833 555 10080 55101 6994/=).



10. ábra A CSAT3 – EC150 rendszer által szolgáltatott 10 Hz-es adatok a zivatarok időszakában 2015. augusztus 2-án. A feliratok megegyeznek a 4. ábra szereplőkkel

E zivatarok elvonulása után szünet következett, a további cellák még jobban (kb. 5–10 km-rel) elkerülték a repülőteret és a hatásuk sem volt kimutatható. A „szünet” alatt mérsékelt maradt az északkeleti szél, és a hőmérséklet is újra emelkedni kezdett. 20:40 UTC körül a szél legyengült, ezzel együtt a hőmérséklet is gyorsan csökkenésnek indult. Délnyugat felől aztán egy kiterjedt zivatarrendszer érte el az állomást, s bár a zivatarok már gyengültek, a csapadékszóból még kora hajnalig kapott a mérőhelyünk csapadékot. A csapadéktevékenység kezdete 22:15 UTC-re tehető. Az érkező zivatarok kifutófrontja hatására ismét megélénkült a szél, mely ekkor már észak-nyugatra, majd délnyugatra (kora hajnalban tovább keletre) fordult. A légnyomás 21:30 UTC-től fél óra alatt mintegy 2 hPa-t emelkedett, a hőmérséklet pedig 20:50 UTC-től ismét csökkent 4 perc alatt 2 °C-kal.

A 10. ábra jobb felső részében láthatjuk a nyers abszolút nedvesség 10 Hz-es menetét. 17:30 és 18:00 UTC között, valamint 23 UTC után a mért nedvességértékek irreálisan nagy oszcillációkat mutatnak. Ez a két időszak jórészt egybeesik a csapadékot jelentő METAR észlelések időszakaival. A vízgőztartalmat mérő EC150 műszer egy infravörös fényimpulzus gyengülését méri, és a vízgőztartalmat ebből számítja. A kibocsátott és a detektorra érkező fényimpulzus intenzitásának aránya szintén szerepel adatsorunkban, valamint egy diagnosztikai változó is, amellyel a műszer maga is képes jelezni, hogy hibás mérési kimenetek adódtak az egyes rekordokban. Az irreális értékek megjelenése alatt a vett infravörös jelek erőssége erősen lecsökken (külön ábrát nem mutatunk be). Ez idézi elő az ún. diagnosztikai jelző-bitek változását. (A jelző-bit „igaz”-ra vált, vagyis problémát diagnosztizál a módszer.) Az infravörös jelerősség 0,9 körüli, nem „túlzottan” ingadozó viselkedése esetén tekinthető megfelelőnek a mérés, ekkor a jelzőbitek mind hamisak (tehát a diagnosztika értéke zérus). A csapadékhullás ideje alatt a jelgyengülést az esőcseppek vagy a műszer kibocsátó, illetve detektáló felületére rakódó vízréteg fénytörése okozza. A részletekről a CSAT3 és az EC150 műszerek gépkönyveiben olvashatunk [18]. Megállapíthatjuk (de ezt is vártuk), hogy a rossz minőségi értékek a nedvességgel kapcsolatos turbulens karakterisztikák esetén a csapadékos időszakokban mindenképpen a műszeres mérés hibájából erednek, így azokat az időjárási események rekonstruálására nem tudjuk felhasználni.

ÖSSZEFOGLALÁS

A 2015-ös szegedi PHR-mérési expedíció során alkalmazott gyors válaszidejű örvény-kovariációs műszerek adatainak feldolgozása során néhány esetben irreális értékek adódtak a turbulencia-karakterisztikákra. Azt vizsgáltuk, hogy az irreális értékeket mérési hiba (pl. csapadék) vagy valamilyen gyors lefolyású időjárási jelenség okozta-e. Két zivataros időjárási helyzeteket elemeztünk repülésmeteorológiai szempontból.

A 2015. augusztus 2-i esetben (csapadéktevékenységgel kísért zivatarrendszerek átvonulása az állomás felett) a nedvességgel kapcsolatos turbulens jellemzőknél – a várakozásoknak megfelelően – megmutatkozott, hogy az EC150 műszer esős időben nem képes megmérni a légköri víz- és gőztartalmat. A szónikus anemométerrel végzett impulzus és szenzibilis hőáram mérések viszont repülésmeteorológiai célokra használható információt szolgáltatottak. Nyomon követhettük a kifutófront érkezését.

A 2015. július 8-i esetben (zivataros időjárási helyzet, az állomáson kialakuló porviharral, a kezdeti szakaszban csapadéktevékenység nélkül) azonban – nagy valószínűséggel – a műszerek

kimenetén megjelenő értékek valós jelek. A megjelenő gyors változások miatt (instacionárius idősorok) azonban a turbulens áramok meghatározására alkalmazott Reynolds-módszer nem használható. E mérések igazolják, hogy egy, a repülésre veszélyes, hirtelen fellépő turbulencia leírásához gyakran nem elég még a perces felbontású mérés sem. (Az általunk bemutatott esetben pl. a hőmérséklet 4 °C-ot csökkent 45 másodperc alatt, lásd 6. ábra A CSAT3 – EC150 rendszer által szolgáltatott 10 Hz-es adatok a porvihar érkezésének három percében 2015. július 8-án: légnyomás (balra fent), szélsébség (balra lent), abszolút nedvesség (jobbra fent), szónikus hőmérséklet (jobbra lent).)

A bemutatott esetekhez hasonlóknakban, a repülőtéri meteorológusok és észlelők számára is gyakran nehéz feladatot jelent az ilyen mikroskálájú jelenségek felismerése, „pláne” kialakulási valószínűségük előrejelzése. A hivatalos észlelésekben csak a műszerek által jelzett változások kerülnek közvetítésre, a konkrét, veszélyes mikrometeorológiai jelenséget az érkező repülőgépek személyzete felé gyakran csak néhány perc késéssel tudják közölni. Ez adott esetben a repülőtérhez érkező gépek számára olyan veszélyhelyzetet teremthet, melyre a megfelelő információk hiányában nincsenek kellőképpen felkészülve.

A turbulenciát leíró elméletek többségéhez a Reynolds-átlagolásos módszert alkalmazzák, mely felteszi, hogy az átlagolási intervallumon belül a változók időbeli menetének zajtalanított (turbulenciamentes) része konstans. Ez nem mindig van így. Ilyenkor a turbulencia intenzitására, a turbulens áramokra irreális értékek adódnak, amelyeket ki kell zárni a további vizsgálatokból, holott a turbulencia mindig létezik, sőt, időben erősödhet is. Ezekben az esetekben (ha nem történt műszeres hiba) más elméleteket kell kidolgozni a turbulencia leírására.

Vizsgálataink felhívják a figyelmet a nagy időbeli felbontású (1–10 Hz-es) mérési adatok repülésmeteorológiai alkalmazásának fontosságára. Az átlagértékek mellett ismernünk kell a turbulens áramokat, illetve – ami könnyebben előállítható – a meteorológiai állapotjelzők (pl. hőmérséklet, szélsébség, szélirány) szórásait, akár 1 perces felbontásban is.

FELHASZNÁLT IRODALOM

- [1] Bottyán, Zsolt, Hámosi, István, Sárközi, Szilárd: A „mozgó sekély köd” jelenség első ismertetése, mint a repülést veszélyeztető elem – egy helikopter katasztrófa elemzése, 2000/29, pp. 238–248
- [2] Li, Guohua, Baker, Susan P.: Crash Risk in General Aviation, 2007/297(14), pp. 1596–1598
- [3] Bottyán, Zsolt: Kísérlet egy repülőgép-katasztrófa meteorológiai viszonyainak rekonstrukciójára – a Malév HA-MOH repülőgépének balesete, 2008/20(3), p. 1
- [4] Arya, S. Pal: Introduction to Micrometeorology, International Geophysics Series, vol. 79. 2 ed., Academic Press, Raleigh, NC, USA, 2001
- [5] Stull, Roland B.: An Introduction to Boundary Layer Meteorology. Springer Science and Business Media, Dordrecht, 2012
- [6] Weidinger, Tamás, Cuxart, Joan Rodamilans, Gyöngyösi, András Zénó, Wrenger, Burkhard, Istenes, Zoltán, Bottyán, Zsolt, Simo Diego, Gemma, Tátrai, Dávid, Jeričević, Amela, Matjačić, Blaženka, Kiss, Melinda, Józsa, János: An experimental and numerical study of the ABL structure in the Pannonian Plain (PABLS13). In 21st Symposium of Boundary Layers and Turbulence, Leeds, UK, 2014
- [7] Bottyán, Zsolt, Gyöngyösi, András Zénó, Wantuch, Ferenc, Tuba, Zoltán, Kurunczi, Rita, Kardos, Péter, Istenes, Zoltán, Weidinger, Tamás, Hadobács, Katalin, Szabó, Zoltán Attila, Balczó, Márton, Varga, Árpád, Bíróné Kircsi, Andrea, Horváth, Gyula: Measuring and modeling of hazardous weather phenomena to aviation using the Hungarian Unmanned Meteorological Aircraft System (HUMAS). Időjárás, 2015/119(3), pp. 307–335
- [8] Cuxart, Joan Rodamilans, Tátrai, Dávid, Weidinger, Tamás, Bíróné Kircsi, Andrea, Józsa, János, Kiss, Melinda: Infrasound as a Detector of Local and Remote Turbulence, 2016/159(2), pp. 185–192

- [9] International Civil Aviation Organization: Annex 3 to the Convention on International Civil Aviation. 16 ed., International Standards and Recommended Practices, ICAO, Montréal, 2007
- [10] Gyöngyösi, András Zénó, Kurunczi, Rita, Kardos, Péter, Bottyán, Zsolt, Weidinger, Tamás, Istenes, Zoltán, Szabó, Zoltán Attila: Unmanned aerial observation of the Planetary Boundary Layer for model evaluation and weather prediction purposes in support of UAV operation. In EGU General Assembly Conference Abstracts, vol. 15, 2013, pp. EGU2013–12429
- [11] Foken, Thomas, Wichura, Bodo: Tools for quality assessment of surface-based flux measurements. Agric. Forest Meteorol., 1996/78(1), pp. 83–105
- [12] Foken, Thomas, Göckede, Mathias, Mauder, Matthias, Mahrt, Larry, Amiro, Brian, Munger, William: Post-Field Data Quality Control. In Lee, Xuhui, Massman, William, Law, Beverly (eds.), Handbook of Micrometeorology, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, vol. 29, chap. 9, Springer Netherlands, 2004/ pp. 181–208
- [13] Foken, Thomas, Leuning, Raz, Oncley, Steven Philip, Mauder, Matthias, Aubinet, Marc: Corrections and Data Quality Control. In Aubinet, Marc, Vesala, Timo, Papale, Dario (eds.), Eddy Covariance, chap. 4, Springer Atmospheric Sciences, Springer Netherlands, 2012/pp. 85–131
- [14] Göckede, Mathias, Rebmann, Corinna, Foken, Thomas: A combination of quality assessment tools for eddy covariance measurements with footprint modelling for the characterisation of complex sites, 2004/127(3–4), pp. 175–188
- [15] Mauder, Matthias, Cuntz, Matthias, Drüe, Clemens, Graf, Alexander, Rebmann, Corinna, Schmid, Hans-Peter, Schmid, Marius, Steinbrecher, Rainer: A strategy for quality and uncertainty assessment of long-term eddy-covariance measurements. Agric. Forest Meteorol., 2013/169, pp. 122–135
- [16] Mauder, Matthias, Foken, Thomas: Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3 (update), Arbeitsergebnisse, vol. 62. Universität Bayreuth, Abteilung Mikrometeorologie, Bayreuth, 2015
- [17] Burba, George: Eddy Covariance Method. LI-COR Biosciences, Lincoln, 2013
- [18] Sargent, Steve: EC150, IRGASON, or EC155: Which CO₂ and H₂O Eddy-Covariance System Is Best for My Application? Campbell Sci. White Paper, 2013/2013
- [19] Aubinet, Marc, Vesala, Timo, Papale, Dario: Eddy Covariance. Springer Atmospheric Sciences, Springer, Dordrecht; Heidelberg; London; New York, 2012
- [20] Salavec, Péter: Örvény-kovariancia számítási módszerek összehasonlító vizsgálata a PABLS-2015 Szegedi Határréteg Mérési Program során. Msc diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 2016
- [21] Tordai, Ágoston Vilmos: Mikrometeorológiai mérőrendszer kialakítása és alkalmazása síkvidéki, magashegyi és barlangi körülmények között. Tdk dolgozat, ELTE Meteorológiai Tanszék, Budapest, 2016

**AVIATION-HAZARDING MICRO-SCALE PHENOMENA IN THE PLANETARY BOUNDARY LAYER
MEASUREMENT DATASETS OF SZEGED, 2015**

During the PABLS-2015, at the Airport of Szeged (ICAO: LHUD), Hungary, in the summer of 2015, micrometeorological measurements of the planetary boundary layer were made. Surface energy budget measurements were also carried out. Two high frequency sonic anemometers were used with 10 Hz frequency. The turbulent fluxes were calculated with TK3 and EddyPro (Li-Cor) software using eddy-covariance method with 5 and 30-minute averaging intervals. The quality assurance and control system was also applied. We are presenting two case studies, when some micrometeorological phenomena (e.g. gust fronts, dust storms) – which could be invisible using usual airport measurements – can cause sudden and potentially dangerous aviation situations. This study aims to illustrate the importance of using short response-time equipment together with traditional sensors, and the importance of calculating variances and turbulent fluxes beyond averages.

Keywords: PABLS-2015, Szeged, Micrometeorology, Aviation Safety

Salavec Péter (MSc) repülésmeteorológus Országos Meteorológiai Szolgálat Előrejelzési Főosztály Repülésmeteorológiai Osztály salavec.p@met.hu orcid.org/0000-0001-5126-192X	Salavec Péter (MSc) aviation meteorologist Hungarian Meteorological Service Department of Forecasting Unit of Aviation Meteorology salavec.p@met.hu orcid.org/0000-0001-5126-192X
Dr. Bordás Árpád, PhD középiskolai tanár Bolyai Tehetséggondozó Gimnázium, Zenta, Szerbia bordas.arpad@gmail.com orcid.org/0000-0001-5185-5189	Dr. Bordás Árpád, PhD secondary school lecturer Bolyai High School, Zenta, Serbia bordas.arpad@gmail.com orcid.org/0000-0001-5185-5189
Dr. Bozóki Zoltán, PhD egyetemi tanár MTA-SZTE Fotoakusztikus Kutatócsoport zbozoki@physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0003-3638-9524	Dr. Bozóki Zoltán, PhD Professor HAS-SZTE Photoacoustic Research Group zbozoki@physx.u-szeged.hu orcid.org/0000-0003-3638-9524
Dr. Joan Cuxart Rodamilans, PhD egyetemi tanár Universitat de les Illes Balears Departament de Física Equip de Turbulencia Atmosférica joan.cuxart@uib.cat orcid.org/0000-0002-6217-8045	Dr. Joan Cuxart Rodamilans, PhD Professor Universitat de les Illes Balears Departament de Física Equip de Turbulencia Atmosférica joan.cuxart@uib.cat orcid.org/0000-0002-6217-8045
Dr. Istenes Zoltán, PhD egyetemi docens Eötvös Loránd Tudományegyetem Informatikai Kar Programozásmélet és Szoftvertechnológiai Tanszék istenes@inf.elte.hu orcid.org/0000-0002-0169-4791	Dr. Istenes Zoltán, PhD Associate Professor Eötvös Loránd University Faculty of Informatics Department of Software Technology and Methodology istenes@inf.elte.hu orcid.org/0000-0002-0169-4791
Horváth Gyula szakmai elnökhelyettes Országos Meteorológiai Szolgálat horvath.gy@met.hu orcid.org/0000-0001-5431-1355	Horváth Gyula vice-president Hungarian Meteorological Service horvath.gy@met.hu orcid.org/0000-0001-5431-1355
Gemma Simó (MSc) PhD hallgató Universitat de les Illes Balears Departament de Física Equip de Turbulencia Atmosférica gemma.simo@uib.cat orcid.org/0000-0001-8219-0810	Gemma Simó (MSc) PhD Student Universitat de les Illes Balears Departament de Física Equip de Turbulencia Atmosférica gemma.simo@uib.cat orcid.org/0000-0001-8219-0810
Nagy Zoltán (MSc), osztályvezető Országos Meteorológiai Szolgálat Megfigyelési Főosztály Adatellenőrzési Osztály nagy.z@met.hu orcid.org/0000-0002-4600-5232	Nagy Zoltán (MSc), Head of Unit Hungarian Meteorological Service Observations Department Unit of Data Verification nagy.z@met.hu orcid.org/0000-0002-4600-5232
Tordai Ágoston Vilmos BSc hallgató Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék tordaiagoston@gmail.com orcid.org/0000-0002-8617-0531	Tordai Ágoston Vilmos BSc student Eötvös Loránd University Department of Meteorology tordaiagoston@gmail.com orcid.org/0000-0002-8617-0531

Dr. Torma Péter, PhD egyetemi adjunktus Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék torma.peter@epito.bme.hu orcid.org/0000-0001-9282-6931	Dr. Torma Péter, PhD Assistant Professor Budapest University of Technology and Economics Department of Hydraulic and Water Resources Engineering torma.peter@epito.bme.hu orcid.org/0000-0001-9282-6931
Dr. Weidinger Tamás, PhD egyetemi docens Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszék weidi@caesar.elte.hu orcid.org/0000-0001-7500-6579	Dr. Weidinger Tamás, PhD Associate Professor Eötvös Loránd University Department of Meteorology weidi@caesar.elte.hu orcid.org/0000-0001-7500-6579
Prof. Dr. Burkhard Wrenger, DSc oktatási rektorhelyettes, egyetemi tanár Hochschule Ostwestfalen-Lippe burkhard.wrenger@hs-owl.de orcid.org/0000-0003-0196-0698	Prof. Dr. Burkhard Wrenger, DSc Vice-Rector, Professor Hochschule Ostwestfalen-Lippe burkhard.wrenger@hs-owl.de orcid.org/0000-0003-0196-0698

A szerzők köszönetet mondanak az OMSZ munkatársainak, a Szegedi Magaslégköri Observatórium észlelőinek és PABLS-13 és PABLS-15 mérési programban résztvevő kutatók munkájáért. Külön köszönet illeti Sebők Istvánt (OMSZ) a mobil rádiószondás mérésekhez nyújtott segítségével, Gyöngyösi András Zénót (SZTE) a mérések előkészítésben való részvételért és Bottyán Zsoltot (NKE) a kutatási program elindításáért. A kutatás az OTKA NN-109679 és a GINOP-2.3.2-15-2016-00007, valamint a spanyol ATMOUNT-I program támogatásával valósult meg.

A GINOP 2.3.2-15-2016-00007 „A légitrafordulás-biztonsághoz kapcsolódó interdiszciplináris tudományos potenciál növelése és integrálása a nemzetközi kutatás-fejlesztési hálózatba a Nemzeti Közszolgálati Egyetemen – VOLARE” című projekt az Európai Unió támogatásával, az Európai Regionális Fejlesztési Alap társfinanszírozásával valósul meg.

A kutatás a fenti projekt „UAS ENVIRON” nevű kiemelt kutatási területén valósult meg.



http://www.repulestudomany.hu/folyoirat/2017_2/2017-2-26-0383_Salavec_Peter_et_al.pdf

