

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

**Örvény-kovariancia számítási módszerek  
összehasonlító vizsgálata a PABLS-2015  
Szegedi Határréteg Mérési Program során**

**MSc Diplomamunka**



**Készítette:**

SALAVEC PÉTER

*Meteorológus MSc*

*Időjárás előrejelző szakirány*

**Témavezető:**

DR. WEIDINGER TAMÁS

*ELTE-TTK Meteorológiai Tanszék*

Budapest, 2016

# Tartalomjegyzék

<b>1. Bevezetés</b>	<b>2</b>
1.1. A planetáris határréteg . . . . .	2
1.1.1. Definíció . . . . .	2
1.1.2. Főbb tulajdonságok . . . . .	3
1.2. Elméleti és empirikus vizsgálati módszerek . . . . .	5
1.2.1. A turbulencia elméleti leírása . . . . .	5
1.2.2. A határréteg állapotának mérése . . . . .	6
1.3. Mérési adatok . . . . .	9
1.4. Főbb célkitűzések . . . . .	10
<b>2. A 2015-ös Szegedi Planetáris Határréteg Mérési Expedíció</b>	<b>10</b>
2.1. A mérési elrendezés . . . . .	10
2.2. A szinkronizálás folyamata . . . . .	13
2.2.1. Kezdeti problémák . . . . .	14
<b>3. A nagyfrekvenciás adatok feldolgozása</b>	<b>17</b>
3.1. Technikai háttér . . . . .	17
3.1.1. TurbulenzKnecht-3.11 ( <i>Mauder and Foken, 2015</i> ) . . . . .	18
3.1.2. LI-COR <sup>TM</sup> EddyPro <sup>®</sup> 6.0 ( <i>LI-COR, 2015</i> ) . . . . .	20
3.1.3. Egyéb programok . . . . .	22
3.2. A feldolgozott adatok adatbázisa . . . . .	23
3.2.1. A nyers adatsorok összehasonlítása . . . . .	24
3.2.2. A korrigált fél órás adatok összehasonlítása . . . . .	52
3.2.3. Következtetések . . . . .	67
3.3. Turbulens áramok elemzése a PABLS-2015 Szegedi Határréteg Mérési Program során . . . . .	67
3.3.1. Bevezető . . . . .	67
3.3.2. A turbulens áramok számítása . . . . .	69
3.3.3. Repülésmeteorológiai alkalmazás . . . . .	71
<b>4. Összefoglalás</b>	<b>77</b>
4.1. További tervek . . . . .	78

# 1. Bevezetés

A földi légkör – a hőmérséklet és összetétel magasság szerinti változása alapján – rétegekre osztható. Legalsó rétege a *troposzféra*, melyben „az időjárás zajlik”, a *meteorológia* tudományának fő kutatási területe. A troposzféra két további rétegből áll: felső alrétege a *szabad légkör*, alsó alrétege a *planetáris határréteg*, amelyen keresztül a Föld felszíne és a légkör közötti kölcsönhatások lejátszódnak. Ez az emberi tevékenység színtere, itt van a szárazföldi bioszféra döntő része. A bioszféra, mint rendszer, elemei közé tartoznak természetesen az élőlények, a földfelszín (terep-tárgyakkal, domborzatával, felszíntípusaival), a talajréteg és a légkör is, hiszen ezek az elemek egymással kölcsönhatásban állnak.

Ezért is fontos minél jobban megérteni a planetáris határréteg (PHR) jelenségeit, hiszen azok minél pontosabb előrejelezhetősége hozzájárul az időjárás negatív hatásainak a csökkentéséhez, kivédéséhez is. Az emberre közvetlenül ható időjárási jelenségek között a szinoptikus skálájú mozgásrendszerek (ciklonok, anticiklonok) és a mezoskálájú jelenségek (frontok, zivatarok, zivatarrendszerek, stb.) mellett nagy számban fordulnak elő a planetáris határréteg időjárási jelenségei is. Ezek nem csak közvetlenül a határrétegben alakulhatnak ki (pl. légszennyezés, köd, por- és hóviharok, turbulencia, szellőkések, stb.), hanem az előbbiekhöz tartozóak kísérőjelenségeiként is előfordulhatnak (pl. zivataros kifutószél vagy légzuhatag, ónos eső, lejtővihar).

A folyadékáramlások során kialakuló határréteg tulajdonságai már régóta kutatott témakör (*Prandtl* 1904-ben ismerte fel a súrlódás szerepét), az 1960-as, 1970-es évekre külön tudományággá nőtte ki magát a határréteg-meteorológia, mely – mivel a határréteg jelenségei többnyire a mikroskálához tartoznak – a mikrometeorológia része (és mivel a mikrometeorológia más területei jóval kisebb szerepet játszanak a mai meteorológia fejlődésében, gyakran szinonimaként használják a két kifejezést, ld. pl. *Arya*, 2001). Egzakt elmélet még nem született, az elméleti leírások jelentős része bizonyos szempontból intuitív jellegű, és sok empirikusan meghatározott tulajdonságuk van. Részben ennek is köszönhető, hogy a határréteg-meteorológiai kutatások napjainkban is igen fontosak és népszerűek.

## 1.1. A planetáris határréteg

### 1.1.1. Definíció

Nehéz megadni a PHR definícióját pontosan megadni, elsőként érdemes kvalitatív módon megközelíteni. Kiindulásként azt mondhatjuk, hogy a PHR a légkör azon rétege, melyben a Föld felszíne, mint kényszerfelület, hatásai kimutathatók.

Ez önmagában nem teljesen egyértelmű, legtöbbször azt értjük ez alatt, hogy a határrétegben a levegő tulajdonságai-változásai a földfelszín napi menettel rendelkező tulajdonság-változásaira történő reakcióként jelennek meg. Ez egyébként nem csak a földi légkörben, hanem általában a bolygólégkörökben alkalmazható (innen származik a „planetáris” jelző). Általánosan elfogadott meghatározás szerint a földi (vagy légköri) határréteg az a réteg, melyben a levegő a felszínre érkező napsugárzás és csapadék által előidézett tulajdonságváltozásaira óras időskálán belül reagál (pl. *Stull*, 1988; *Oke*, 2002). Az áramlási tulajdonságok (turbulencia) alakításában fontos tényező a levegő belső sűrűlódása (pl. *Arya*, 2001). A nappali konvektív határréteget gyakran a termikék tetejével, vagy a rajtuk ülő gomolyfelhők alapjával (ha vannak ilyenek) definiálják (*Harrison*, 1999; *Blackadar*, 1997).

Az e megfogalmazásokon alapuló kvantitatív definíciók azonban függenek a határréteg típusától. A laboratóriumi folyadékdinamikai kísérletekben gyakran egyértelműen megadható egy felület felett áramló folyadékban a határréteg. A PHR-ben az áramlási kép szerkezete gyakran ugyanolyan, mint a laboratóriumi kísérletekben, csak a jelenségek méret- és időskálája más. Ez az egyik alapja a hasonlósági elméletnek. *Kundu et al.* (2011) könyvében számos meteorológiai példát találunk a folyadékdinamikai turbulencia jelenségeire (Ekman-spirál, hatványkitevős profilok, stb). Vannak azonban olyan helyzetek, amikor nem tudjuk egyértelműen megadni a PHR és a szabad légkör határát. A valóságban ez nem egy merev felület, hanem egy réteg, melyben a légkör tulajdonságai a PHR-re jellemzőről folyamatosan változnak a fölötte lévő szabad légkörre jellemzőre.

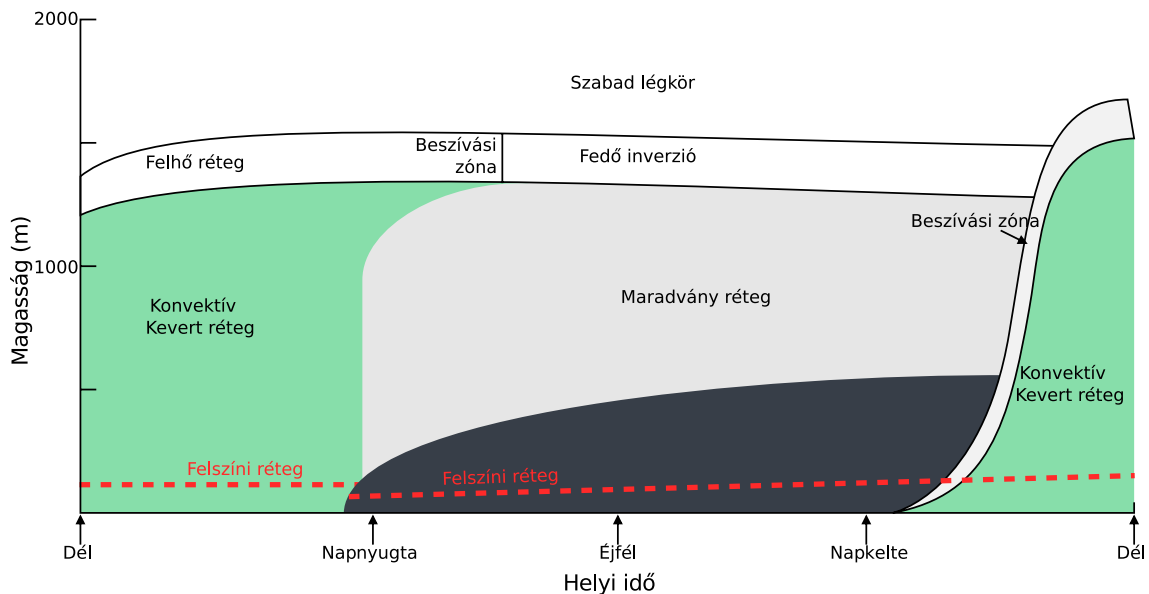
A felszíni rövid- és hosszúhullámú sugárzásháztartás napi menetével összhangban a felszínhőmérséklet is jellegzetes napi menetet mutat, s így a vele kölcsönhatásban lévő PHR is. A határréteg fölött (a szabad légkörben) a napi menetek eltűnnek, és a nyomási mező által meghatározott geosztrófikus szélmezőt tapasztalhatjuk. Itt a szélfordulást a horizontális hőmérsékleti mező alakítja (termikus szél). A határrétegben a szélmező a sűrűlódás hatására megváltozik. A vízgőz és a szennyezőanyagok jelentős része a földfelszíni eredet következtében szintén a határrétegben dúsul.

A határréteg-jelenségek – ahogy már említettük – az életünk részei, ezért is fontos megértésük és előrejelzésük, a veszélyes időjárási jelenségek által okozott károk csökkentése, megelőzése érdekében. Ez adja a mikrometeorológiai témájú elméleti és kísérleti kutatások, PHR-mérési programok létjogosultságát.

### 1.1.2. Főbb tulajdonságok

**Alrétegek** A planetáris határréteg egyik legfontosabb ismérve, hogy itt zajlanak a légkör és a földfelszín közötti kölcsönhatások. Általában *nappali* (*konvektív*, vagy *instabil*) és *éjszakai* (vagy *stabil*) típusát különíthetjük el. A zárójeles elnevezések

a hőmérsékleti rétegződésre utalnak, és mivel a stabil, illetve instabil hőmérsékleti rétegződés egyaránt bármelyik napszakban kialakulhat, szerencsésebb ezeket az elnevezéseket használni. Ugyanakkor zavartalan (felhőmentes, gyenge légmozgású) időjárásban a szokásos napi menet szerint éjszaka stabil, míg nappal instabil rétegződésre számíthatunk, mivel nappal a Nap sugárzása a Föld felszínét melegíti, éjszaka pedig a felszín saját hőmérsékleti sugárzása miatt hűl. A két fő típus alrétegeit az 1.1. ábra szemlélteti.

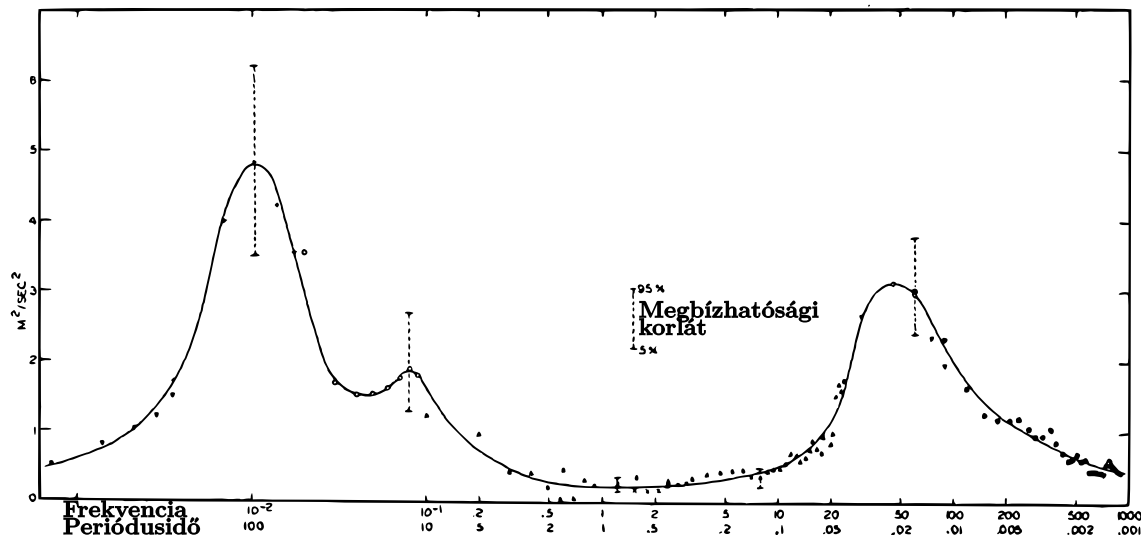


1.1. ábra: A planetáris határreteg éjszakai és nappali szerkezete, alrétegei, és napi menete. (Wikimedia Commons, Stull, 1988, alapján)

**Turbulencia és energiaáramok** A felszínnel történő kölcsönhatás eredményeképpen megjelennek a vertikális tulajdonságáramok (impulzus, anyag, energia). A belső súrlódás hatására az impulzusszállítás mindig a földfelszín felé irányul. A nap-sugárzás hatására melegedő felszín felett konvektív potenciális energia halmozódik fel, mely a konvekció által alakul kinetikus energiává. A hőmérsékleti rétegződés miatt a vertikális áramlások szenzibilis, és a vízgőz jelenléte miatt latens hőt is szállítanak. Ezen kívül a talaj közvetlenül is elnyel energiát, hőmérsékleti sugárzása révén pedig kibocsát. Ez a talajba vezetődő hőáram szintén az energiamérleg része.

A levegő belső súrlódása miatt azonban nem csak a felszín közelében áramlik az energia. A turbulens örvények közül a legnagyobbak a konvektív áramlások által keletkeznek, a belső súrlódás ezeket az örvényeket kisebbekre bontja szét (*dinamikai viszkozitás*), a legkisebb örvények pedig az energiát hővé disszipálják (*molekuláris viszkozitás*), tehát a kinetikus energia árama mellett egy energiaátalakulási folyamat is jelen van. Ez az energiakaszkád.

Ezek az energiaátalakulási és -áramlási folyamatok nagyban befolyásolják az időjárás előrejelezhetőségét, ugyanis – ahogy azt az 1.2. ábra bizonyítja – a mikro-meteorológiai folyamatokban szállítódó energia a teljes légköri energiaspektrum egy jelentősebb részét képviseli.



1.2. ábra: A szélesség energiaspektruma a Brookhaven National Laboratory 91 és 125 m magas mérőoszlopaiban 1955–1956-ban elvégzett Aerovane szélesség mérési kampány által gyűjtött adatokból. A spektrum a kinetikus energiasűrűség nagyságát (függőleges tengely,  $[\frac{m^2}{s^2}]$ ) mutatja a frekvencia (vízszintes tengely, felső skála  $[\frac{1}{h}]$ ), illetve a karakterisztikus élettartam (alsó skála  $[h]$ ) függvényében. A hibasávok az 5 és 95 %-os percentilisek közötti tartományt jelölik. (van der Hoven, 1957, „Fig. 1.”)

## 1.2. Elméleti és empirikus vizsgálati módszerek

### 1.2.1. A turbulencia elméleti leírása

**Reynolds-átlagolt egyenletek** A PHR tulajdonságait leíró Reynolds-átlagolt Navier-Stokes egyenletekben megjelenő turbulens karakterisztikákat jellemző tagok (másodrendű momentumok, kovarianciák illetve szórásnégyzetek) a légkör mikroskálájú jelenségeinek matematikai megnyilvánulásai (Kolmogorov, 1941; Rotta, 1951). Ezek leírása érdekében a kovarianciákra felírhatók prognosztikus egyenletek, bennük azonban eggyel magasabb rendű momentumokat tartalmazó tagok jelennek meg, így az egyenletrendszer sosem lesz lezárt.

**Lezárási elméletek** A rendszer lezárása érdekében az ismeretlen új momentumokat a már ismert mennyiségek segítségével parametrizálni kell. Ezek a lezárási elméletek széleskörűen állnak rendelkezésre az irodalomban (ld. Hanjalić, 1994; Cohen et al., 2015). Gyakran ezek azonban intuitív jellegűek, a kutatók a kiindulási feltételeket tág határok között szabadon megválaszthatják, emellett a mérések

pontatlanságából eredő bizonytalanságok az elméletekben megjelenő paramétereket is bizonytalanná tehetik. Ezért különösen fontos ezen elméletek minél alaposabb ellenőrzése, pontosítása, annak meghatározása, hogy adott légköri állapot esetén a légkör (illetve a határréteg) mely részében, milyen alapfeltevések mellett érvényes az elmélet.

**Nem-lineáris elméletek** A Reynolds-átlagolásos módszer jól választott lezárással együtt – bizonyos hibahatáron belül – a turbulencia pontos leírását szolgáltatja. Ehhez azonban meg kell adni az átlagoláshoz szükséges idő-hosszt, amelyen belül teljesülnie kell a Reynolds-feltételeknek (*Reynolds*, 1895; *Stull*, 1988), ami maga után vonja a Taylor-hipotézis (*Taylor*, 1938) teljesülését, legalábbis az átlagolási időre. Ha ez sérül, akkor az átlagolási időszakon belül az elemek idősora nem stacionárius, ami miatt az átlagok, és minden más turbulens karakterisztika becslése, szisztematikus hibákkal terhelt – a kiszámolt értékek nem a valós légköri állapotot reprezentálják (*Kampé de Fériet*, 1949). Ezeket a rossz minőségű adatokat a további vizsgálatokból ki kell zárni. Ugyanakkor a turbulencia minden időpillanatban létezik, sőt, minden időpillanatban más és más a mértéke. Ennek leírására nem-lineáris statisztikai módszerek szükségesek.

A határréteg tulajdonságait, szerkezetét leíró parametrizációk sokáig csak a stacionaritás feltételezése mellett adtak jó eredményeket, ma már rendelkezésre állnak a határréteg-szerkezet időfejlődését is jól reprezentáló elméletek. A turbulencia leírására ugyanakkor ma még stacionárius módszereket alkalmaznak. A nem-stacionárius esetekben még nem ismert kellő pontossággal a turbulens áramok meghatározásának módszertana. Ezért is van létjogosultsága az intenzív mérési programoknak, új, nagyfelbontású mérőeszközök alkalmazásának (pl. *Večenaj and De Wekker*, 2015), ami hozzájárul az elmélet fejlesztéséhez is (pl. *King et al.*, 2016).

### 1.2.2. A határréteg állapotának mérése

**Mérési kampányok** A mikrometeorológia mérőtudomány, a turbulens kicserélődési folyamatok vizsgálatához nagy pontosságú gyors válaszidejű műszerekre van szükség. A különböző elemeket mérő műszereket egy helyre helyezve mérőplatformokat alakítanak ki. Ezek fenntartása azonban igen költséges, és az amortizációjuk is jóval gyorsabb a „szokásos” meteorológiai műszerekéhez képest. Tartós, operatív használatuk ma még nem szokásos, így mérési kampányok szervezése is szükséges. A koncentrált, nemzetközi mérési programok a XX. század közepe után váltak elterjedté. A legtöbb kampány a maga idejében jelentősnek számító eredményeket hozott a mikrometeorológia fejlődése szempontjából, itt csak néhány, a jelen dolgozat szempontjából fontos mérföldkövet említek.

Az első átfogó expedíciós mérés a nebraskai O'Neill közelében végzett *Great Plains* (Lettau and Davidson, 1957) kísérlet volt 1953-ban. Később egyre több változó mérése kapott helyet az egyes kampányokon, így szükségessé vált az adattárolási és -kezelési módszerek tisztázása (Bradley and Denmead, 1967). 1967-ben zajlott az Ausztráliai Hay közelében a *Wangara* kísérlet (Clarke et al., 1971; Hess et al., 1981), valamint 1968-ban Kansasben az *AFCRL*<sup>1</sup> mérési kampány (Izumi, 1971). Ezek voltak az első olyan mérési kampányok, melyek adatai egységes, szinkronizált adatbázis formájában elérhetők. Így sok tudományos eredmény született ezek felhasználásával, melyek között néhány mérőföldkő volt a mikrometeorológia történetében, mint például a Monin – Obukov és a Rotta – Kolmogorov elméletek igazolása, a turbulencia pontosabb leírása (pl. Obuhov, 1962; Kaimal et al., 1972), az energiamérleg meghatározása, stb. A Monin – Obukhov elmélet jól leírta a neutrális határreteg szerkezetét (Monin and Obukhov, 1954). Az ezt megalapozó Buckingham-elmélet segítségével aztán általánosítani lehetett a különböző típusú határretegekre (Buckingham, 1914). A következő időszakban zajlott mérési programok e parametrisációk pontosítását szolgálták (pl. VOVES, André and Lacarrère, 1980; Minnesota, Izumi and Caughey, 1976). Ahogy a mérések egyre pontosabbak lettek, úgy egyre inkább kiderült, hogy a Monin – Obukhov elmélet nem pontos (pl. LINEX-Lindenberg, Beyrich and Engelbart, 2008; EBEX-2000, Oncley et al., 2007). A korábbi elméletek alapfeltételezése szerint az energiamérleg minden időpillanatban zárt, az ettől való eltéréseket a műszerek pontatlanságából adódónak tekintették. Az EBEX-2000 program során derült ki, hogy a különböző magasságba kihelyezett műszerek közötti rétegben az advekciónak jelentős energiát elszállít a rendszerből. A határreteg vertikális szerkezetének meghatározásához tehát nem elég egy dimenzióban vizsgálni. Ez fel lendítette a 3D-s modellek fejlődését. A technika fejlődéséből adódó számítási kapacitás-növekedés következtében a mérnöki áramlástanban alkalmazott modellek után már a meteorológiai alkalmazású határreteg-modellek is alkalmassá váltak a nagyobb turbulens örvények dinamikai szimulálására. Ezek a modellek a Large-Eddy („nagy örvény”) szimulációk (pl. Moeng, 1984). Egy másik fejlődési irány a határreteg szerkezetváltozásait leíró időfüggő elméletek fejlődése. Az ilyen elméletekben a stacionaritás feltétele gyakran sérül, melyet kvázi-stacionárius (Brost and Wyngaard, 1978) feltételezéssel, vagy a Reynolds-módszer helyett nem-lineáris statisztika alkalmazásával lehet kezelni. E téren napjainkban intenzíven folynak kiutatók, például a dolgozat témáját képező PABLS-2015 program során zajlott mérések egy része is e célt szolgálja (pl. Cuxart et al., 2016).

---

<sup>1</sup>Air Force Cambridge Research Laboratories



**Adatkezelési követelmények** Egy mikrometeorológiai mérési kampány során nagy mennyiségű adat keletkezik, mivel a jelenségek karakterisztikus élettartamai nagy frekvenciájú (10 Hz nagyságrendű) mintavételezést kívánnak. Az adatok kezelhetőségének biztosítása érdekében, illetve a további feldolgozásához, egységes adatbázis létrehozása szükséges. Ennek fontos feltétele, hogy ismertek legyenek a mérési körülmények, a potenciális hibaforrások az adathalmazban. Ezek felderítése után szerencsés esetben korrigálhatók a keletkezett hibák, így egységesíthetők az adatsorok. Ez például azt jelenti, hogy az adatsorok nem tartalmazzak a rendelkezésre álló hivatalos észlelésekkel (pl. SYNOP, METAR, stb. adatok közeli állomásokról) ellentmondó információkat.

Az egységesítés után a nyers adatokból számítható korrekciók nélküli átlagok összevethetők a hivatalos mérésekkel (pl. METAR, SYNOP), vagy referencia adatsorokkal, ha vannak ilyenek. Ha több adatsor keletkezett a mérések során, akkor ezek mérésekhez történő igazítása segít szűkíteni a műszerek szinkronizálásából származó hibákat. Ha valamely adatsor pontosan ráilleszthető a referencia mérésekre, akkor a többi adatsort illesztését is ehhez kell elvégezni, így egységes, szinkronizált adatsorokat kapunk.

A gyakorlatban mindenképpen érdemes kitüntetni az elsőre legjobbnak vélt adatsort, s ahhoz illeszteni a többit, majd a végén az egységes adatsort együttesen ráilleszteni a referencia, majd a hivatalos mérésekre. Az adatbázis így egységes lesz, a szinkronizáció azonban csak valamilyen bizonytalanság mellett garantálható (egymástól viszonylag távol elhelyezett műszerek, vagy különböző pontatlanságú műszerórák esetén a teljes szinkronizáció akár lehetetlenné is válhat, csak közelítőleg, vagy szakaszonként végezhető el).

Ha az adatokat e szempontok figyelmen kívül hagyásával dolgozzuk fel, egyes időpontokban ugyan jó eredmények adódhatnak az aktuális állapotokról, ám a turbulens folyamatokról, az időbeli viselkedésről torz képet kaphatunk (*Foken and Nappo*, 2008; *Aubinet et al.*, 2012).

**Minőségellenőrzés** Az egységes szinkronizált adatbázis ezután felhasználható minőség-ellenőrzésre. Cél a horizontális homogenitás és stacionaritás (Reynolds), ergodicitás (Taylor), folytonosság és hibamentesség bizonyítása, mely igazolja a kiszámolt turbulens statisztikák alkalmasságát a határréteg tulajdonságainak leírására. A minőség számszerűsítésére több módszer létezik, melyek meghatározott rendszer szerint minőségi jelzőket (pl. számértékeket, jelzőbiteket, stb.) rendelnek a kapott értékek mellé. Ezek alapján az adatokat kategóriákba lehet sorolni aszerint, hogy az adat rossz minőségű, tájékoztató jellegű, operatív használatban alkalmazható, vagy tudományos kutatási célra használható. Ennek módszerét *Foken and Wichura*

(1996) dolgozta ki, részletei *Foken et al.* (2004) és *Aubinet et al.* (2012) műveiben található meg.

**Adathasználat** A minőség-ellenőrzött adatokat a további felhasználás célja szerint válogathatjuk. Csak a legjobb minőségű adatokat használhatjuk fel a határréteg tulajdonságait leíró elméletek tesztelésére (*Foken and Wichura, 1996*). Napjainkban az expedíció jelleggel zajló mérések célja általában ilyen minőségű adatok gyűjtése minél nagyobb mennyiségben. Ehhez nem elég a jó műszerezettség, a jól tervezett platformok és a jól kivitelezett méréssorozat, mivel a minőséget önmagában bizonyos időjárási jelenségek is ronthatják. Emiatt pedig előfordulhat, hogy egy hosszú mérési kampány alatt is csak kevés olyan jó minőségű adat gyűlik össze, amely az elméletek előre meghatározott pontossággal történő igazolására alkalmas.

Manapság már folynak operatív jellegű mikrometeorológiai mérések, jellemzően a levegőszennyezettség meghatározása érdekében (Magyarországon például Hegyhátsálon vagy Kecskemét–K-pusztán). Ezek esetében a kevésbé jó minőségű adatok is felhasználhatók, melyek ahhoz még mindig eléggé megbízhatóak, hogy a térség légállapotáról átfogó képet kapjunk, hogy szükség esetén az érintett lakosságot tájékoztatni tudjuk például egészségre veszélyes helyzetek (szmog, magas pollenkoncentráció, stb.) kialakulásáról.

### 1.3. Mérési adatok

2015 nyarán, június végétől szeptember elejéig zajlott a *Pannon Atmospheric Boundary Layer Survey (PABLS) 2015* Szegedi Planetáris Határréteg Mérési Expedíció a Szegedi Repülőtéren. Az expedíció során a határréteg tulajdonságainak meghatározására alkalmas különböző módszerekkel történtek mérések (felszíni energia-háztartás mérések, PHR profilok, távérzékelési eszközök, UAV<sup>2</sup>-k, kötött ballon, rádiószonda, stb). E mérések célja a határréteg tulajdonságainak vizsgálata, az átmeneti rétegződések (napkelte, napnyugta) elemzése. Hosszabb távú célkitűzéseink között szerepel:

- az ECMWF modellekben alkalmazott felszíni és PHR-parametrizációk tesztelésére szolgáló adatbázis építése
- a napkelte és napnyugta körüli időszakban történő mérések végzése az átmeneti folyamatok leírásához
- örvénykovariancia adatsorok létrehozása az energiamérleg meghatározásához

A mérési elrendezést a dolgozat második fejezetében ismertetem *Tordai (2015)* dolgozatára támaszkodva.

---

<sup>2</sup>Unmanned Aerial Vehicle – pilóta nélküli repülőgép

## 1.4. Főbb célkitűzések

Munkám során elsődleges célom a 10 Hz-es örvény-kovariancia adatok és a belőlük számolt 1, 5 és 30 perces statisztikák egymással és az észlelésekkel szinkronizált, egy-egy, korrigált adatbázisainak létrehozása volt. Dolgozatomhoz kapcsolódó feladatok nagyobb részét az ehhez szükséges számítások elvégzése, a menet közben feltárt hibák kijavítása képezte, mely nagyrészt technikai jellegű munkát igényelt. Kutatásom során fény derült néhány komolyabb adatrögzítési hibára is, melyek kijavítása körülményes, és egyes esetekben csak részben sikeres volt. A javítások elvégzése után kezdődhetett meg az adatok feldolgozása. Eredményeink közül a turbulens áramok meghatározását, valamint egy, a repülésmeteorológia számára fontos esettanulmányt ismertetünk.

## 2. A 2015-ös Szegedi Planetáris Határréteg Mérési Expedíció

2015 nyarán került megrendezésre a Szegedi Repülőtéren a PABLS-2015 (Pannon Atmospheric Boundary Layer Survey) mérési expedíció, több magyarországi és külföldi egyetem kutatói részvételével. Az expedíció célja több, egymástól független mérési módszer alkalmazása a határréteg-szerkezet és az energia-háztartás vizsgálatára. A vizsgálatokhoz szükséges mérési feladatok elvégzése, az adatok gyűjtése június végétől szeptember közepéig tartott. Az összegyűjtött adatok adatbázisba rendszerezése után elvégezhető a határréteg tulajdonságait leíró elméletek ellenőrzése, az energiamérleg lezárhatóságának vizsgálata. A következő szakaszban a mérési elrendezés, és az adatbázis elkészítésének folyamata kerül bemutatásra.

### 2.1. A mérési elrendezés

A folyamatos pontszerű mérések a Szegedi Repülőtér délnyugati részén kialakított platformokon zajlottak. A sugárzásmérő oszlopon helyeztük el a CNR1 rövid- és hosszuhullámú sugárzási mérleg komponenseket mérő Kipp&Zonen gyártmányú műszert, a Schenck globálsugárzás-mérőt, a direkt és a visszavert PAR<sup>3</sup> sugárzás-mérőt, a Campbell–Q7-es sugárzásegyenleg szenzort, valamint egy Campbell által forgalmazott, termoelemes elven működő infra hőmérőt. Mértük a talaj energia-háztartását (talajhőmérő négy szinten, talajnedvesség-mérő három szinten, valamint két önkalibráló hőárammérő 8 cm mélyen, valamennyi a Campbell cég által gyártott műszer). Két szinten végeztünk szélesség és szélirány mérést 2D szónikus

---

<sup>3</sup>Photosynthetically Active Radiation – fotoszintetikusán aktív sugárzás

anemométerrel, továbbá hőmérséklet és nedvességmérést Väisälä szenzorokkal egy 2 m-es oszlopon (Tordai, 2016). A lassú szenzorok jelét 1 perces átlagolási idővel rögzítettük részben egy CR23x, részben egy CR3000 adatgyűjtőn. Két nagyfrekvenciás (10 Hz-es) 3D-s szónikus anemométer is kihelyezésre került, egymástól nyugat-keleti irányban kb. 15 m-re. Az egyik egy BME által üzemeltetett CSAT3 típusú műszer, mely adatait CR3000 típusú adatgyűjtő rögzítette. E műszerhez kapcsolódott egy EC-150 CO<sub>2</sub>/H<sub>2</sub>O szenzor, ami szintén 10 Hz-es felbontással szolgáltatotta az adatokat. Más, például kötött ballonos, kvadrokopteres mérések is történtek a repülőtér főépületének közelében, elsősorban a derült éjszakákon, melyek célja a stabil határreteg tulajdonságai, különösképpen a nappal-éjszaka közötti átmenet vizsgálata volt. Ezen kívül távérzékelési módszerekkel is történtek mérések az OMSZ-állomáson, ahol SODAR, Radiometer és Windprofiler szolgáltatott adatokat az alsó néhány száz méteres rétegből. A részletes leírás Tordai (2015, 2016) dolgozataiban található.

A mérési kampányban részt vevő intézmények és a telepített műszerek listája alább kerül felsorolásra:

- **Bolyai János Tehetséggondozó Gimnázium és Kollégium, Zenta:**  
*Kvadrokopteres mérések*  
Légnyomás, hőmérséklet és nedvesség profilok az alsó 100 m-ben a repülőtér központi területén.
- **Budapesti Műszaki Egyetem, Általános és Felsőgeodéziai Tanszék:**  
*GNSS Állomás*  
Kihullható vízről szolgáltat adatokat az OMSZ-állomáson.
- **Budapesti Műszaki Egyetem, Vízépítési és Vízgazdálkodási Tanszék:**  
*Campbell 2D szónikus anemométer*  
Két darab, 0,6 és 2 m magasan; vízszintes szélesség-komponensek.  
*Örvénykovariancia mérő állomás*  
Az alábbi műszerek egy oszlopon, 1,5 m magasan lettek elhelyezve, és tizedmásodpercenként szolgáltatották az adatokat:  
*Campbell CSAT3 szónikus anemométer*  
Három szélkomponens és szónikus hőmérséklet.  
*Campbell EC150 gáz analízátor*  
CO<sub>2</sub>- és vízgőz-koncentráció, környezeti („állomásszinti”) légnyomás és hőmérséklet.
- **Debreceni Egyetem, Meteorológiai Tanszék:**  
*METEK-PCS.2000-64 Doppler SODAR*  
Az alsó 300–500 m szélesség és turbulenciaintenzitás adatai 2015. július 24-ig az OMSZ-állomáson.

- **Eötvös Loránd Tudományegyetem, Biológiai Fizikai Tanszék, Környezetoptikai Laboratórium:**
  - Polarimetrikus felhőborítottság-mérő*
  - Az OMSZ-állomáson.
- **Eötvös Loránd Tudományegyetem, Komplex Rendszerek Fizikája Tanszék**
- **Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék:**
  - METEK-USA1 szónikus anemométer*
  - Három szélkomponens és szónikus hőmérséklet tizedmásodpercenként, 263 cm magasan a BME oszlopán.
  - Sugárzásmérő oszlop*
  - Minden alább felsorolt műszer egy oszlopon, 180 cm magasan volt elhelyezve, és perces átlagolt adatokat szolgáltatottak:
  - Kipp&Zonen CM1 és Campbell Q7 piranométerek*
  - Sugárzásegyenleg.
  - Kipp&Zonen PAR Lite*
  - Direkt és visszavert fotoszintetikusan aktív sugárzás.
  - Schenck radiométer*
  - Teljes felfelé és lefelé tartó sugárzás.
  - Campbell IRTS-P infra hőmérő*
  - Felszínhőmérséklet.
- **Hochschule Ostwestfalen-Lippe:**
  - MEMSIC eKo eS2000 teljes mikrometeorológiai mérőállomás*
  - Csapadék, hőmérséklet, légnedvesség, légnyomás, sugárzási komponensek perces átlagai.
  - Kvadrokopteres mérések*
  - Alsó 200 m-ben infravörös sugárzás (hőmérséklet, nedvesség) és magasság mérések az intenzív mérési periódusok alatt.
- **Magyar Tudományos Akadémia – Szegedi Tudományegyetem, Fotoakusztikus Kutatócsoport**
- **Országos Meteorológiai Szolgálat, Szegedi Magaslégköri Observatórium:**
  - Väisälä és GRAW rádiószonda*
  - Napi két felszállás, 0 és 12 UTC-kor.
  - Radiometrics MP-3000A radiométer*
  - Hőmérséklet és nedvesség profilok tíz percenként.

Väisälä LAP-3000 windprofiler és RASS – SODAR

Szél- és virtuális hőmérsékleti profilok, turbulenciaintenzitás a mérési kampány második felében.

GRAW DFM-09 típusú rádiószonda

Hőmérséklet, relatív nedvesség, légnyomás, geopotenciál és (GPS alapján) szélesség és szélirány másodpercenként.

– **Universitat de les Illes Balears, Equip de Turbulencia Atmosférica:**

*Saját tervezésű szonda, kötött ballon*

Hőmérséklet, légnedvesség, szélesség (hődrótos szenzor) a reptér központi részén az IOP<sup>4</sup>-ok alatt.

*Campbell 107 talajhőmérők*

Talajhőmérséklet csupasz talaj, elszáradt és zöld fű alatt 1 cm mélyen, saját árnyékolóval 5 és 10 cm magasan és OMSZ-os aspirációs árnyékolóval 20, 30, 50 és 100 cm magasan.

Vizsgálataim során a két 3D-s szónikus anemométer adatait dolgoztam fel. A METEK-USA1 műszer csak a három szélkomponenst és szónikus hőmérsékletet<sup>5</sup> mért, míg a BME által üzemeltetett CSAT3 – EC-150 műszeregyüttes az előbbieket mellett mérte a nyomást, a referencia-hőmérsékletet, továbbá a CO<sub>2</sub> és a H<sub>2</sub>O koncentrációt.

A METEK szenzor 263 cm, míg a CSAT3 150 cm magasan mért. Előbbi koordináta-rendszerében az  $u$  sebesség észak felé, a  $v$  kelet felé pozitív, vagyis balsodrású koordináta-rendszerű. A CSAT3 koordináta-rendszere az elméleti meteorológiában szokásosnak megfelelő:  $u$  kelet felé,  $v$  észak felé pozitív. Az adatokat 10 Hz frekvenciával gyűjtötték, a CSAT3 egy CR3000 adatrögzítőre, míg a METEK egy laptopra a rá telepített program segítségével. A rögzített adatok a CSAT3 esetében manuálisan kerültek kimentésre, míg a METEK esetében a gyűjtő szoftver a laptop rendszerideje szerint óránként mentett.

## 2.2. A szinkronizálás folyamata

Egyik feladatomban a két szónikus anemométer nyers adataiból az átlagos mennyiségek és a turbulens áramok kiszámítása, valamint ezen adatok egységesítése, szinkronizálása volt az egy perces adatokkal és az észlelésekkel. E számítások elvégzésére több módszert is alkalmaztunk. A Bayreuth-i egyetemen dolgozó szakemberek által fejlesztett és tesztelt TurbulenzKnecht-3.11 (*Mauder and Foken, 2015*), a LI-COR

<sup>4</sup>Intensive Observing Period – Intenzív Észlelési Időszak

<sup>5</sup>Valójában az ilyen típusú műszerek hangsebességet mérnek, és abból  $c = \sqrt{\kappa RT_v}$  alapján származtatják a virtuális hőmérsékletet, ám a szenzorfej körüli áramlómódosulások miatt a valóságostól kissé eltérő értékek adódnak, a léghőmérsékletet a Schotanus – Liu-korrekcióval lehet előállítani.

cég által létrehozott LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015), témavezetőm által írt Fortran kód és általam írt awk script segítségével számoltunk 1, 5 és 30 perces átlagokat, ezeket összevetettük egyrészt az adatrögzítők által tárolt perces átlagokkal, valamint a repülőtéri (METAR), és az onnan nem messze lévő OMSZ Szegedi Magaslégköri Observatórium által szolgáltatott (SYNOP) észlelésekkel. Ekkor több problémára is fény derült, melyek kiküszöbölése bonyolult technikai feladat volt.

### 2.2.1. Kezdeti problémák

Elsőként néhány adatrögzítéskor keletkező hibát kellett kiküszöbölnünk, melyek a rögzített adatok időpontjaival kapcsolatban léptek fel, s melyekre csak nehezen találtunk megoldást. Az alapvető megoldási módszerek azon alapultak, hogy az egy mástól kb. 15 m-re lévő két szónikus anemométer adataiból nyert, valamint az adatrögzítők által rögzített 30 és 5 perces átlagokról feltételezhetjük, hogy jó közelítéssel azonos időbeli menettel rendelkeznek. Ezt kihasználva a kereszt-korrelációban egy csúcsot várhatunk ott, ahol az időpontok szinkronban vannak, így 30 és 5 perces pontossággal meghatározható, hogy mennyivel kell eltolni az egyik adatsor időbélyegét. Így szűkíthetjük azt a tartományt, ahová a 10 Hz-es adatokat kell eltolnunk. Ezt az eljárást több helyen, például különböző mérési szünetek közötti időszakokban is elvégezhetjük, így a szünetek hosszát is pontosíthatjuk az adatsorokban.

**Mérési szünetek** Két ismert szünetről beszélhetünk. 2015. július 6-án kora délután, helyi idő szerint fél kettő környékén kb. fél óras áramszünet keletkezett, amikor a mérések szüneteltek. Ezen kívül 9-ére virradó éjszaka zivatarlánc vonult át, amikor éjfél után nem sokkal kikapcsoltuk a műszereket. Másnap reggel fél nyolcig nem zajlott adatgyűjtés. E két szünet után, a mérések újraindulásakor keletkeztek időhibák a rögzített adatoknál. A METEK adatsorának időpontjai a laptop órája szerinti időt követik (vagyis a leállítás alatt is „telt az idő”), ezért a szünetek időpontjaira nem jelennek meg adatok. A CSAT3 adatsorában azonban a szünetek alatt az óra is állt, így a visszakapcsolás utáni első időbélyeg 0,1 mp-cel nagyobb a kikapcsolás előtti utolsónál. A mérési kampány után derült ki, hogy az adatgyűjtő belső órája már korábban meghibásodott, ezért a számláló a „kívánt” 10 Hz frekvenciának megfelelően helyettesítette az időpontokat.

**Órabeállítások** A METEK USA-1 szenzor mérései 2015. június 30-án, míg a BME által üzemeltetett CSAT3 mérései négy nappal korábban elkezdődtek. A CR3000 rögzítő UTC-ben „mérte” az időt, és tized másodperc pontossággal rögzítette, pontosabban a megadott kezdeti időpontot követően minden rekord idejéhez hozzáadott 0,1 mp-t. Az adatgyűjtő saját elemes órával rendelkezik, mely elvileg kikapcsolt állapotban is biztosítja, hogy a műszeróra az időt megfelelő pontossággal mérje. Ennek

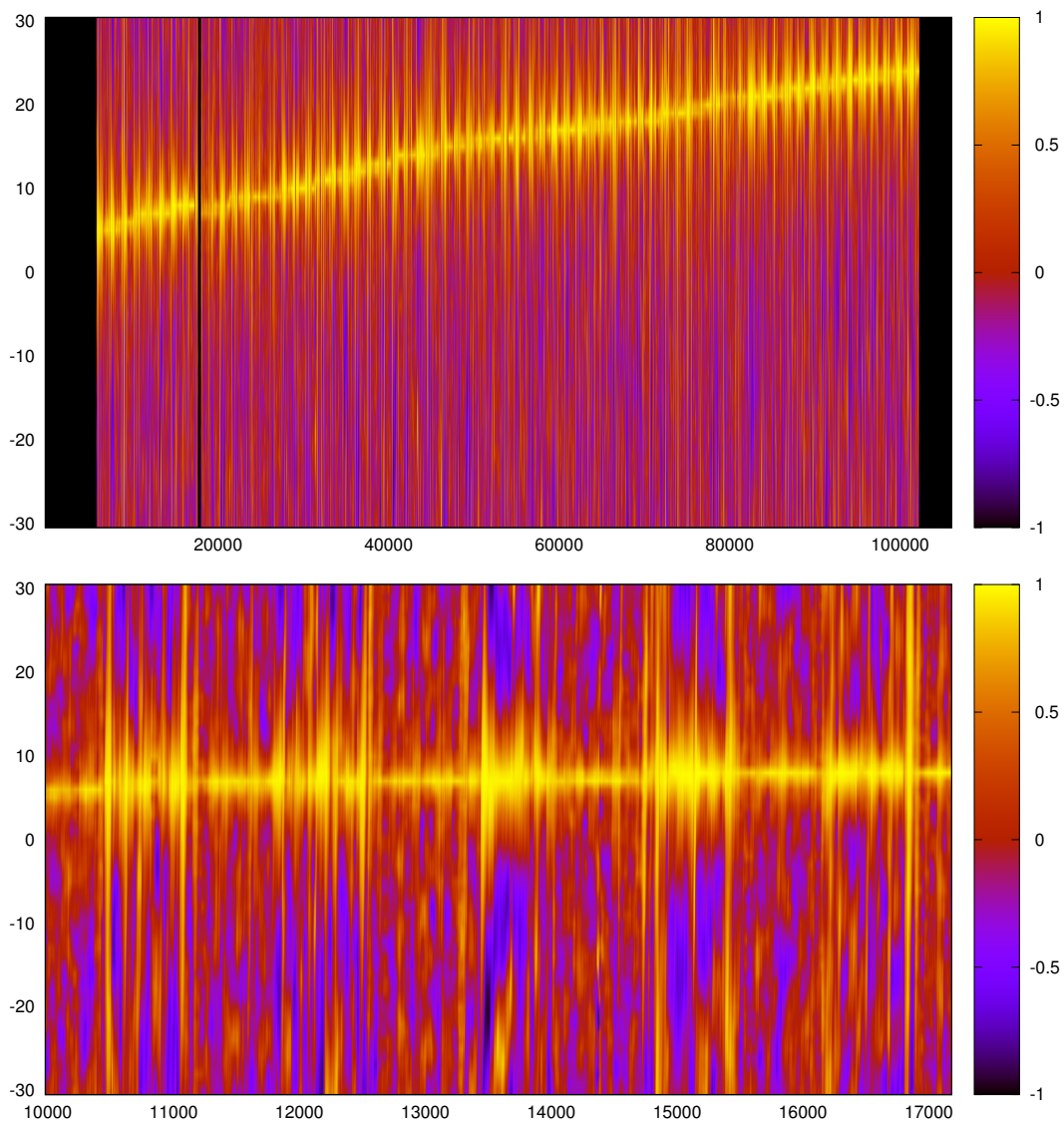
ellenére a szünetek előtti utolsó, és az azt követő első időpontok között egy tized másodperc a különbség. A fájlban lévő adatbejegyzések (*rekordok*) tartalmazzák azok sorszámait is, ezek is folyamatosan követik egymást. A METEK szenzor esetében az adatgyűjtő szoftvert úgy állították be, hogy UTC-ben rögzítse az időket, ennek ellenére a fájlokban közép-európai nyári idő szerepel, ráadásul egész másodperc pontossággal. Ezek után még az sem igaz, hogy egy másodperchez mindig tíz adat tartozna, átlagosan 8–12 között változik. Az óránként mentett fájlokban pedig a várt 36000-hez képest 5–6 adattal több van.

**Időhibák korrekciója** A METEK mérések kezdetéhez tartozó időpontban már észrevehető, hogy az első felismerhető jelek a CSAT3 adatsorban korábban jelennek meg mintegy 3–4 perccel, ezt azonban gond nélkül egymás mellé lehet korreláltatni. Ezt a kovariancia-maximalizálást a két mérési szünet után elvégeztük, így a CSAT3 adatsorába is bekerültek a kimaradások.

Később mindkét műszer esetében kérdésessé vált, hogy valóban pontosan 10 Hz frekvenciával mértek-e. Amíg ezt elfogadtuk, a pontos illesztés lehetetlen volt, csak helyenként lehetett végrehajtani, és az eltolás időben sem volt állandó. A METEK műszer esetében azt sem lehetett eldönteni, hogy az adatvételi frekvencia 10 Hz körüli látszólagos fluktuációja valódi, vagy a laptop órájának pontatlanságából adódik. Miután ugyanis a METEK adatsor kezdő időpontját hozzáillesztettük a CSAT3 adatsorhoz, a július eleji zivatarok hatásainak elemzésekor ismét kb. két perc eltolódást tapasztaltunk a két adatsor között. Ekkor a számolt egy perces átlagok teljes adatsorára kiszámoltuk a kereszt-korreláció függvényét egy órás ablakkal,  $\pm 30$  perc eltolódási (*lag*) tartományon. Az eredményt a 2.1. ábra mutatja. A kereszt-korreláció maximuma láthatóan eltolódik (felső ábra, emelkedő sárga sáv). Ez azt jelenti, hogy ha elfogadjuk, hogy mindkét műszer pontosan 10 Hz frekvenciával mér, akkor a METEK adatait fogadó laptop órája „lassabban jár”, mintegy 20 percet késik a mérés ideje alatt. Ez részben magyarázza azt is, hogy miért van 5–6 adattal több minden mentett órában, ugyanakkor ez az 5–6 adat önmagában összességében kevesebb, kb. 12 perc késést okozna. Ha a laptop óráját fogadjuk el pontosnak, akkor a METEK mintavételi frekvenciája átlagosan valamivel gyorsabb kell legyen, mint a CSAT3-é. A valóságban valószínűleg mindkét hiba fennállhatott.

Az adatsorokban talált nem-stacionárius jelenségek vizsgálatakor vettük észre, hogy a két mérési szünetet követően a METEK adatsorában lévő jelek, melyeket valamilyen nem-stacionárius jelenségek okoztak, mintegy nyolc órával megelőzték a hivatalos észleléseket. Ez a tizedmásodpercek pótlására történt időpontátírás következménye. A szünetek visszapótlása után nagyobb eltérések már csak az adatsor végén fordultak elő, melyek így 20 percen belül maradtak.





**2.1. ábra:** Az  $u$  szélsősebesség-komponens  $10\text{ Hz}$ -es adatsorokból számított nyers egy perces átlagainak kereszt-korrelációja egy órás részintervallumokkal. Az ábrák vízszintes tengelyén a kezdő METEK-rekord sorszáma (az eltelt percek számával ekvivalens), a függőleges tengelyen a kezdő CSAT-rekord ehhez képesti eltolása percben. A felső ábrán a teljes adatsor látható. A fényes jel a kereszt-korreláció maximumhelye. Megfigyelhető, hogy időben előre haladva ez pozitív irányban eltolódik. Az eltolódás átlagos meredeksége  $\frac{1}{4925}$ . Alul július elejéről kiválasztott öt napos időszak szerepel. A maximum körüli sávozottság oka a napi menet: az éjszakai turbulenciamentes, gyenge szeles időszakokban a korreláció lassabban csökken az eltolással, teljesen szélszentes időszakokban az eltolás teljes  $\pm 30$  perces intervallumában magas marad.

Az kereszt-korreláció eltolás szerinti maximumhelyére történt egyenes illesztéssel meghatároztuk az órák egymáshoz képesti elcsúszását (vagyis azt, hogy mennyivel járt lassabban a laptop órája). Az egyenes meredekségéből kiszámoltuk, hogy a CSAT3 adatsor hány adatára esik egy extra adat a METEK adatsorában. Erre az értékre 4925-öt kaptunk. Az egyenes azonban nem teljesen illeszkedik a maximumhelyekre, mivel az elcsúszás gyorsasága szakaszonként kissé változott. Így a trend kiszűrése után még nagyjából  $\pm 2$  perc között mozgott a kereszt-korreláció maximumhelye.

A nagyfrekvenciás adatok illesztését végül egyedül a METEK adatsor – kiszámolt rátával történő – ritkításával, vagyis minden négyezer-kilencszázhuszonötödik adat törlésével tudtuk lehetővé tenni. A szünetek hosszát a METEK adatsor szüneteiből határoztuk meg, majd módosítottuk a kiszámolt rátával, és bevezettük a CSAT3, illetve módosítottuk a METEK adatsorban, végül ez alapján tized másodperc pontossággal, állandó 10 Hz frekvenciával újraírtuk az órákat, a szünetekben minden változó értékét „hiányzó adat” (-99999) értékre állítottuk. Az így kapott új adatsort szinkronizálni lehetett a mérésekkel, és egy perces átlagaihoz lehetett szinkronizálni a többi, eleve perces átlagolással mért adatokat, melyeket egy CR23x gyűjtő rögzített, és kezelésükről nagyobb részt BSc-s hallgatótársam, *Tordai Ágoston* gondoskodott (*Tordai, 2015*).

A hibás időadatok korrigálását (szünetek javítása, elcsúszások) követően végül „abban állapotunk meg”, hogy a METEK adatsort tüntetjük ki „jónak”, mivel a perces bontásban mért többi adatsor a legkönnyebben a belőle számolt perces átlagokhoz volt hozzátolható.

## 3. A nagyfrekvenciás adatok feldolgozása

### 3.1. Technikai háttér

A gyors válaszidejű műszerek által szolgáltatott adatok feldolgozásához ma már több szoftver áll rendelkezésre. Ezek egy részét a műszereket, illetve adatrögzítőket gyártó cégeknél fejlesztették, és leghatékonyabban a saját gyártású adatrögzítőik által kezelt adat- illetve fájlformátumokat tudják feldolgozni. Léteznek azonban olyan standard formátumok, melyek kezelésére a legtöbb szoftver kevés felhasználói többletmunka után képes. Ezek a szoftverek képesek előállítani a határréteg tulajdonságait leíró változók idősorait, ha: a) a szükséges változók rendelkezésre állnak, b) a bemenő fájlok formátuma megfelel a szoftver által előírt formai követelményeknek és c) a szoftver számára megadtuk a szükséges beállításokat (metaadatokat).

Munkám során a Bayreuth-i Egyetem kutatói által fejlesztett TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015), valamint a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015) szoftverekkel teljes futtatásokat sikerült végezni. Foglalkoztam a Campbell<sup>TM</sup> EdiRe<sup>®</sup> szoftverrel is, ennek adaptálása még folyamatban van.

A következőkben a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015)<sup>6</sup> és a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015) programok néhány alapvető jellemzője kerül bemutatásra. Mivel a dokumentációjuk megfelelően részletes, az alaptulajdonságok mellett elsősorban néhány rendellenes viselkedésre szeretnék rávilágítani, melyek nehezítették a program használatát.

### 3.1.1. TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015)

A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) szoftver egy Fortran kódon írt – szabadon felhasználható, részben nyílt forráskódú<sup>7</sup> – program, mely eredetileg Windows és MacIntosh platformokon működött, 2015 óta azonban fut egyéb Unix típusú rendszereken is. Jómagam eleinte Win7, majd Ubuntu14.04, Ubuntu16.04 rendszereken – saját számítógépeimen – használtam, ezen kívül a linuxos verzióját az ELTE Atlasz szuperszámítógépére is feltelepítettem.

A program számára egy *parameter.vbp* nevű fájlban kell megadni a futtatási beállításokat. Ezután a program közvetlenül parancssorból futtatható. A dokumentáció (Mauder and Foken, 2015) tartalmaz instrukciókat a beállítások korrekt megadására, ugyanakkor a leírásban és a fájl kommentjeiben lévő magyarázatok néhány helyen sem egymással, sem a valós működéssel nem konzisztensek. Mindkét helyen többször előfordul például, hogy a jóval régebben kiadásra került TK2 szoftverre vonatkozó leírások megmaradtak, nem frissültek. Néhány mértékegységet rosszul, vagy egyáltalán nem kezel. Például a METEK szenzor alaphelyzetben  $\frac{cm}{s}$  mértékegységben mérte a szelet, a *parameter.vbp* fájlban ennek megfelelő beállítást alkalmaztunk. A kimeneten beállított  $\frac{m}{s}$  mértékegység helyett azonban a bemeneti mértékegység szerinti értékek jelentek meg, melyek következtében a számolt turbulens áramokban is több nagyságrend eltérés keletkezett (pl. az  $\overline{u'^2}$  négy nagyságrenddel nagyobb volt a valósnál). A nyers adatsorok adatait ezért SI-be kellett konvertálni.

Hasonló történt, amikor a METEK szenzor balsodrású (az  $u$  tengely észak felé, a  $v$  tengely kelet felé pozitívnak lett beállítva) koordináta-rendszerének megfelelő beállítást adtunk meg. Itt nem lehetett a program viselkedést pontosan feltárni. A bemenő adatok fájljaiban az oszlopok  $u, v, w$  sorrendben voltak. A *parameter.vbp* fájlban történő *lefthand* változó igazra állítása után a szélkomponensek előjelei, valamint a szélirányok nem a várt módon alakultak a kimenetben. Egyszerűbb volt a

---

<sup>6</sup>A szoftverek – mint szellemi termékek – teljes neve és a hozzájuk tartozó hivatkozás következetes kiírása az esetleges szerzői jogi kéréseknek történő megfelelés biztosítása érdekében történik.

<sup>7</sup><https://zenodo.org/record/20349>

bemeneti adatoknál az oszlopok sorrendjét úgy megadni, mintha a fájlban  $v, u, w$  lenne a sorrend, és jobbkéz-rendszert (lefthand változót hamisra) beállítani ( $v$  észak felé,  $u$  kelet felé pozitív), így helyes eredményeket kaptunk.

A műszeres szisztematikus mérési hibák korrigálása érdekében korrekciók alkalmazása szükséges a turbulens áramokra. Ezek engedélyezhetők, vagy letilthatók a `parameter.vpb` fájlban. A leírás alapján a program automatikusan képes dönteni a megadott műszerek és más beállítások alapján, hogy mely korrekciókat kell alkalmazni. Nem derül ki egyértelműen, hogy mely esetekben melyik történik, a tapasztalat azonban arra a viselkedésre utal, hogy a letiltott korrekciókat nem alkalmazza, az engedélyezettokról automatikusan dönt. Ennek következtében a METEK esetében például a korrekciók tiltása és engedélyezése nem okozott különbséget az eredményekben.

A TurbulenzKnecht-3.11 (*Mauder and Foken, 2015*) program három fő modulból áll, melyeket külön is lehet futtatni, illetve a részek kimeneteiként keletkező eredményeket külön is lehet menteni. Az egyes részek::

#### *Adatszűrő modul*

Kimenetén fél órára bontva bináris fájlokban jelennek meg a nyers adatok:

- SI-be konvertál (valószínűleg néhány mértékegység esetében hibásan).
- Kiugró adatokat szűr.
- Opcionálisan megadott fix időeltolást alkalmaz.
- Kereszt-korrelációval illeszti az adatsorokat (opcionális és később is végrehajtható).

#### *Nyers kovariancia modul*

A korrekciók nélküli kovarianciákat számolja és menti fájlokba:

- Kereszt-korreláció (opcionális).
- Nyers kovarianciák.

#### *Korrekciós modul*

A nyers kovarianciákra alkalmazza a korrekciókat. Kimenete a programfuttatás tulajdonképpeni végeredménye: a korrigált, minőség-ellenőrzött turbulens karakterisztikák:

- Koordináta-forgatások (Planar fit, Kettős forgatás, stb., *Wilczak et al., 2001*).
- Fő korrekciók (SND<sup>8</sup> (*Schotanus et al., 1983; Liu et al., 2001*), WPL<sup>9</sup> (*Webb et al., 1980*), Moore (*Moore, 1986*), stb).
- Minőség-biztosítás és -ellenőrzés (QA/QC<sup>10</sup>, *Foken and Wichura, 1996*).

---

<sup>8</sup>Schotanus – Nieuwstadt – de Bruin

<sup>9</sup>Webb – Pearman – Leuning

<sup>10</sup>Quality Control/Quality Assurance

### *Speciális számítások*

Opcionálisan harmadrendű momentumok, spektrál- és *footprint*-analízis is végrehajtható (felhasználói szempontból külön modulként kezelendő, működési szempontból azonban az egyes korábbi modulokon belül jelent több végrehajtandó feladatot, pl. a spektrumok a második modul végén kerülnek kiszámításra a bináris adatokból).

Három programfutási hibára derült fény (mivel a program fő részei nem nyílt forráskódúak, ezeknek a hibáknak a kijavítására nem volt lehetőségünk):

- A modulok külön futtatása sikertelen volt, így minden esetben az elejétől hajtottuk végre a futtatásokat megszakítás nélküli módban. A hiba a könyvtárfa olvasásakor keletkezett.
- Lehetőség van megadni, hogy a hiányzó adatokat pótolja-e a program. Spektrumok előállításához ez kötelező (ezért lineáris interpolációval történő pótlást választottunk), a kovarianciákhoz nem javasolt. Hiányzó adatok esetén a trendszűrés a leírás szerint nem hajtható végre. Ezt a hibaüzenetet kaptuk minden fél órára úgy is, hogy az adatpótlás a nyers kimenet alapján sikeres volt. A futás után megtalálhatók voltak a spektrumok fájljai, melyekben azonban hibásak, így használhatatlanok voltak az adatok.
- A spektrumok eloszlásfüggvényét nem képes előállítani, ismeretlen programfutási hibával kilép. Így le kell tiltani az eloszlásfüggvények kiíratását.

#### *3.1.2. LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015)*

A program Windows és Mac rendszereken használható, grafikus kezelőfelületű, tudományos célra szabadon használható és nyílt forráskódú, de nem terjeszthető. Kezelőfelülete öndokumentáló. Beállítási lehetőségei sokkal bővebbek, cserébe a felület nem engedélyezi olyan beállítások megadását, melyek egyébként hibás programműködéshez, vagy a feldolgozandó adatokkal vagy kijövő eredményekkel kapcsolatban fizikai inkonzisztenciához vezetne. A programfuttatás „Express” módban is végrehajtható, melyhez csak a legfontosabb alapbeállításokat szükséges megadni (műszerekre, bemenő fájlok formájára vonatkozó adatok, időszakok kiválasztása). A többi beállítás előre definiált alapértelmezett értékekre áll. Így a szoftver mélyreható meteorológiai szaktudás nélkül is használható.

A szoftver az adatok feldolgozását az előzőhöz hasonló módon hajtja végre, moduláris felépítése nagyrészt egyezik. Az adatszűrés sokkal több futásidőt igényel, köszönhetően a több rendelkezésre álló szűrési módnak, valamint, hogy a hat szűrési lépcső mindegyike után azonnal a spektrumokat számolja, és – ha a beállítás során így választottunk – minden lépés után el is menti a szűrt nyers adatokat és a spektrumokat is. Ez jelentős méretű tárhelyet is kíván. Az adatszűréshez – a

felhasználó külön választása alapján – a bemenő fájlokban szereplő diagnosztikai változók<sup>11</sup> értékeit is képes figyelembe venni, és az alapján kizárni (rossznak minősíteni) adatokat. A LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015) esetében az adatszűrés hat lépcsője: a) kiugró adatok szűrése (Vickers and Mahrt, 1997), b) oldalszél-korrekción (Liu et al., 2001), c) szélirány-korrekción (van der Molen et al., 2004), d) koordináta-forgatások (Wilczak et al., 2001), e) időeltolódás kompenzációja (kovariancia-maximalizálás) és f) trendsűrés. Ezek a nagyfrekvenciás nyers adatokra hajtódnak végre, míg a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) esetében csak az első kettő, a többi csak a kiszámolt kovarianciákra. A konzisztencia-vizsgálat mindkét programban még a programfutás elején megtörténik – ha nincs letiltva –, mely során a fizikailag lehetetlen értékek (pl.  $50 \frac{m}{s}$ -ot meghaladó szélsősebesség,  $70^\circ C$ -t túllépő hőmérséklet, stb.) lesznek kiszűrve, de ezután nem kerülnek kimentésre a szűrt adatok.

A teljes futásidő alig néhány százalékát teszi ki a kovarianciák kiszámítása. Ez a két és fél hónap hosszúságú adatsor esetében 2–3 percet vett igénybe, az adatszűrés azonban mintegy 4–5 h-t. A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) teljes futásideje ugyanezre az adatsorra kb. 2 h volt.

Felhasználói szempontból a program egyik hátránya, hogy a mérési elrendezés beállítása során az információk megadása kötelező a fájl összes oszlopáról (ugyanaz a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) esetében fordított: a változókhoz kell rendelni az ő oszlopaik sorszámát). A diagnosztikai, illetve egyéb nem-fizikai változókat (pl. mérés sorszáma) is szerepeltetni kell tehát a listában, és hozzájuk is kell mértékegységet rendelni, még akkor is, ha nem feldolgozandó oszlopról van szó. Kétféleképpen lehet beállítani, hogy egy változó ne szerepeljen a feldolgozandó adatok között, de nem mindegy, hogyan tesszük ezt. A kézikönyvben erre leírt instrukciók nem mindig vezetnek célra. A leghatékonyabb módszer a tippelés: addig állítjuk a lehetőségeket, amíg a program meg nem engedi, hogy továbblépjünk. A dátummezőt is itt kell megadni, és szöveg formátumú mezőnek beállítani, ami azonnal le is tiltja a feldolgozás alól. A fájl dátumformátumát máshol kell megadnunk, e mezőt aszerint kezeli a program. A formátum egyébként tetszőleges lehet a kézikönyvben leírt „wildcard” karakterek<sup>12</sup> felhasználásával. A korábban bemutatott TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) szoftver csak bizonyos standard ASCII formátumokat ismer fel. A CSAT3 nyers fájljaiban TOA5<sup>13,14</sup> formátum-

---

<sup>11</sup>Például a CSAT3 anemométer és az EC150 gázanalizátor képes felismerni, hogy az aktuális mérés során műszeres hiba történt-e, és ehhez jelzőbiteket rendel, melyet a nyers adatok egy oszlopában elment.

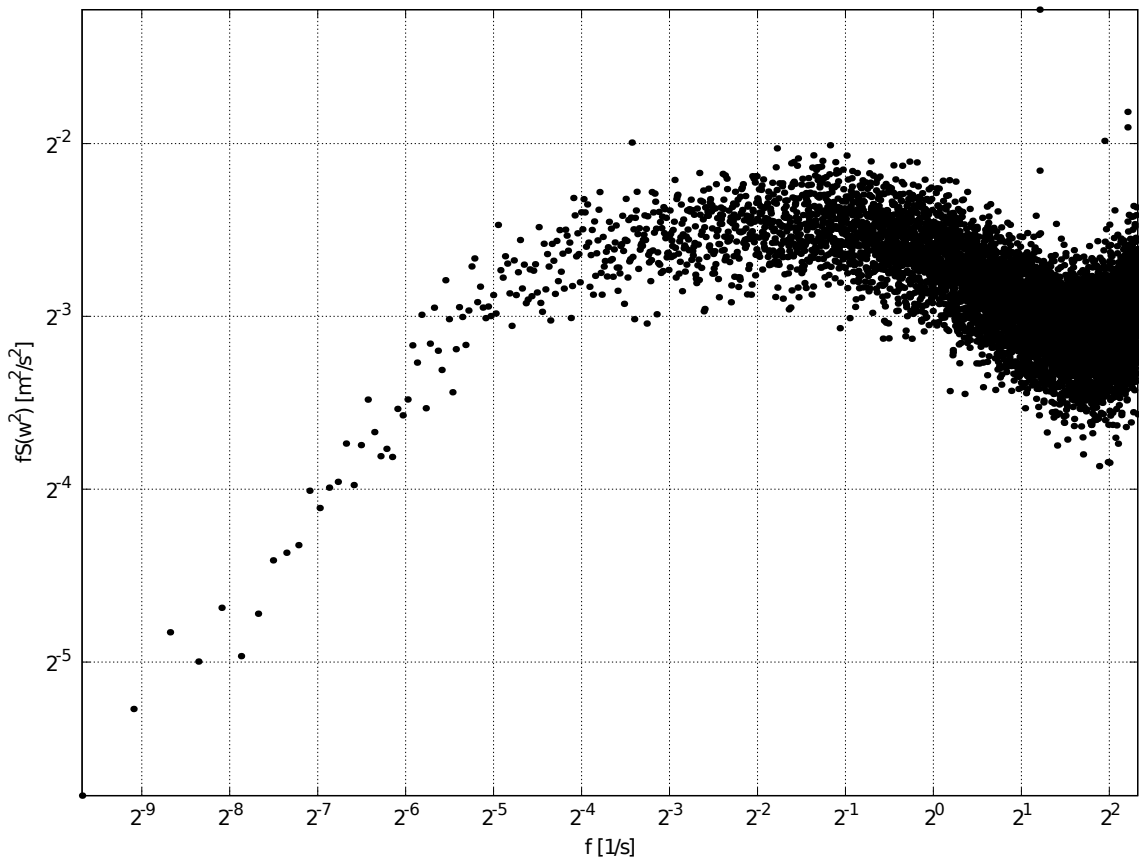
<sup>12</sup>y=év, m=hónap, d=nap (ddd=év napja), H=óra, M=perc, S=másodperc

<sup>13</sup>Table Oriented ASCII – csv (Comma Separated Values – vesszővel elválasztott értékek) formátumra épül, három fejlécsora van, melyben rendre a fájl leíró metaadatok, az oszlopok nevei, valamint az oszlopok mértékegységei szerepelnek.

<sup>14</sup>Dátumformátuma: "yyyy-mm-dd HH-MM-SS.0\*"

ban szerepelnek a dátumok, a METEK-ét<sup>15</sup> azonban nem képes kezelni, ezért azt is TOA5-re konvertáltuk.

A program futtatása a felhasználói felület korlátozásai miatt csak a szakirodalmi ajánlások alapján történő beállításokkal tudtuk elvégezni. A sok lehetőség közül csak úgy választhatunk, hogy azok egymással konzisztensek legyenek. Futás közben felléptek hibák, melyeknek az okát nem sikerült kideríteni. A hibaüzenet szerint a spektrumok számítását nem sikerült végrehajtani, azonban azok fájljai megjelentek a kimeneten, és a bennük lévő eredmény sem tűnik hibásnak (3.1. ábra). Egyéb problémával nem találkoztunk.



**3.1. ábra:** A vertikális szélesség spektruma. Az adatok a minden nap 12 UTC-vel kezdődő fél óra spektrumainak átlagából származnak, így a pontok szóródása függőlegesen csaknem tizedére csökkent. A pontok által kirajzolt alak a nappali konvektív határrétegre jellemző  $w$ -spektrum, a Kaimal-görbe (Kaimal and Finnigan, 1994) körül szór.

### 3.1.3. Egyéb programok

Munkánk során elkezdtünk tesztelni egy Témavezetőm által írt Fortran kódot. A program első verziója egy kiugró adatokat szűrő, nyers kovariancia számoló kód volt, G77 Fortran-fordító szintaktikával. E fordító támogatottsága 2015 őszén megszűnt, így a rendelkezésemre álló gfortran-6 fordító már nem ismerte fel a kód egy részét.

<sup>15</sup>Dátuformátuma: yymmddHHMMSS Időzóna

Szükséges volt a kód átírása (amely így mintegy 80 %-kal rövidült), ekkor került bele a Schotanus–Liu korrekciót (*Liu et al.*, 2001; *Schotanus et al.*, 1983) végrehajtó eljárás. A kódot teszteltük a METEK szónikus anemométer adatsorán, és az eredmények a TurbulenzKnecht-3.11 (*Mauder and Foken*, 2015) eredményeivel jó egyezést mutattak.

Megkezdtük a Campbell<sup>TM</sup> EdiRe<sup>®</sup> szoftver adaptálását is. A program szabad felhasználású. Grafikus kezelőfelülete nem öndokumentáló, kézikönyve ennek ellenére nem túl részletes, így a felhasználó számára gyakran nehézséget okoz a kezelése. Munkánk e szoftverrel ezért még csak az ismerkedés fázisában tart, hasznos felhasználása csak a közeljövőben várható.

Nyers kovarianciák számításához egy awk script is íródott, egy másikkal pedig a két nagyfrekvenciás műszer adataiból számolt nyers átlagok kereszt-korreláció maximalizálással történő egymáshoz illesztését hajtottuk végre.

Célunk e fent ismertetett szoftverek használatával a nyers adatsorainkról belátni, hogy alkalmasak a határréteg vizsgálatára. Amennyiben a különböző szoftverekkel számolt értékek közelítőleg megegyeznek, akkor ezekkel a szoftverekkel az adatsor feldolgozható, és a turbulens karakterisztikákra kapott értékek reprezentálják a légkör állapotát (feltéve még azt, hogy az adatok minőségét nem rontja valamilyen nem-lineáris jelenség, melyet a minőség-ellenőrzés egyébként felfed).

### 3.2. A feldolgozott adatok adatbázisa

A következőkben a 2015-ös szegedi mérési program *Tordai* (2015, 2016) alapján készült adatsorait mutatom be, majd az egyes mérési adatsorok egymással történő összehasonlítása következik. Meg kell bizonyosodnunk afelől, hogy az alkalmazott szoftverek alkalmasak az adatok feldolgozására. Ennek három követelményét fogalmaztuk meg:

- A különböző szoftverek által létrehozott adatsorok egyezése
- A feldolgozatlan adatsorok hivatalos észlelésekkel való ellentmondásmentessége
- A feldolgozott adatsorok és az észlelések egyezése

A fent tárgyalt technikai problémák (az időpont-eltolódások, a szünetek problémái az adatsorokban, okozó tényezőként az adatrögzítők óráinak pontatlansága illetve meghibásodása) a második és a harmadik követelmény sérülését okozták, a technikai javításokat korábban tárgyaltuk. A most következőkben a feltételek feldolgozás utáni teljesülését bizonyítjuk.



A szoftverek által számított 5 és 30 perces adatok adatbázisait – a CR23x által rögzített referenciaadatokhoz hasonlóan – Excel<sup>16,17</sup> fájlokban tároltuk.

**3.2. ábra:** Példa az adatbázisok szerkezetére. A képen a CSAT3 teljes adatsorának LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015) programmal kiszámolt fél órás átlagait tartalmazó állományról készült képernyőkép. A teljes állomány 112 oszlopból és (fejléccel együtt) 3414 sorból áll.

### 3.2.1. A nyers adatsorok összehasonlítása

A következőkben szórásdiagramokon szemléltetjük a különböző adatsorok egyezőségét. A diagramokon feltüntetjük a  $\sigma = 2$ -höz tartozó szórásellipszist (Forrai, 1964). Ez az ellipszis a kétdimenziós normál eloszlás sűrűségfüggvényének egy izovonala, az általa határolt területre esik kb. a pontok 95%-a. Ha a vizsgált két adatsor időbeli menete hasonló mintázatot mutat (vagyis a két adatsor szinkronizált), akkor a szórásellipszis ismérvei a következők:

- I.) Excentricitása közel egység, vagyis az ellipszis „vékony”. Az excentricitás az  $r$  korrelációs együtthatóval azonosítható,  $r = 1$  esetén az ellipszis elfajul egy szakasszá. Alsó határértéknek  $r = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,866$ -ot választottunk, amikor az ellipszis nagytengelye kétszer olyan hosszú mint a kistengelye.
- II.) Nagytengelye az  $y = x$  egyenessel közel párhuzamos. Feltételünk, hogy  $m_b$  meredeksége az  $(r^2, \frac{1}{r^2})$  tartományban legyen. Minél kisebb  $r$ , annál „engedékenyebb” a feltétel, hiszen közel kör alakú pontthalmaz esetén a meredekség

<sup>16</sup>A táblázatok tárolásához legalább 2007-es verziójú táblázatkezelő szükséges, mivel a sorok száma a régebbi verziók tárolási kapacitását a legtöbb esetben meghaladja.

<sup>17</sup>A táblázatok egy része Microsoft Excel (makróbarát xlsx) mellett Open Document Format – Spreadsheet (ods) formátumban is elkészült.

kevésbé informatív, elnyúlt ponthalmaz esetén pedig már a meredekség kis eltérése is szignifikáns különbséget okoz a két műszer által mért értékek valamely tartományán. A nagytengely egyébként arra az egyenesre fekszik, melyre *merőleges irányban* a pontok távolságainak négyzetösszege minimális<sup>18</sup>.

III.) Középpontja – amely az adatpontok átlagából adódik – közel esik az  $y=x$  egyeneshez. A pont egyenestől mért  $D_\mu = \frac{|\mu_y - \mu_x|}{2}$  távolságából és az adatpontok  $N$  számából kiszámíthatjuk az egyes mérési pontok minimális bizonytalanságát („szükséges műszeres hiba”), mely ahhoz szükséges, hogy a középpontot az egyenestől ne lehessen szignifikánsan elkülöníteni. A  $3\Delta\mu > D_\mu$  feltételt vezettük be (vagyis az egyenes szeli a középpont  $3\Delta\mu$  sugarú környezetét), ami 99,73% szignifikanciával ekvivalens.  $N$  adatpont és  $d$  műszeres hiba esetén  $\Delta\mu = \sqrt{\frac{2}{N}}d$ . Ebből  $d > \sqrt{\frac{N}{2}}\frac{|\mu_y - \mu_x|}{6}$  adódik. Küszöbértékként a sebességkomponenseknél  $d = 0.05\frac{m}{s}$ -t, a hőmérsékletnél  $0,05^\circ\text{C}$ -t adunk meg, ami az operatíván használt műszerek pontossága.

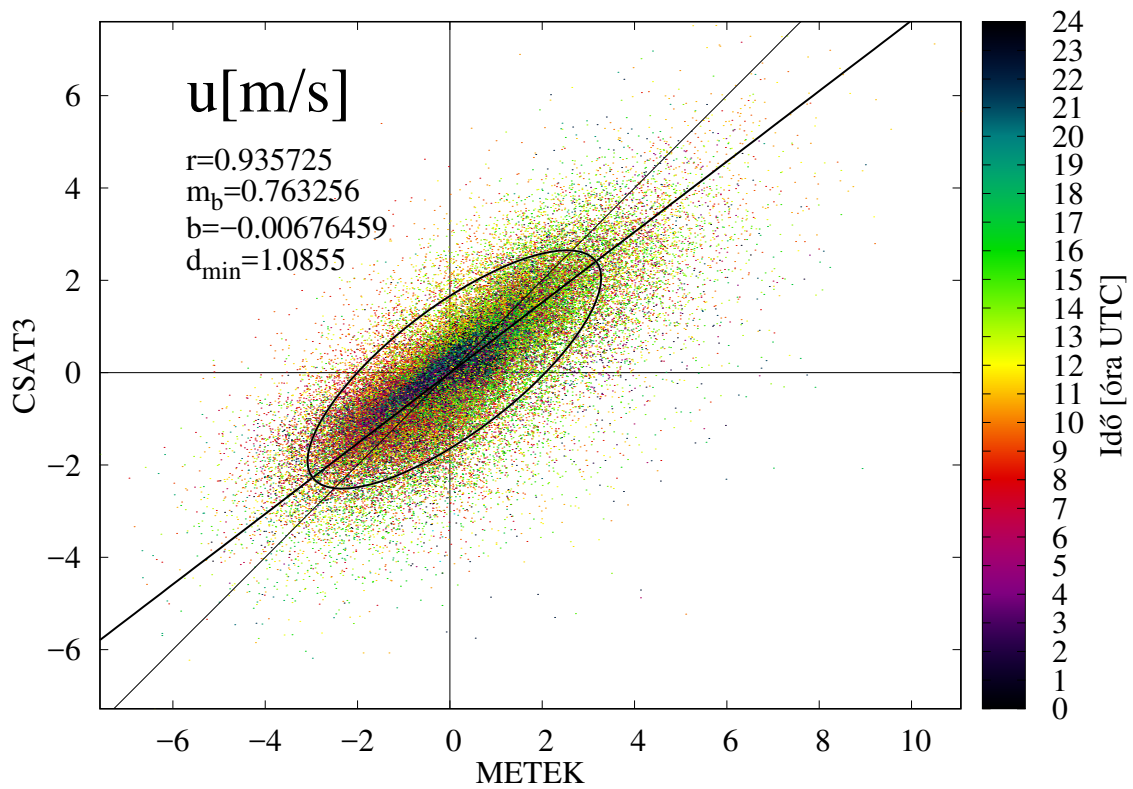
A fenti konkrét feltételek önkényesek, általában csak kvalitatíven szokták vizsgálni a problémát. Ahhoz azonban jó támpontot nyújtanak, hogy a szisztematikus hibák okait feltárhassuk.

**Nagyfrekvenciás adatok** A két 3D-s szónikus anemométer 10 Hz-es adatsoraiban a három szélkomponens és a szónikus hőmérséklet közös változók. Fontos emlékeznünk (lásd 2.1. *alszakasz*), hogy a két műszer egymástól mintegy 15 m távolságban, és különböző magasságban mért.

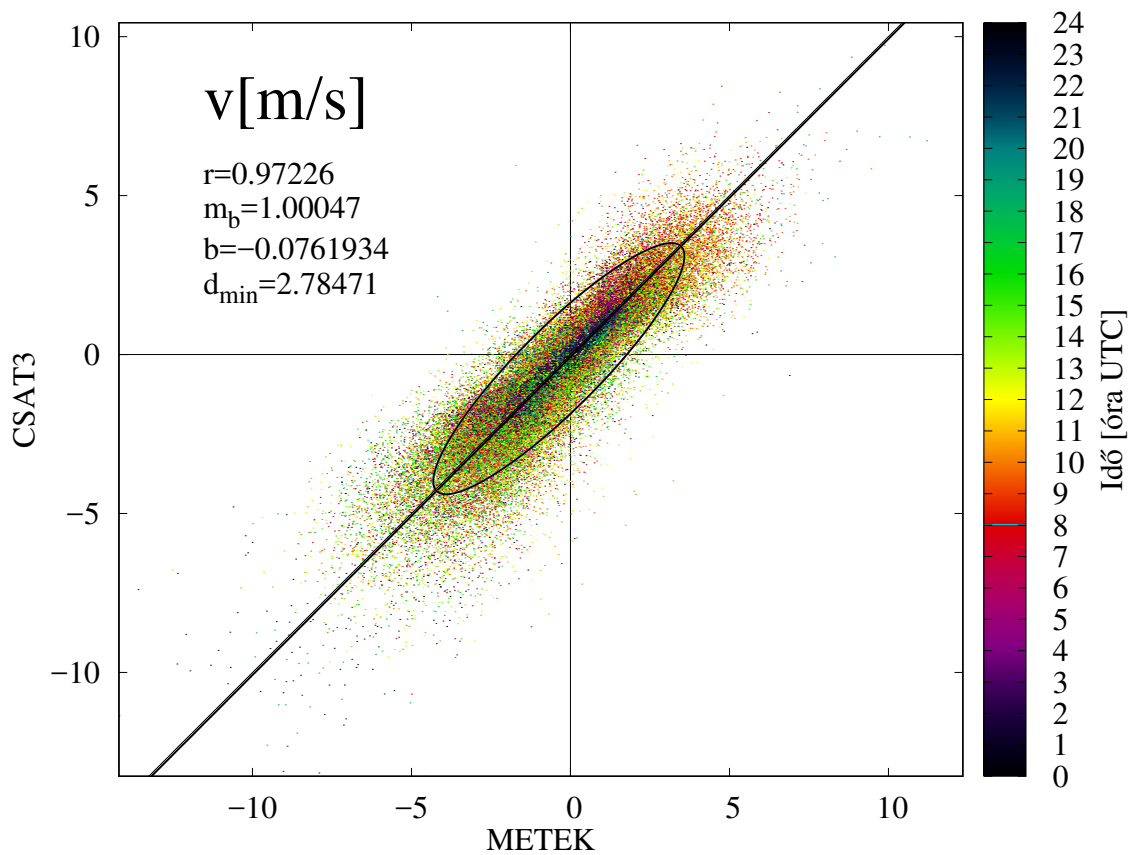
A 3.3.–3.7. ábrák mutatják a szélkomponensek, a szélesebb és a szónikus hőmérséklet szórásdiagramjait. A vízszintes tengelyeken a METEK, a függőlegesen a CSAT3 által mért adatok szerepelnek. Megjelenítettük a  $2\sigma$  szórásellipszist és nagytengelyét (vastagabb vonal), valamint az  $y = x$  egyenest (vékonyabb vonal). A feltüntetett változók az ellipszis excentricitása ( $r$ ), a nagytengely meredeksége ( $m_b$ ) és tengelymetszete  $y = 0$ -nál ( $b$ ) és a középpont  $y = x$ -től való megkülönböztetethez szükséges műszeres hiba ( $d_{min}$ ). Megjegyzendő, hogy a  $W_{sp}$  szélesebb (és később a varianciák) eseté a módszer nem korrekt, mivel a pontok ezek esetében Weibull-eloszlást követnek (Lee and Wen, 2010; Villanueva et al., 2013). A fájlok kezelhetősége érdekében ritkított adatsort jelenítettünk meg, minden hatszázadik (percenként egy) pillanatnyi érték szerepel az ábrákon.

A 10 Hz-es adatok esetében általában a harmadik feltétel sérül, mivel a sok adatpontnak köszönhetően a középpont bizonytalansága erősen lecsökken, ezért nagy műszeres hiba lenne szükséges az  $y = x$  egyenestől való megkülönböztetethez.

<sup>18</sup>Ez a költségfüggvény jobb egyezést ad, azaz kisebb minimumértékkel rendelkezik, mint a „klasszikus”,  $y$  irányú eltérésnégyzetek összege.

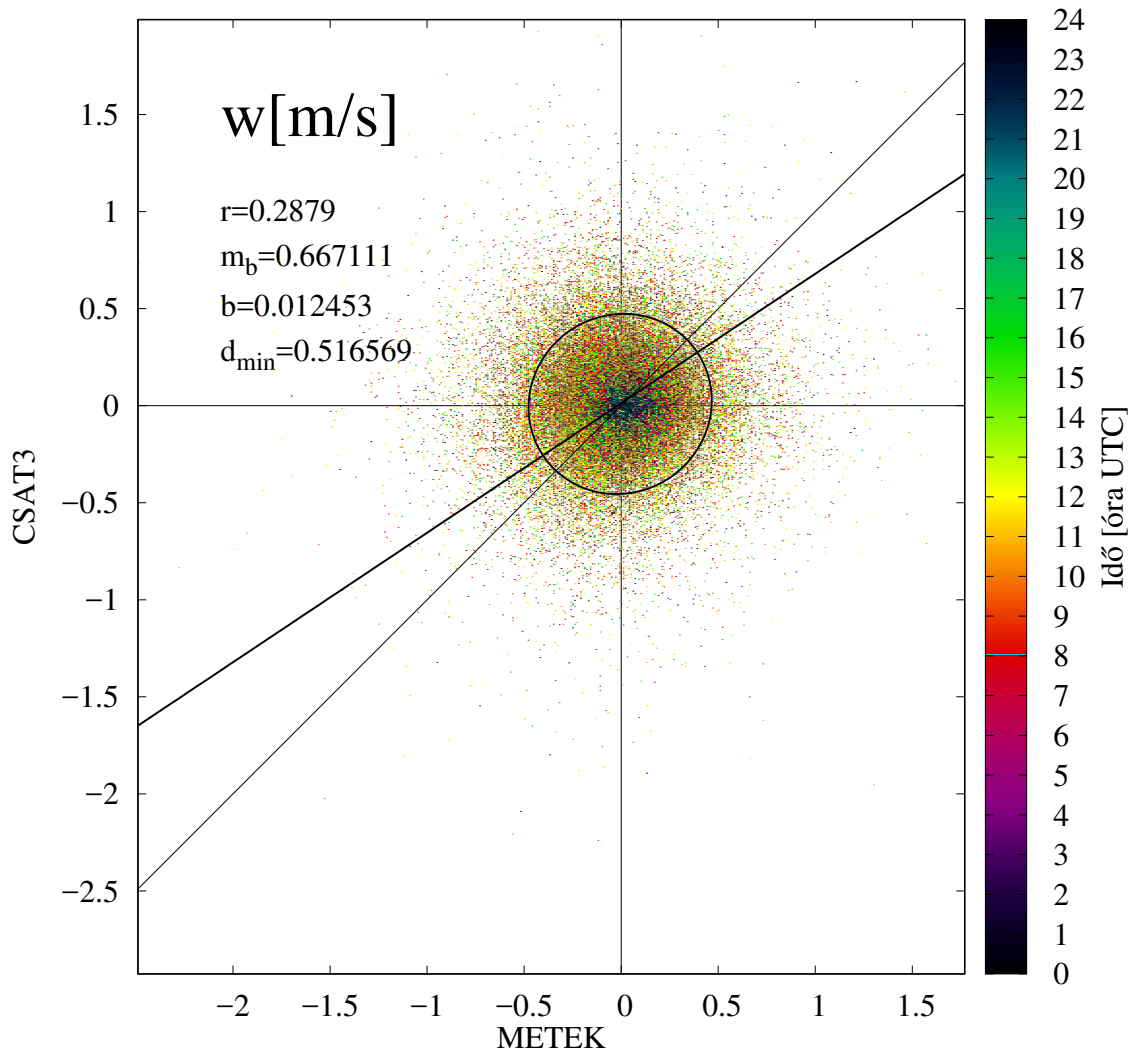


3.3. ábra: Az  $u$  szélesség-komponens nyers nagyfrekvenciás adatainak szórásdiagramja.



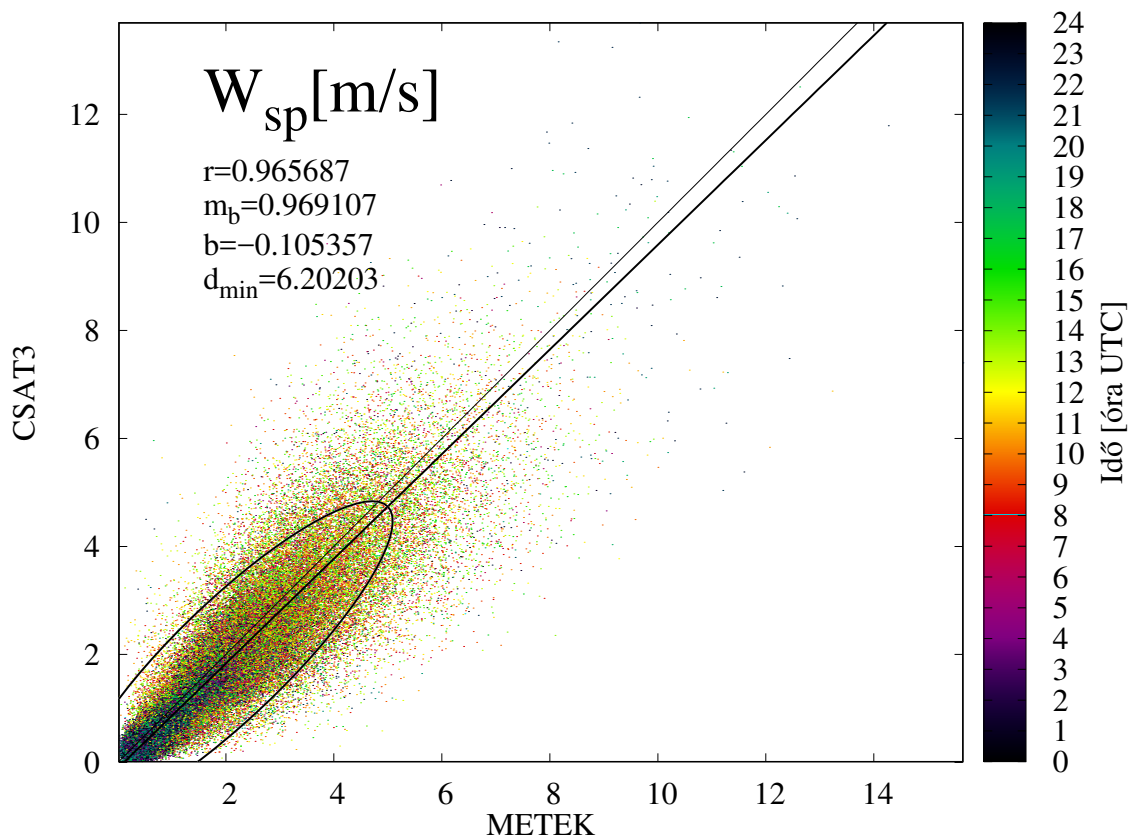
3.4. ábra: A  $v$  szélesség-komponens nyers nagyfrekvenciás adatainak szórásdiagramja.

Az  $u$  szélkomponens (3.3. ábra) esetében a CSAT3 szisztematikusan alacsonyabb értéket mér (abszolút értékben), mint a METEK ( $m_b < r^2$ , vagyis a második feltétel sérül). A  $v$  szélkomponens esetében jó egyezést kaptunk (3.4. ábra).



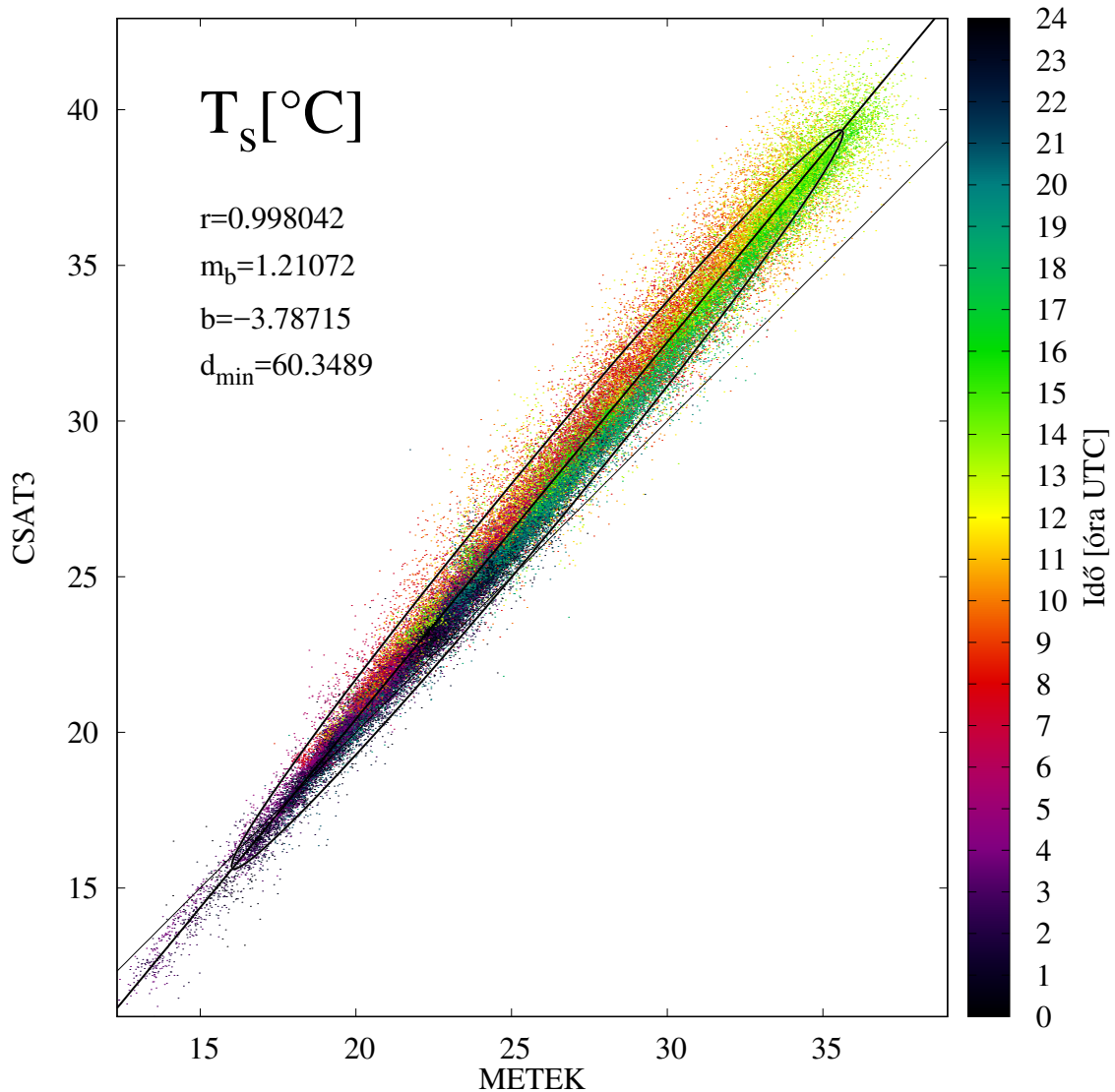
**3.5. ábra:** A  $w$  szélesség-komponens nyers nagyfrekvenciás adatainak szórásdiagramja.

A vertikális áramlást okozó turbulens jelenségek energiasűrűsége jelentős részben a 15 m alatti karakterisztikus mérettartományban található (lásd 1.2. ábra). Az ilyen örvények ezért a két mérőműszernél egymástól függetlenül alakítják a vertikális sebességet. Az időben átlagolt vertikális szélesség szinte mindig közel zérus a néhány másodpercnél hosszabb időtartamra (ezt mély-konvektív képződmény vagy front, kifutófront, porördöghöz kapcsolódó szél stb. tudja módosítani). A turbulencia miatti ingadozás amplitúdója így akár nagyságrendekkel nagyobb lehet, mint az átlag. Ezek következménye, hogy a vertikális szélesség esetében nincs lineáris kapcsolat a két műszer adatai között (3.5. ábra), a szórásellipszis excentricitása nagyon kicsi lesz. A színezés alapján látszik, hogy éjszaka általában nincs vertikális áramlás (középen a sötét folt jelzi).



**3.6. ábra:** A  $W_{sp} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$  szélesség nyers nagyfrekvenciás adatainak szórásiagramja.

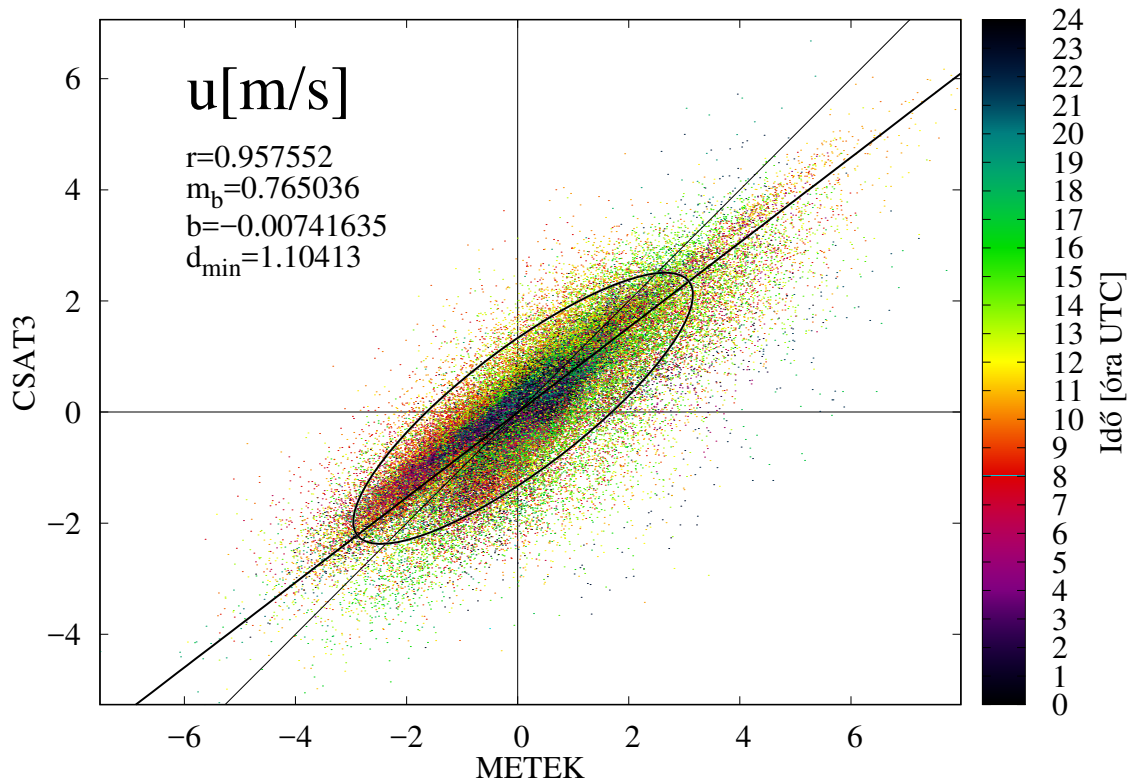
A  $W_{sp}$  szélesség értékek esetén a CSAT3 műszer mért alacsonyabb értékeket, bár az eltérés nem szignifikáns, hiszen a meredekség nem csökken az excentricitás alá (3.6. ábra).



**3.7. ábra:** A  $T_s$  szónikus hőmérséklet nyers nagyfrekvenciás adatainak szórásdiagramja.

A szónikus hőmérséklet esetében (3.7. ábra) a napi menet amplitúdója nagyságrendekkel nagyobb, mint a turbulencia által okozott ingadozásoké, ezért ebben az esetben erős összefüggés tapasztalható, az ellipszis igen vékony, a korreláció 99,8%. Ugyanakkor szembeűnőek a CSAT3 magasabb mért értékei, ami a kisebb magasság következménye. A nagytengely  $18^\circ\text{C}$  körül metszi az  $y = x$  egyenest. Ennél alacsonyabb értékek a hajnali órákban fordultak elő, amikor az inverzió miatt a CSAT3 szenzor kisebb értékeket mért a METEK-hez képest. Napi menet látszik, miszerint délelőtt a CSAT3 magasabb értékeket mér (narancs), majd délután a két műszer közötti különbség lecsökken.

**Egy perces nyers átlagok** Az awk scripttel számolt egy perces nyers átlagok összevethetők egymással, és a CR23x gyűjtővel rögzített referenciaadatokkal is. A két műszer adataiból számolt nyers perces átlagok összehasonlítását ugyanolyan típusú ábrákkal szemléltetjük, mint előbb (3.8.–3.12. ábrák). A perces átlagolásnak köszönhetően a turbulencia hatása némileg csökken, a percesnél kisebb időskálájú jelenségek kiátlagolódnak. Emiatt erősebb lineáris összefüggést várhatunk a két műszer adatai között.

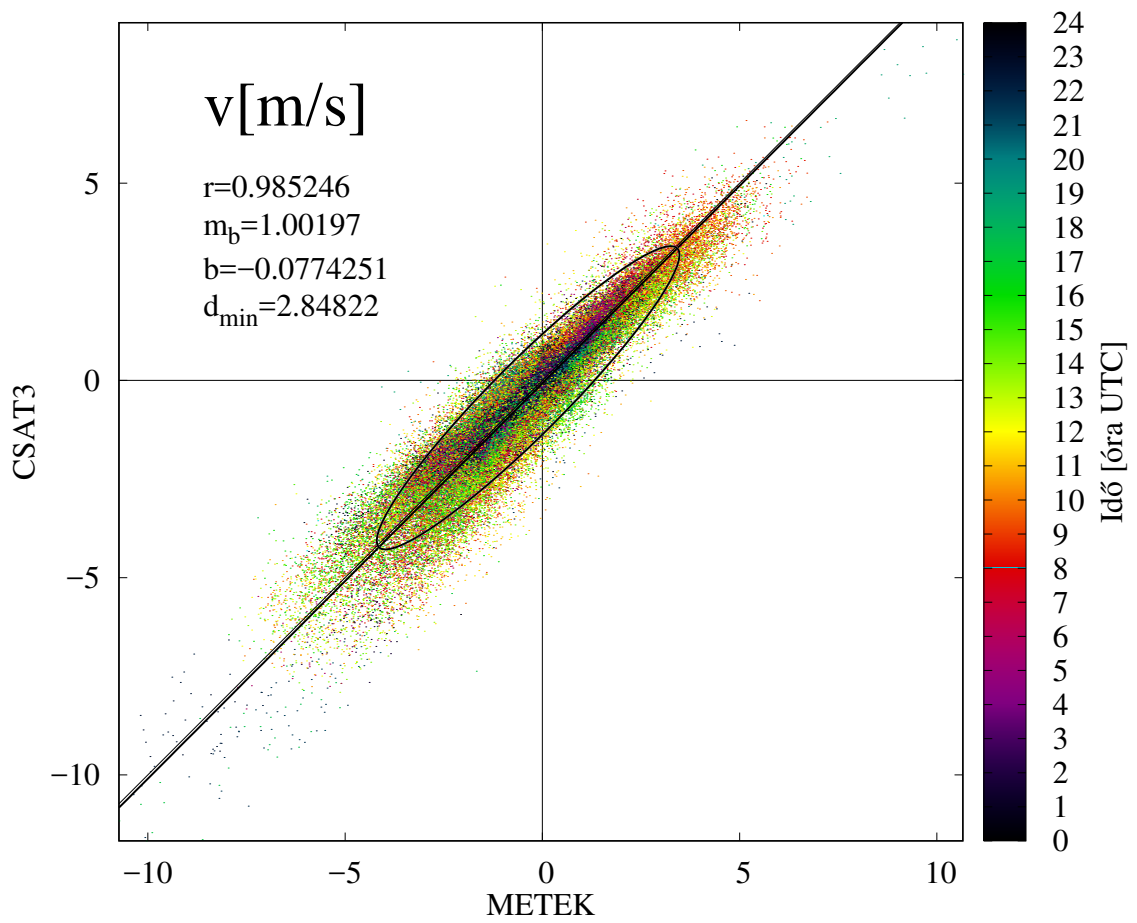


**3.8. ábra:** Az  $u$  szélkomponens nagyfrekvenciás adatokból számolt nyers egy perces átlagainak szórásdiagramja.

Az  $u$  szélkomponens esetén (3.8. ábra) a korreláció és a nagytengely meredeksége is erősebb kapcsolatot mutat, mint a nyers adatok esetében. A kistengely-irányú szórási aránya a nagytengely-irányúhoz képest 18%-kal csökkent. Más változás azonban nem történt. A második feltétel itt sem teljesül.

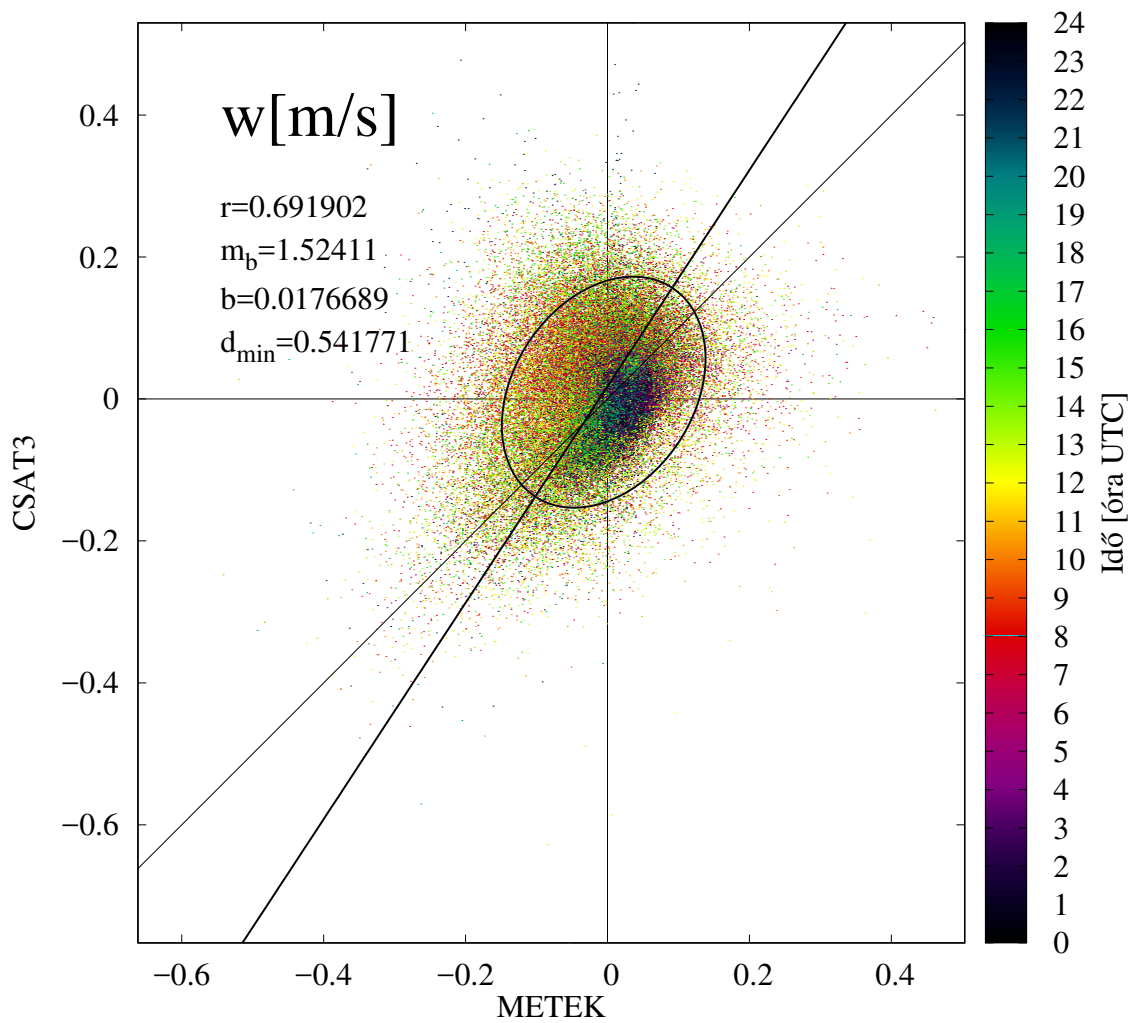
A  $v$  szélkomponens esetén (3.9. ábra) hasonlóan jó egyezést kaptunk, mint a nagyfrekvenciás adatokra. A szórásarány csökkenése itt 27% volt.

A vertikális szélesség (3.10. ábra) szórásellipszisének excentricitása jelentősen nőtt, bár a kritériumot még nem érte el. A szórásellipszis nagytengelye alapján nagy vertikális sebességekre az alacsonyabban lévő CSAT3 műszer átlagosan nagyobb sebességeket mér. A pontok felhője alapján viszont kis sebességekre a METEK mér többet. A nagytengelytől „balra” esik az adatok 60%-a. A pontok eloszlása tehát ferde. Éjszaka, amikor alacsonyabb értékek fordulnak elő gyakran, a METEK műszer



**3.9. ábra:** A  $v$  szélkomponens nagyfrekvenciás adatokból számolt nyers egy perces átlagainak szórásdiagramja.

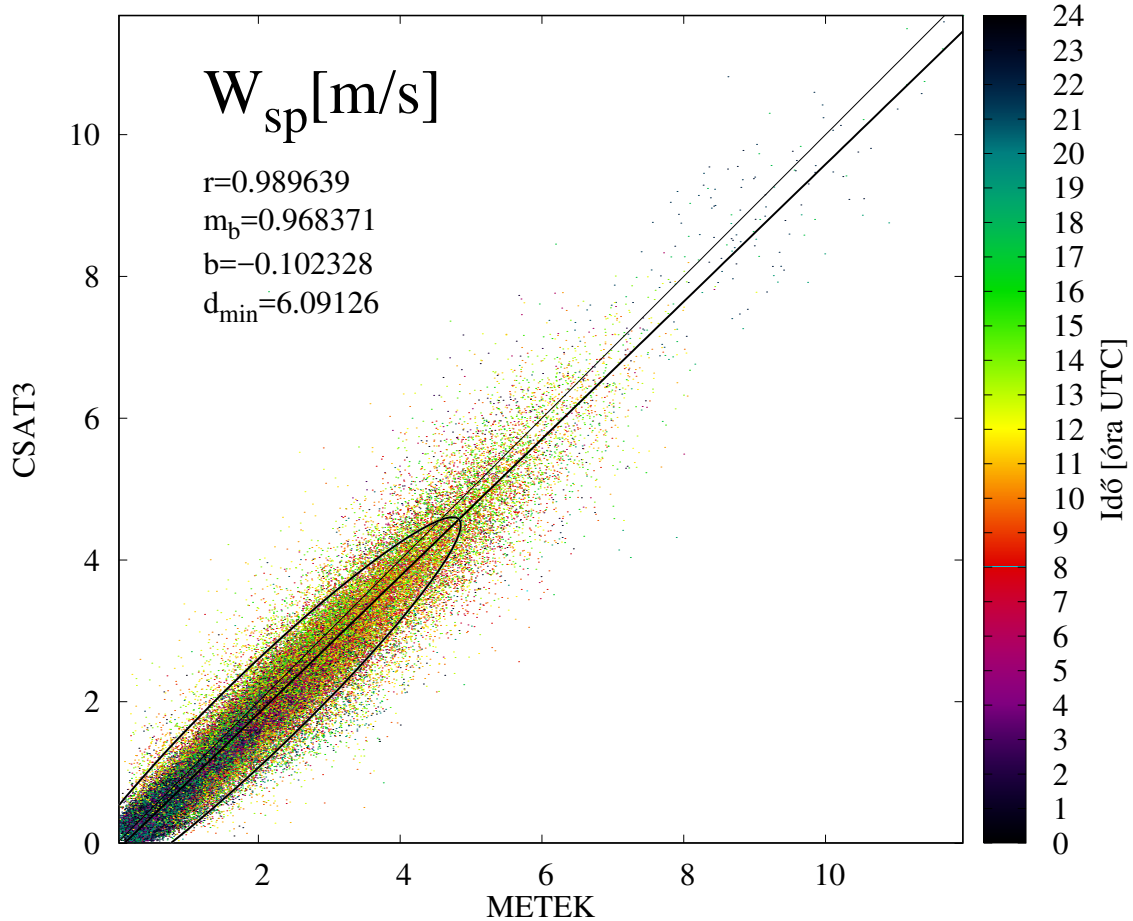




**3.10. ábra:** A  $w$  szélkomponens nagyfrekvenciás adatokból számolt nyers egy perces átlagainak szórásdiagramja.

általában pozitív vertikális sebességet mér, míg a CSAT3 által mért értékek inkább nulla körül szórnak.

**A perces szelek időbeli menete együtt megy. Ezt meg kell mutatni.**  
MinsDiff.eps, Mins.eps, plot10HzDiff.pl, plot10Hz.pl

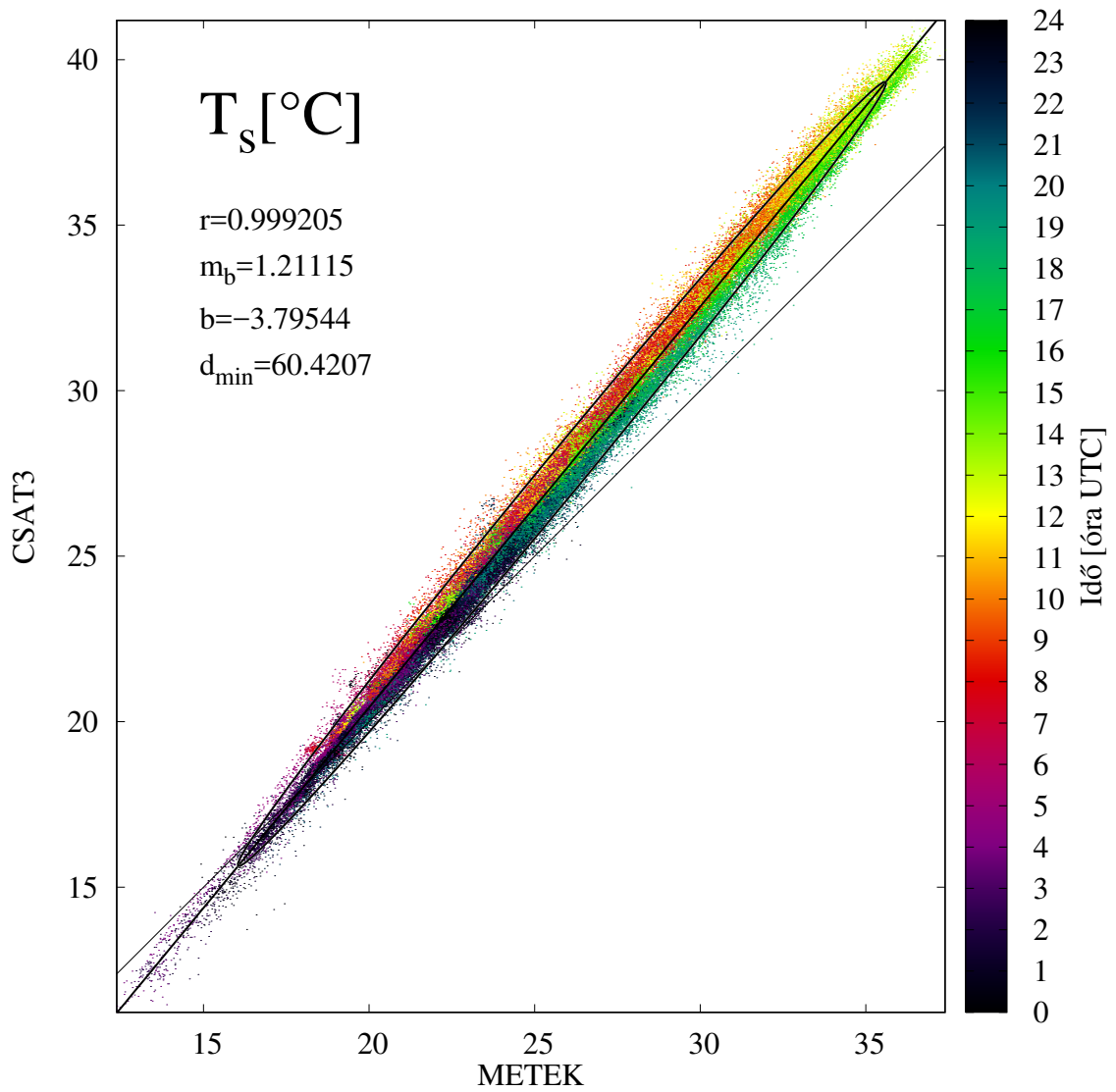


**3.11. ábra:** A  $W_{sp} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$  szélesebesség nagyfrekvenciás adatokból számolt nyers egy perces átlagainak szórásdiagramja.

A  $W_{sp}$  szélesebesség esetén (3.11. ábra) a szórásarány csaknem a felére, 44,5%-kal csökkent. E csökkenés azt okozta, hogy az egyébként jelentősen nem változó meredekség  $r^2$  alá került, az átlagolás kiemelte, hogy a CSAT3 műszer kissé alacsonyabb vertikális sebességeket mér.

A szónikus hőmérsékletek (3.12. ábra) esetében a szórásarány csökkenése 33,7%. A nagytengelyre merőleges irányú szórás így 2 °C alá csökkent.

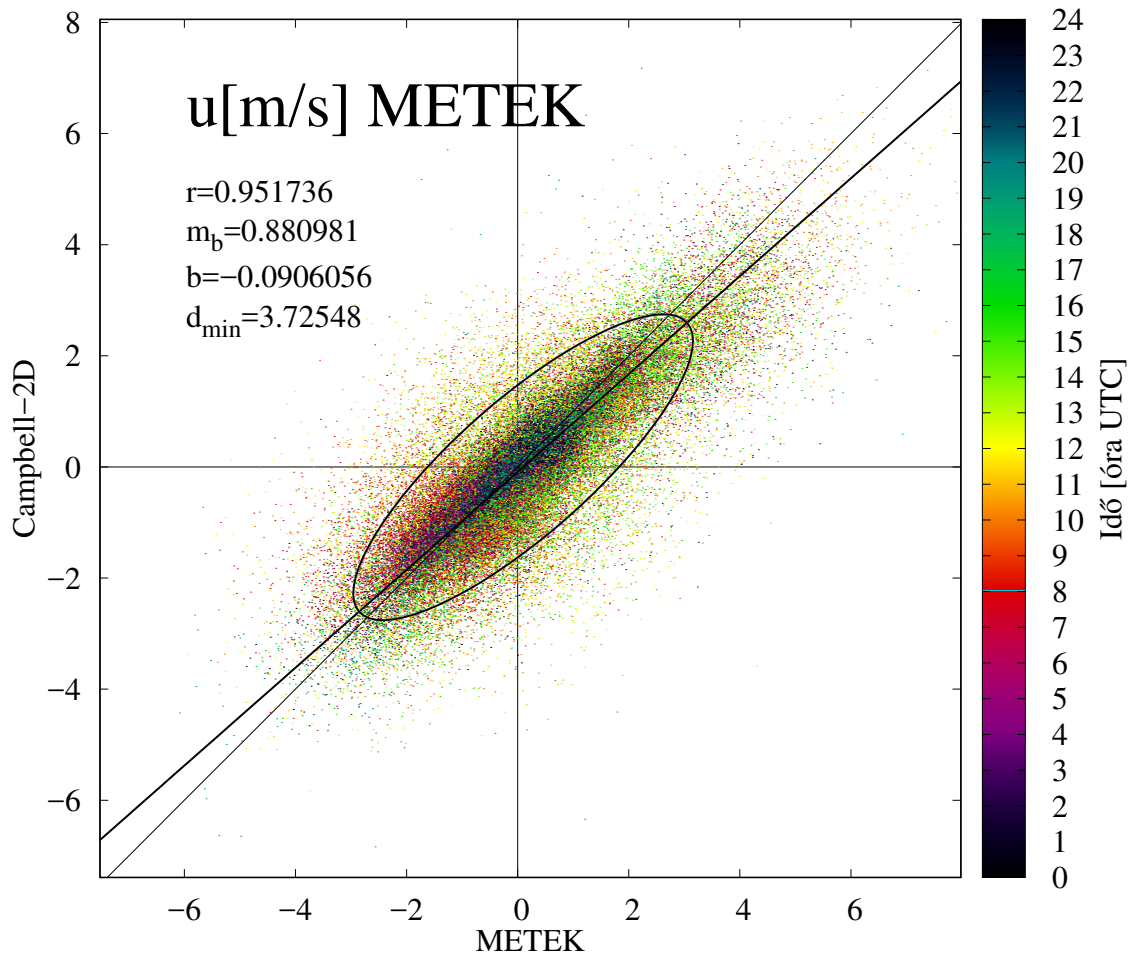
A perces átlagolás az 1 perc alatti időskálájú jelenségek hatását kisimítja, ennek köszönhetően jobb egyezést kaptunk a két átlagolt adatsor között, mint a nagyfrekvenciások között. Ezt a szórásarányok csökkenése számszerűen is megmutatta. Ugyanakkor a perces átlagolt és a nagyfrekvenciás nyers adatsor más tulajdonságaiban megegyezik. Kivétel a vertikális szélkomponens, mely átlagolt értékeinek eloszlása ferde a kis sebességek esetében. Ennek oka lehet a műszerek kialakításá-



**3.12. ábra:** Az  $T_s$  szónikus hőmérséklet nagyfrekvenciás adatokból számolt nyers egy perces átlagainak szórásdiagramja.

ban jelentkező különbség, pl. a METEK szenzor esetében külön szenzorfej-korrekciónak (Wieser *et al.*, 2001) végrehajtása szükséges, amit itt nem tettünk meg.

Összehasonlítottuk az adatokat a 2 m magasan lévő 2D szónikus anemométer perces adataival is (3.13.–3.20. ábrák). Utóbbi nem mért vertikális szélkomponenst. Az egyezés hasonlóan jónak adódott, mint a két nagyfrekvenciás műszer perces átlagának egymással való összehasonlításakor.

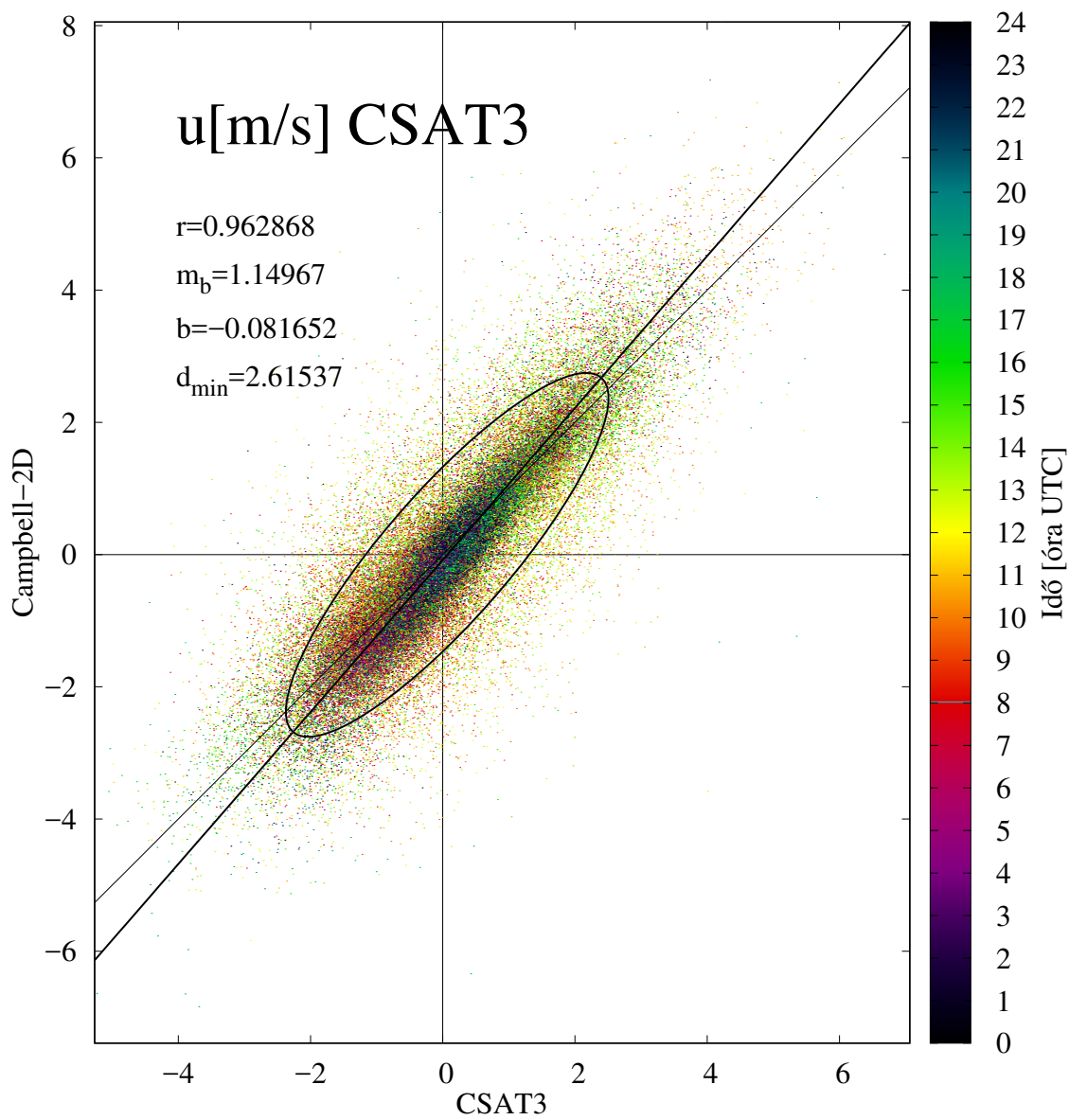


**3.13. ábra:** A METEK adatokból számolt, és a 2D szónikus anemométer által mért perces  $u$  szélkomponens szórásdiagramja.

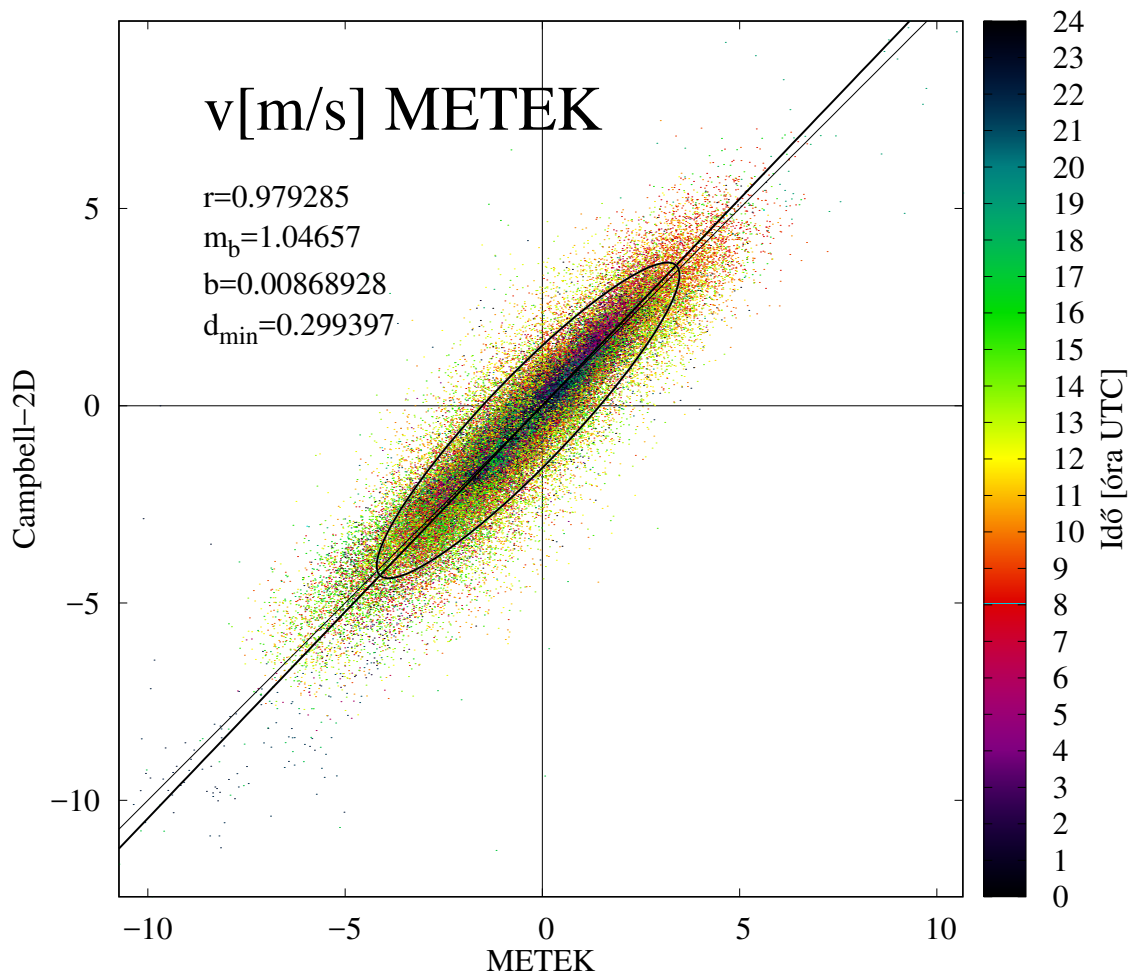
Észrevehető, hogy az alacsonyabban lévő CSAT3 alacsonyabb sebességkomponenst mért (1 alatti meredekségek, melyek sértik az  $r^2 < m_b$  feltételt, 3.14 és 3.16 ábrák), míg a magasabban lévő METEK magasabbakat (1 feletti meredekségek, melyek sértik az  $\frac{1}{r^2} > m_b$  feltételt, 3.13 és 3.15 ábrák).

A  $W_{sp}$  esetében is kimutatható ugyanez, ám ott a feltételek nem sérülnek, tehát nem szignifikáns a jelenség (3.17 és 3.18 ábrák).

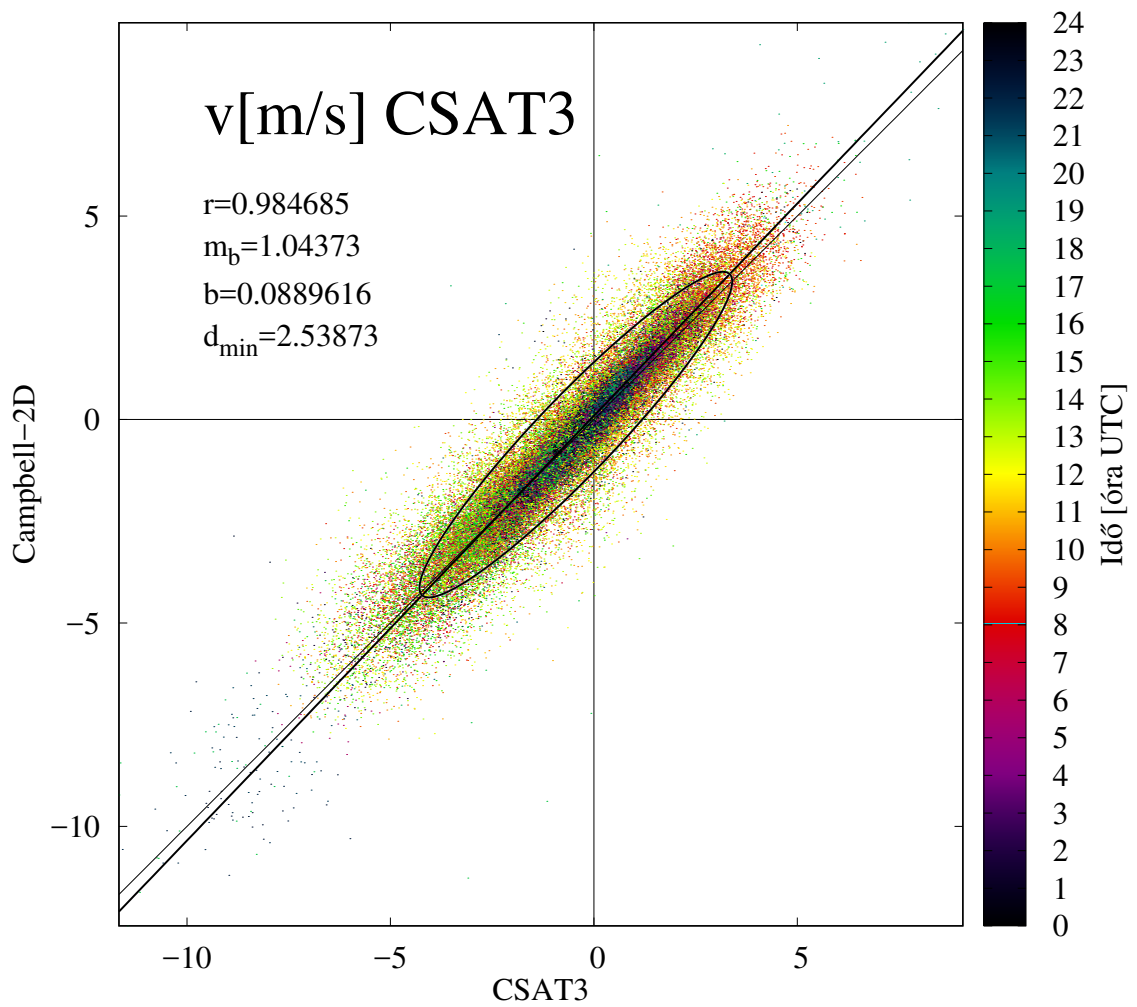
A szónikus hőmérsékletek esetében megállapítható, hogy a 2D szónikus anemométer szignifikánsan alacsonyabb hőmérsékleteket mért, mint a két nagyfrekvenciás műszer. A METEK-kel a magas hőmérsékleti tartományban mért körülbelül azo-



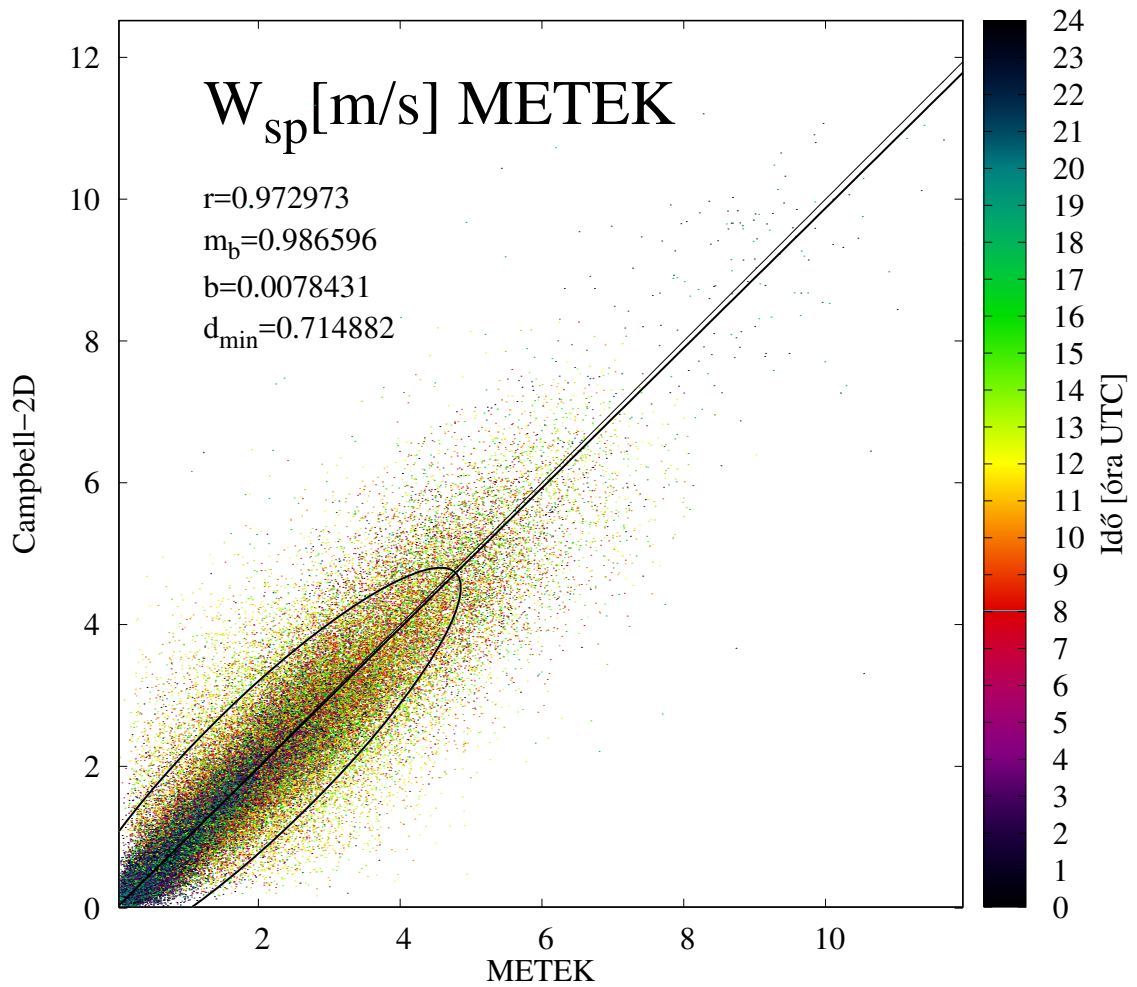
**3.14. ábra:** A CSAT3 adatokból számolt, és a 2D szónikus anemométer által mért perces  $u$  szélkomponens szórásdiagramja.



**3.15. ábra:** A METEK adatokból számolt, és a 2D szónikus anemométer által mért perces  $v$  szélkomponens szórásdiagramja.

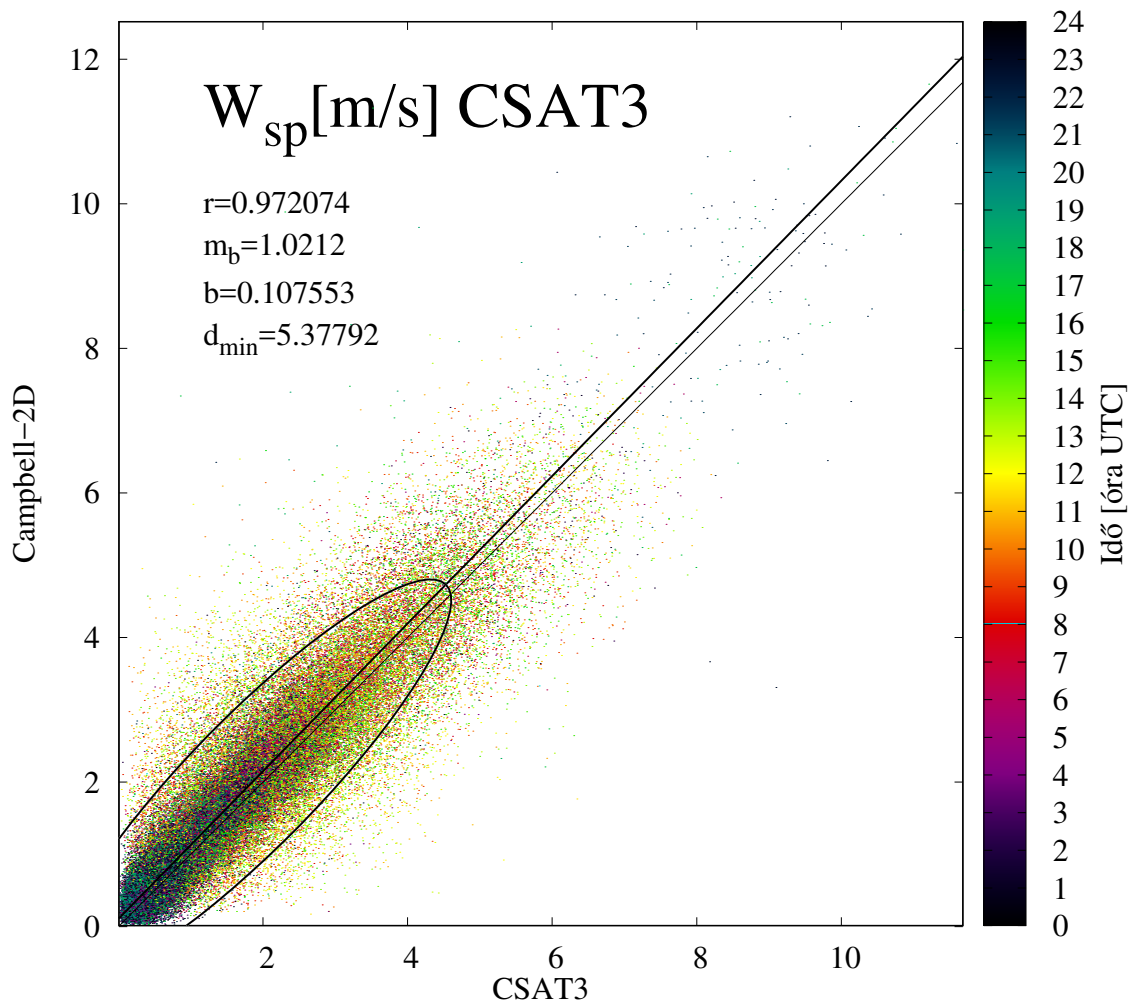


**3.16. ábra:** A CSAT3 adatokból számolt, és a 2D szónikus anemométer által mért perces  $v$  szélkomponens szórásdiagramja.

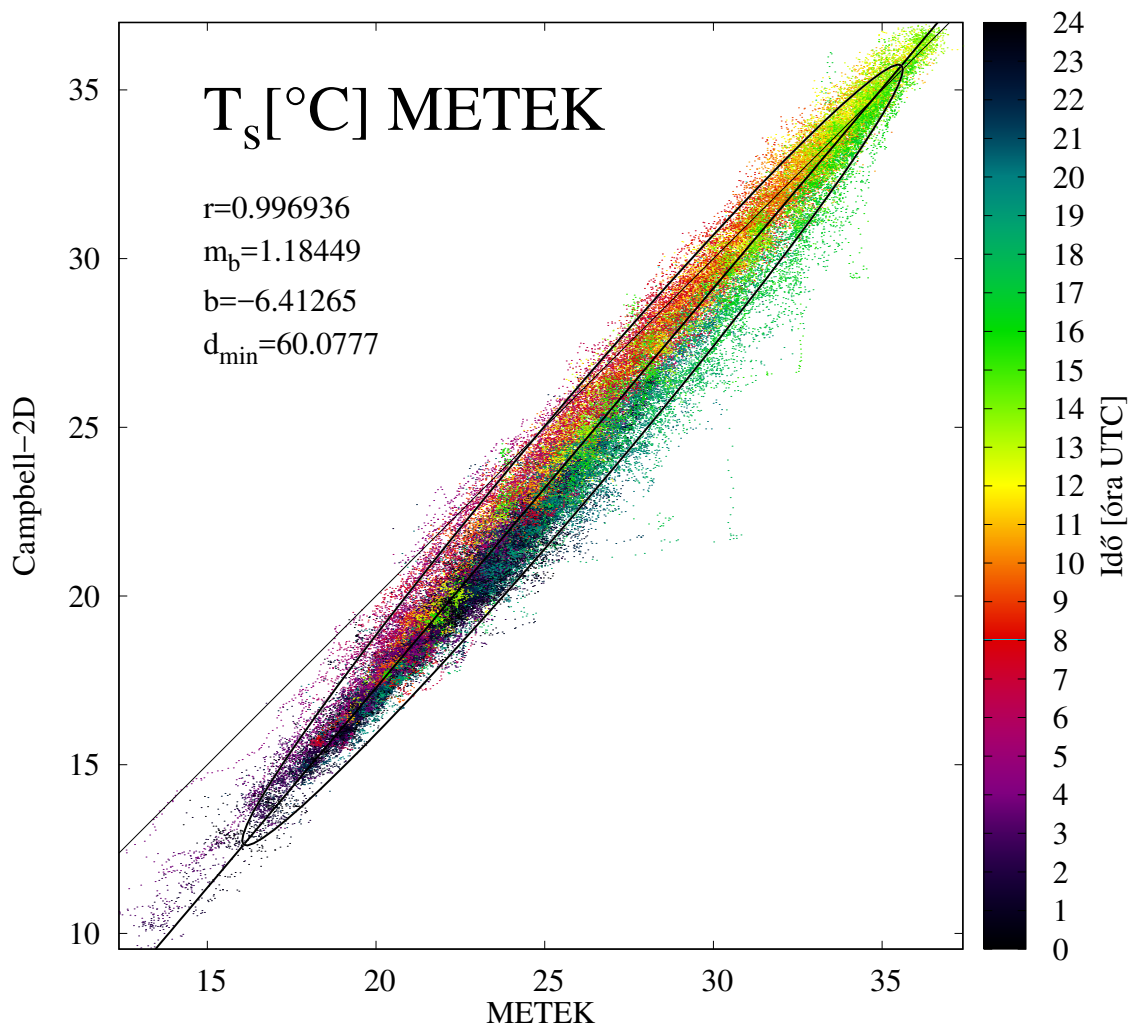


**3.17. ábra:** A METEK adatokból számolt, és a 2D szónikus anemométer által mért perces  $W_{sp} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$  szélesség szórásdiagramja.

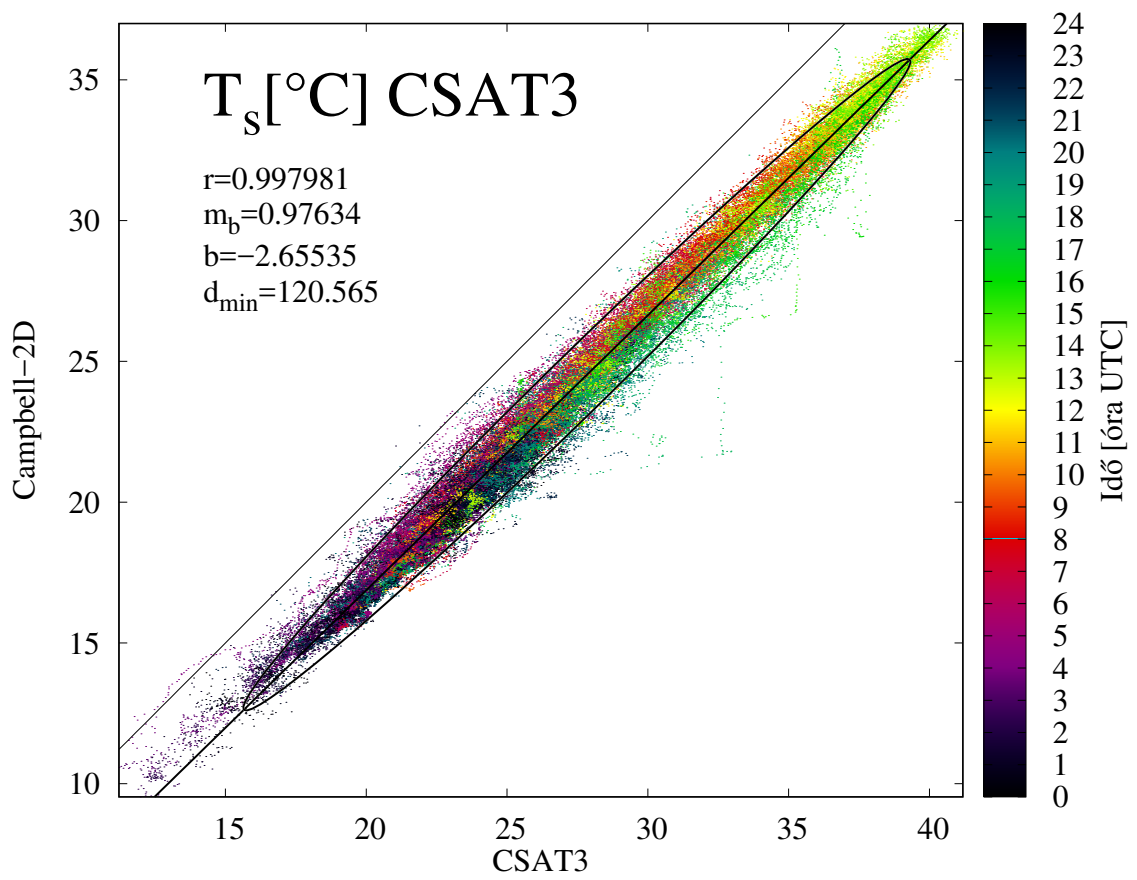




**3.18. ábra:** A CSAT3 adatokból számolt, és a 2D szónikus anemométer által mért perces  $W_{sp} = \sqrt{u^2 + v^2 + w^2}$  szélesség szórásdiagramja.



**3.19. ábra:** A METEK adatokból számolt, és a 2D szónikus anemométer által mért perces  $T_s$  szónikus hőmérséklet szórásdiagramja.



**3.20. ábra:** A CSAT3 adatokból számolt, és a 2D szónikus anemométer által mért perces  $T_s$  szónikus hőmérséklet szórásdiagramja.

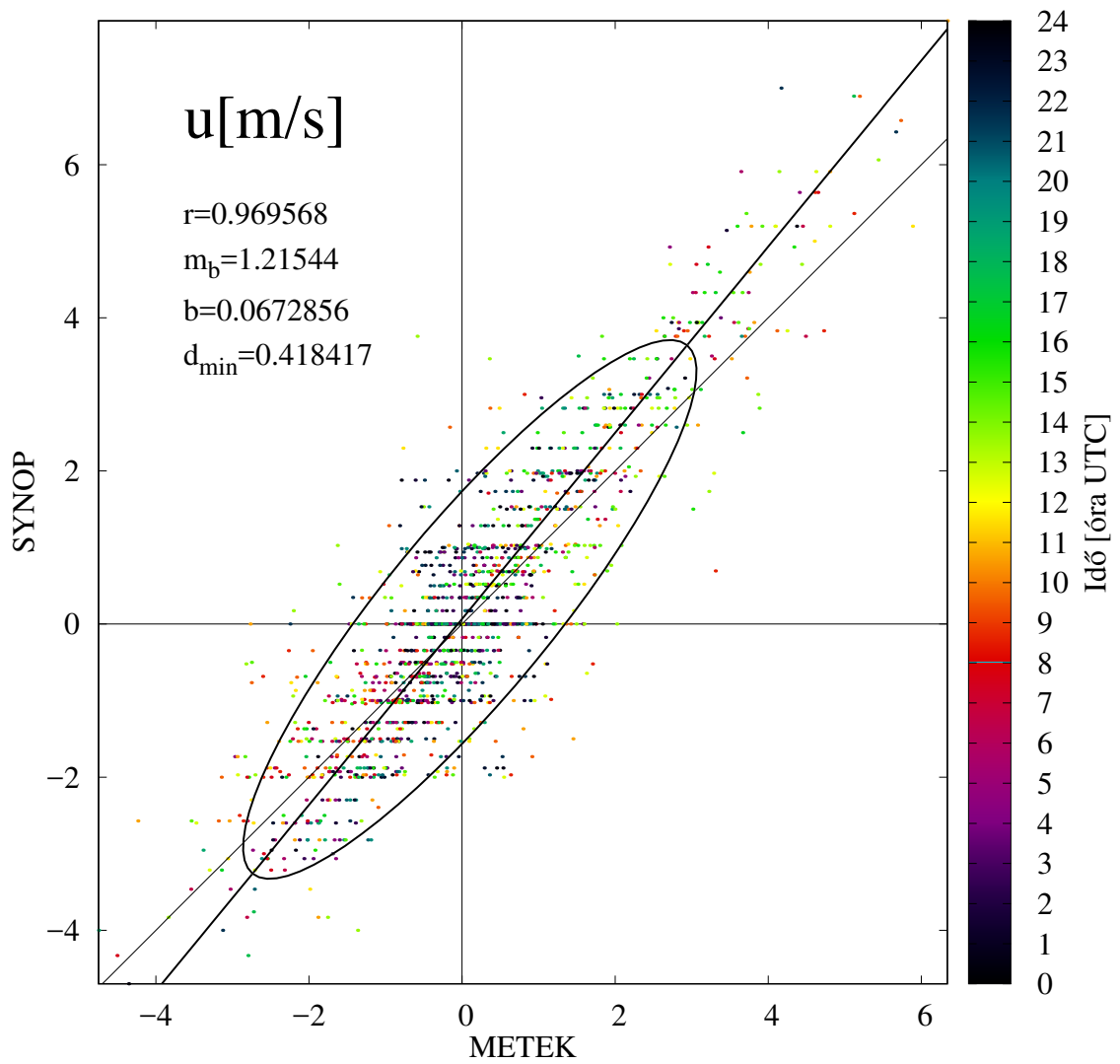
nos értékeket (a szórásellipszis nagytengelye  $34,8^\circ\text{C}$ -nál metszi az  $y = x$  egyenest), alacsony hőmérsékleteknél azonban akár  $5^\circ\text{C}$  is lehet a különbség a METEK javára (3.19. ábra). A CSAT3-hoz képest a 2D szónikus anemométer kb.  $3^\circ\text{C}$ -kal mért alacsonyabb hőmérsékleteket a teljes tartományban (3.20. ábra). Feltűnő még, hogy a szórásellipszis excentricitása sincs olyan közel egyhez, mint a két nagyfrekvenciás egymáshoz történt összehasonlításánál. Ennek oka a 2D szónikus hőmérséklet mérésének valamilyen hibája lehet<sup>19</sup>.

**Összevetés SYNOP adatokkal** Következő lépés a két nagyfrekvenciás szónikus anemométer, és az OMSZ Szegedi Magaslégköri Obszervatórium SYNOP távirataiból nyert adatokat összehasonlítása. Az észlelési gyakorlathoz alkalmazkodva ezt az öt perces átlagolt adatokkal tettük oly módon, hogy a minden óra 40 perckor történő észleléseknek az öt perces adatsorunk adott óra 35 perces adatait feleltettük meg. E megfeleltetés oka, hogy a mi adatainkhoz tartozó időpontok az átlagolási időszak kezdetét jelentik, míg a hivatalos adatok az észlelést megelőző 5 percre vonatkoznak a SYNOP esetében. Fontos megjegyezni, hogy csak a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) számolt 5 perces átlagokat, melyek korrigálatlanok. Az összevetéshez azonban ez is elég, mivel az előzőekben beláttuk, hogy a két műszer adatai – eltekintve azoktól az eltérésektől, melyek a magasságkülönbségükkel magyarázható – egymáshoz jól illeszkednek. Az eredményeket a 3.21.–3.28. ábrák szemléltetik.

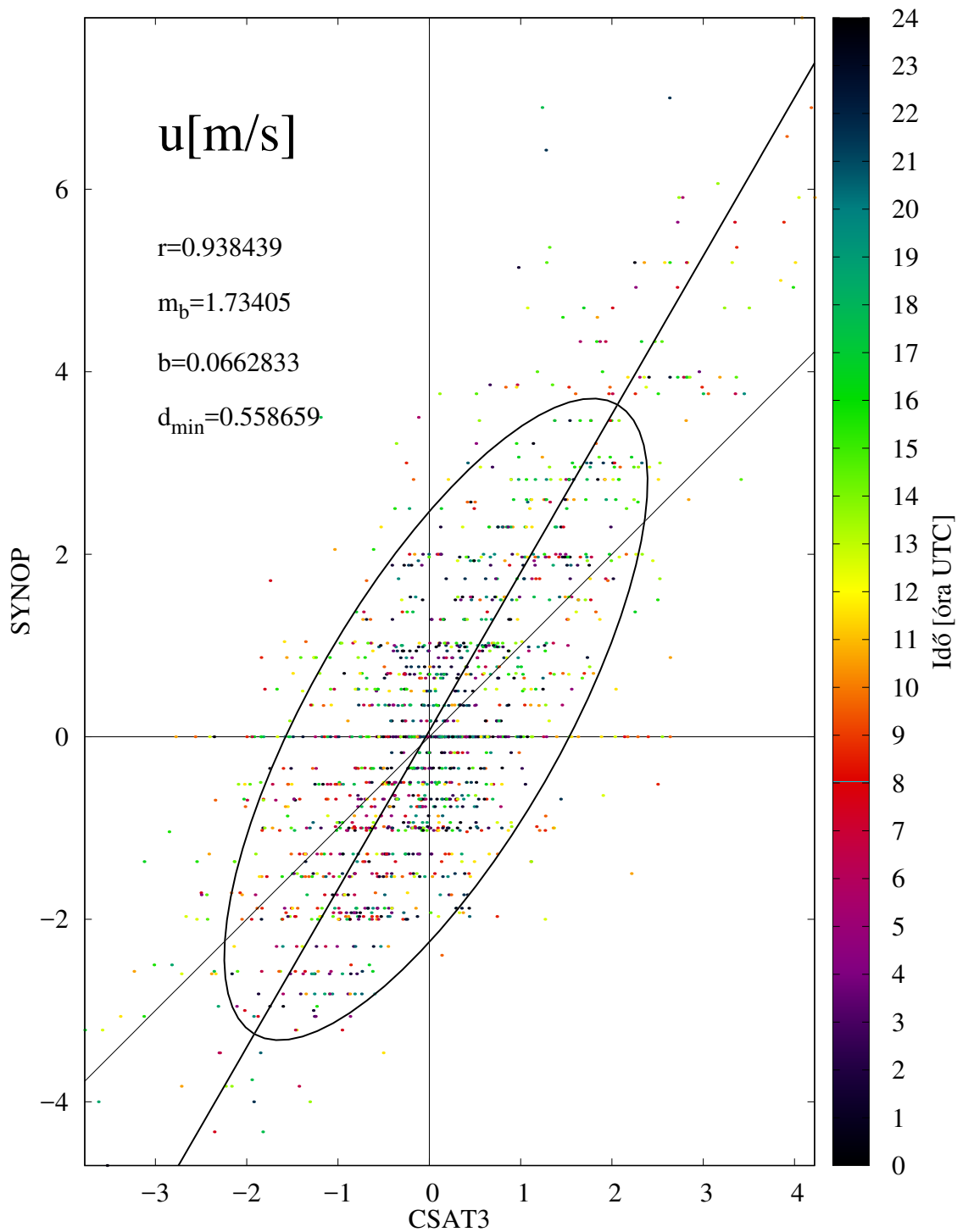
A szél mérését a szinoptikus állomáson 10 m magasan végzik, a sebességet egész  $\frac{\text{m}}{\text{s}}$ , a szélirányét  $10^\circ$  pontossággal. Ebből  $\Delta W_{sp} = 0,5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ , valamint  $\Delta\alpha \approx 0,1$ . A szélkomponensek hibájának felső becslését adja a  $\Delta u = \sqrt{(\Delta W_{sp})^2 + (W_{sp}\Delta\alpha)^2}$  összefüggés, mely  $10 \frac{\text{m}}{\text{s}}$  szélesség esetén  $1 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ . A kapott  $d_{min}$  értékek ennél kisebbek, tehát az adatok tartományának nagyobb részén nincs szignifikáns eltérés (illetve az eltéréseket nagyrészt magyarázza a mérési bizonytalanság), hosszú idő átlagában hibahatáron belül egyezik a két adatsor (3.21.–3.24. ábrák). Az adatok közötti korreláció alapján pedig a két adatsor szinkronban lévőnek tekinthető ( $r > 0,9$ ). Mindez igaz annak ellenére, hogy a nagyfrekvenciás műszerek a Szegedi Magaslégköri Obszervatóriumtól kb. 1,8 km távolságra voltak.

A nagytengely meredeksége mind a négy esetben jelentősebben eltér egytől, az extrém értékekre a SYNOP széladatokat abszolút értékben nagyobbak. Ez a szélesség adatokon is látható (3.25 és 3.26 ábrák), bár ott a meredekségek kisebbek. A CSAT3 esetében a meredekség mindkét szélkomponens, így a szélesség esetében is nagyobb, mint a METEK esetében. Az egynél nagyobb meredekségek azt jelen-

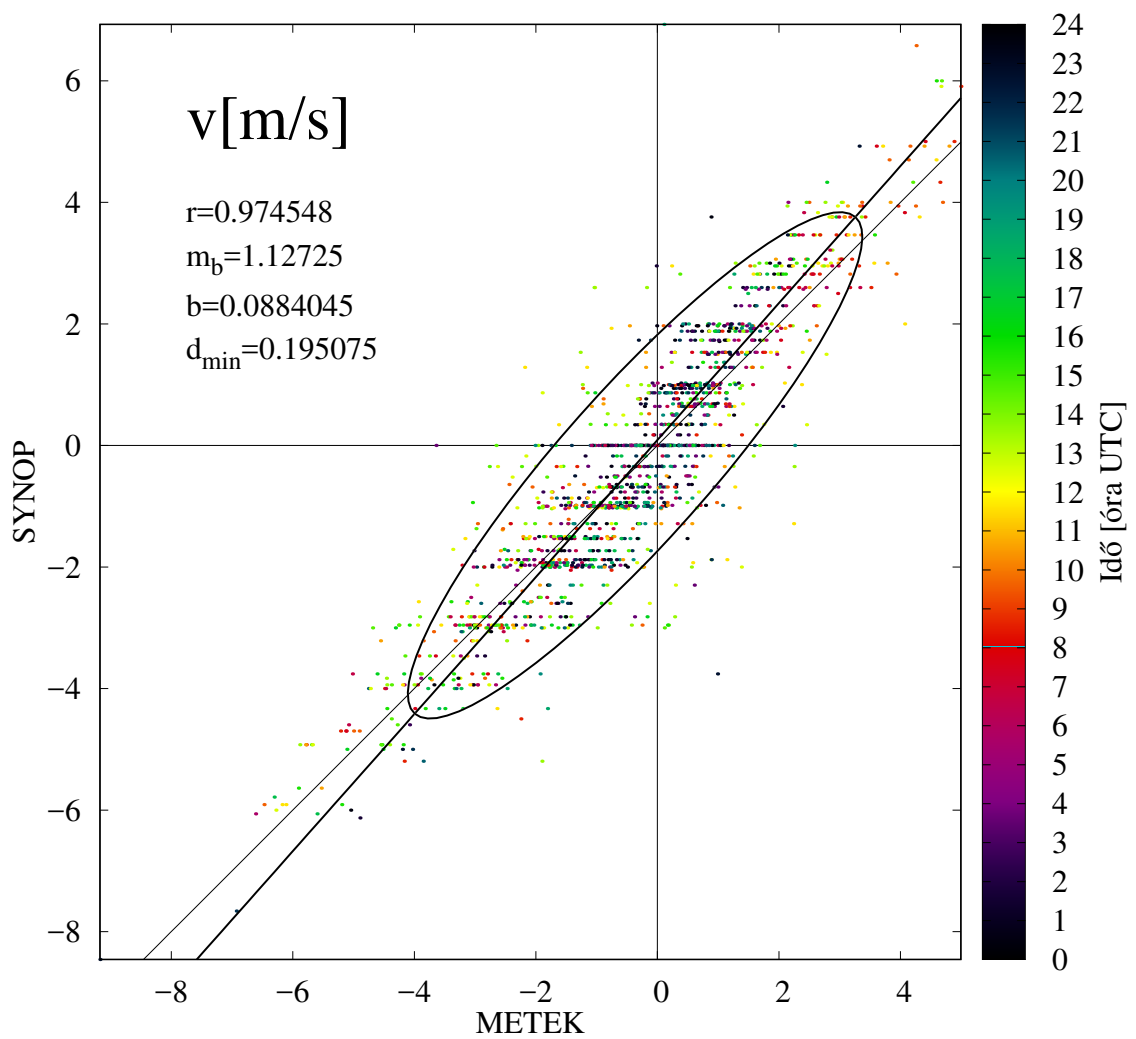
<sup>19</sup>Tordai Ágoston hallgatótársamtól érkezett személyes információ, a probléma vizsgálat alatt áll.



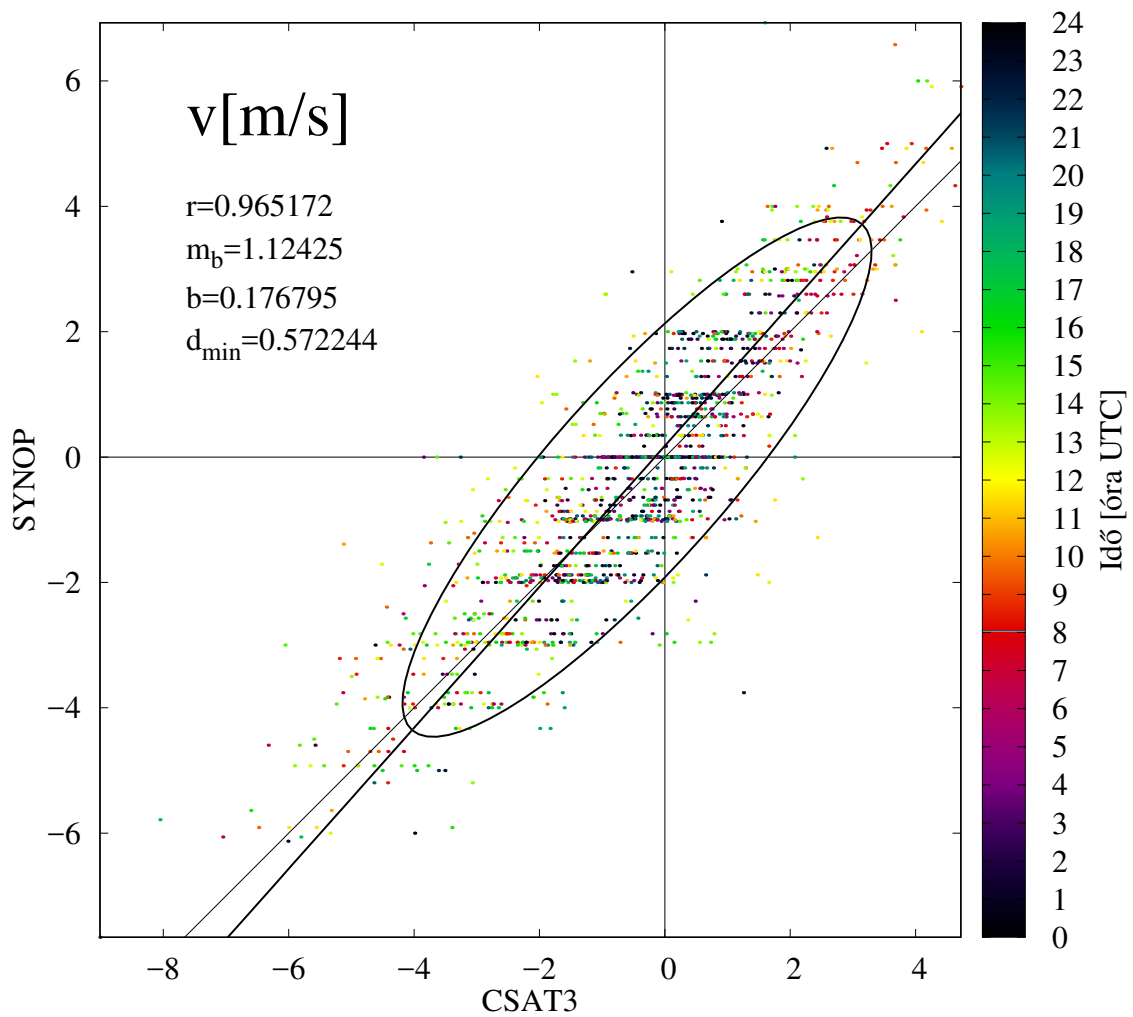
**3.21. ábra:** A METEK adataiból számolt 5 perces átlagolt, az OMSZ Szegedi Magaslégköri Observatórium által szolgáltatott SYNOP-táviratokból nyert  $u$  szélkomponens szórásdiagramja.



**3.22. ábra:** A CSAT3 adataiból számolt 5 perces átlagolt, az OMSZ Szegedi Magaslégköri Observatórium által szolgáltatott SYNOP-táviratokból nyert  $u$  szélkomponens szórásiagramja.

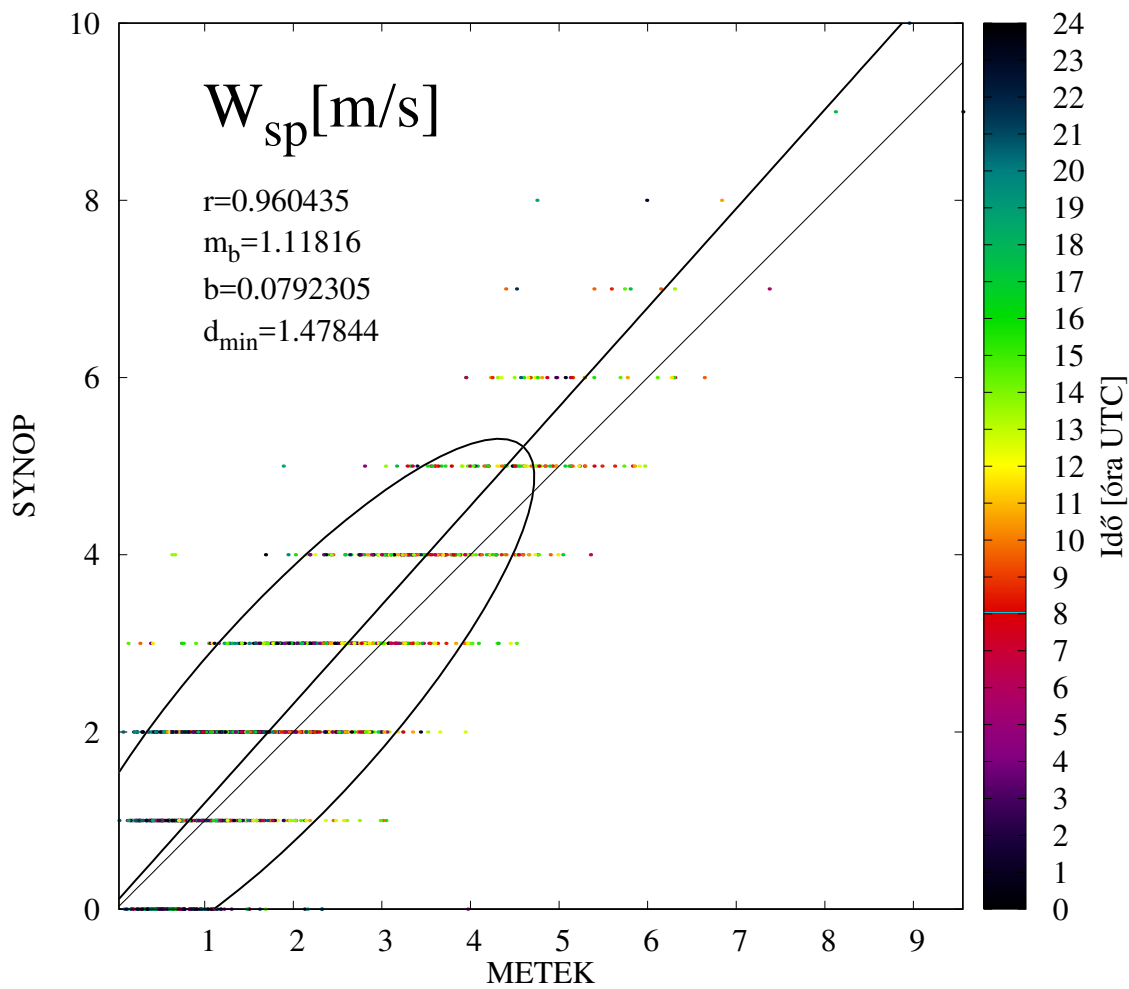


**3.23. ábra:** A METEK adataiból számolt 5perces átlagolt, és az OMSZ Szegedi Magaslégköri Obszervatórium által szolgáltatott SYNOP-táviratokból nyert  $v$  szélkomponens szórásdiagramja.

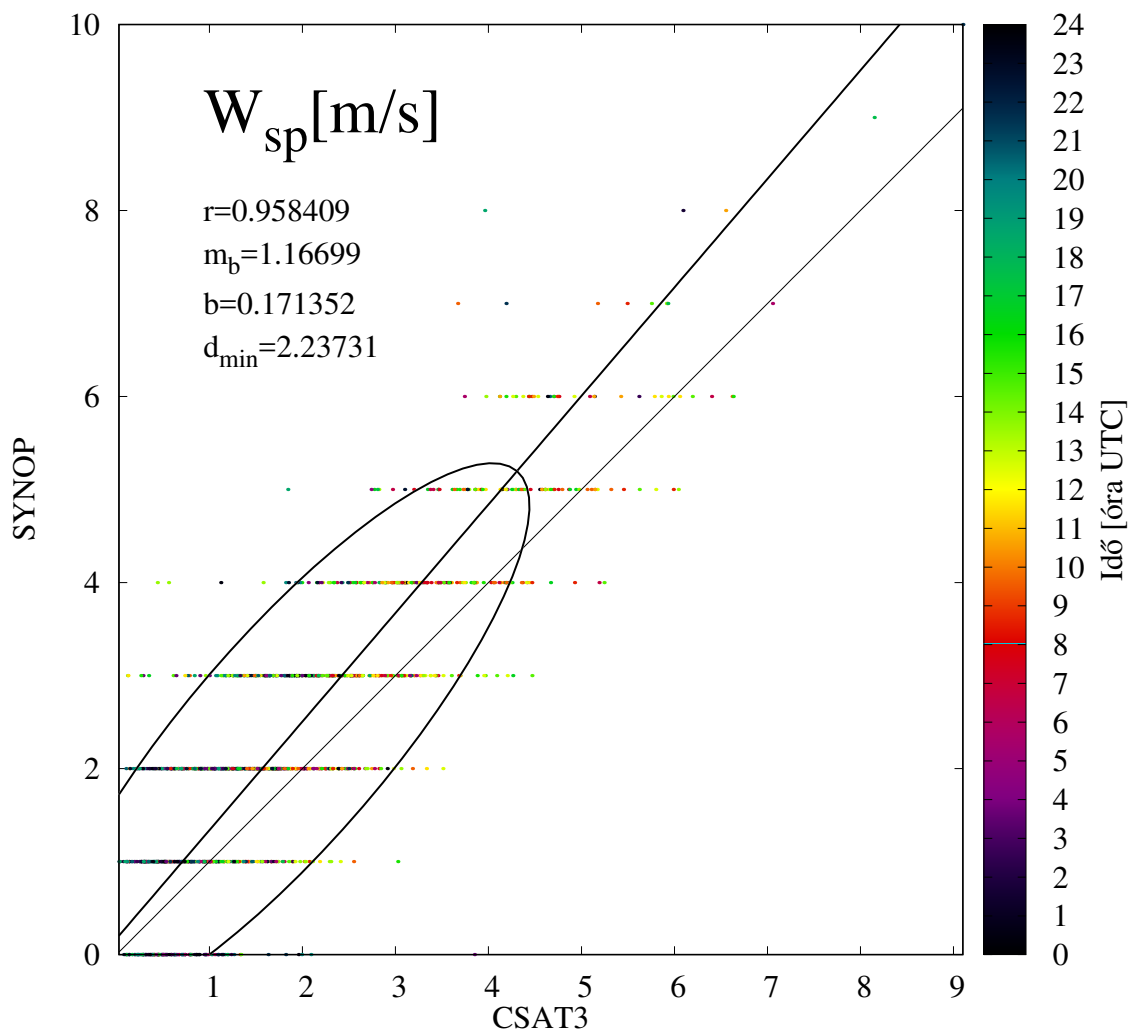


**3.24. ábra:** A CSAT3 adataiból számolt 5 perces átlagolt, és az OMSZ Szegedi Magaslégköri Observatórium által szolgáltatott SYNOP-táviratokból nyert  $v$  szélkomponens szórásdiagramja.



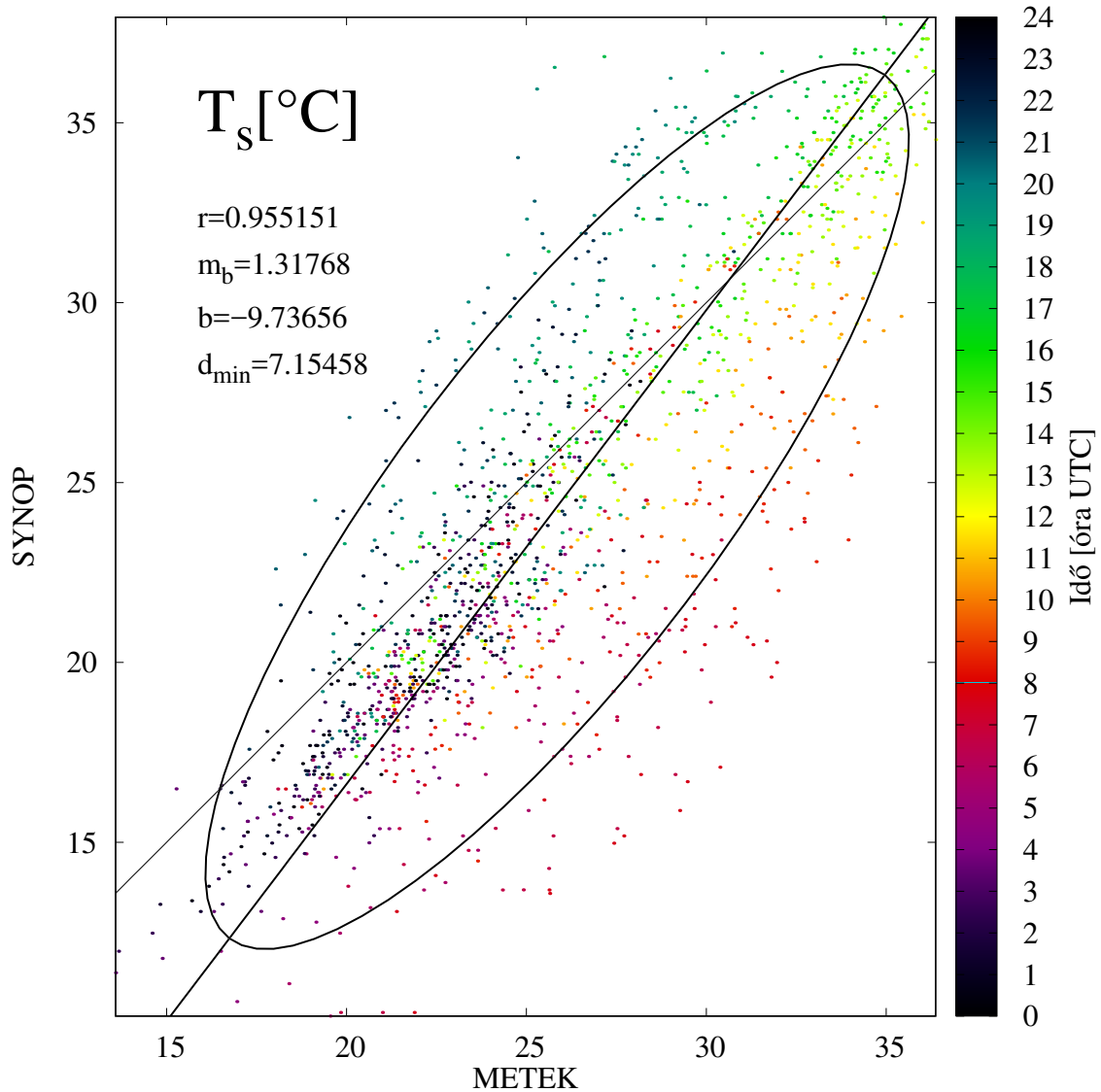


**3.25. ábra:** A CSAT3 adataiból számolt 5 perces átlagolt, és az OMSZ Szegedi Magaslégköri Observatórium által szolgáltatott SYNOP-táviratokból nyert  $W_{sp}$  szélkomponens szórásdiagramja.



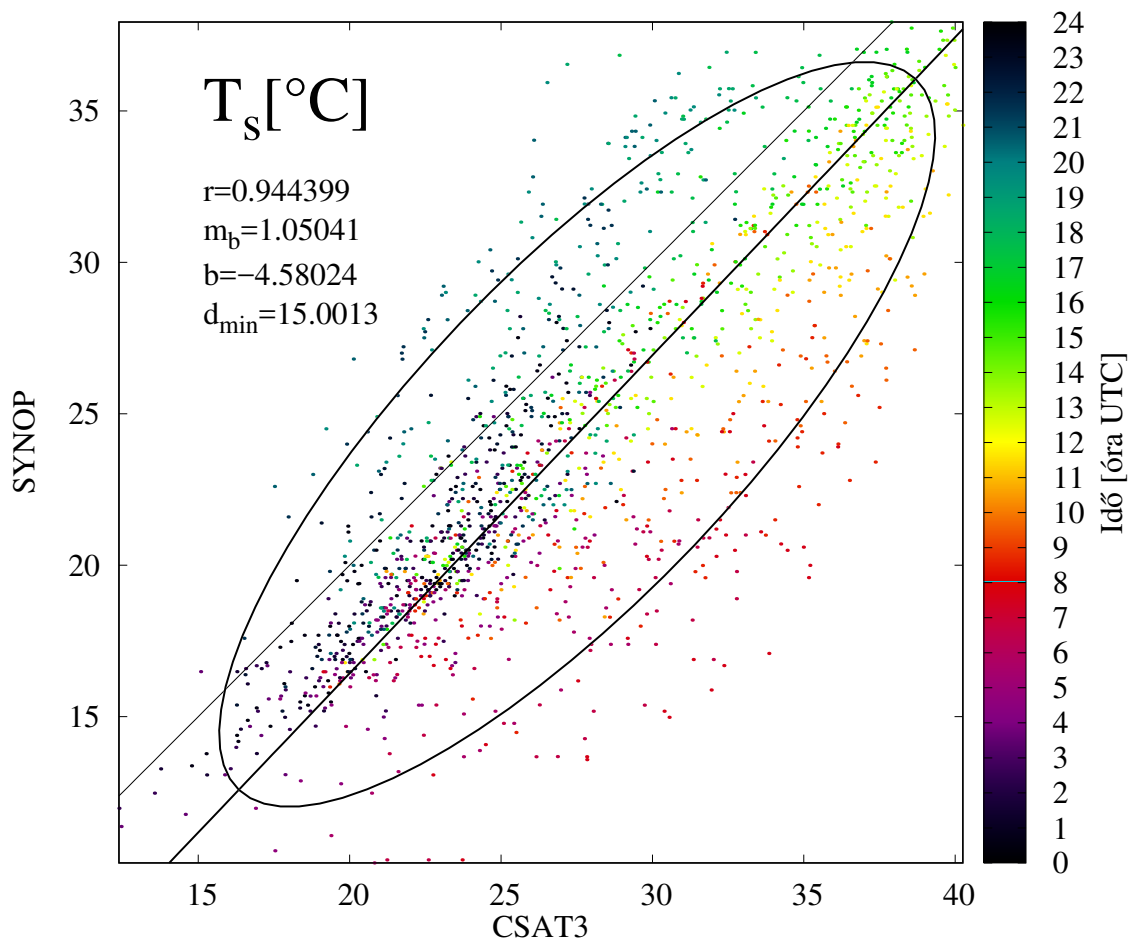
**3.26. ábra:** A CSAT3 adataiból számolt 5 perces átlagolt, és az OMSZ Szegedi Magaslégköri Observatórium által szolgáltatott SYNOP-táviratokból nyert  $W_{sp}$  szélkomponens szórásdiagramja.

tik, hogy a SYNOP széladatok nagyobbak, mely következménye az ottani szélmérő nagyobb magasságának.



**3.27. ábra:** A METEK adataiból számolt 5 perces átlagolt  $T_s$  szónikus hőmérséklet és az OMSZ Szegedi Magaslégköri Observatórium által szolgáltatott SYNOP-táviratokból nyert léghőmérséklet és harmatpont adatokból számolt virtuális hőmérséklet szórásdiagramja.

A hőmérsékletek esetén hasonló kép tárul elénk, mint az egy perces adatok 2D szónikus adatokkal történő összevetésekor. Itt a nagyfrekvenciásból számolt 5 perces átlagolt szónikus hőmérsékletet az OMSZ Szegedi Magaslégköri Observatóriumában 2 m-en mért hőmérséklet, harmatpont és állomásszinti légnyomás adataiból számolt virtuális hőmérséklettel hasonlítottuk össze. Ez esetben is, a METEK-vel a magas hőmérsékleti tartományban kaptunk jó egyezést, a szórásellipszis nagytengele  $30,6^{\circ}\text{C}$ -nál metszi az  $y = x$  egyenest. Alacsony hőmérsékleteknél  $3,5^{\circ}\text{C}$  körüli a különbség a METEK javára (3.27. ábra). A CSAT3 szónikus hőmérséklet érté-



**3.28. ábra:** A CSAT3 adataiból számolt 5perces átlagolt  $T_s$  szónikus hőmérséklet és az OMSZ Szegedi Magaslégköri Observatórium által szolgáltatott SYNOP-táviratokból nyert léghőmérséklet és harmatpont adatokból számolt virtuális hőmérséklet szórásdiagramja.

kei kb.  $2,5^{\circ}\text{C}$ -kal magasabbak a teljes tartományban (3.28. ábra), mint a SYNOP adatokból számolt virtuális hőmérséklet. Utóbbi mérési bizonytalansága egyébként kb.  $0,5^{\circ}\text{C}$ , melynél a szükséges műszeres hiba mindkét esetben nagyobb, amelyek megerősíti a szignifikáns eltéréseket az adatsorok között.

### 3.2.2. A korrigált fél órás adatok összehasonlítása

**Eddigi következtetések** Az előzőekben bemutatott összevetések során próbáltuk igazolni, hogy a feldolgozandó nagy frekvenciás adatok használhatóak mikrometeorológiai vizsgálatokra, a mérési eredmények megfelelőek, nem szükséges hosszabb időszakok teljes törlése, legfeljebb pontszerűen fordulhatnak elő bennük hibás, hiányzó, vagy kiugró adatok, melyek kiszűrendők. Első lépésként az adatsorokhoz rendelt időbélyegek módosítását kellett végrehajtanunk, hogy a nagyfrekvenciás adatok szinkronizáltak legyenek. A nyers egy perces átlagok számításakor a véletlenszerű hibák és a turbulencia hatása csökkent: az egy percnél rövidebb időskálájú ingadozások kiátlagolódtak. Ezután fény derült a műszerek elhelyezéséből adódó eltérésekre, melyek nem mutatnak rendellenes, a műszerek elhelyezésével nem magyarázható tulajdonságokat. Az öt perces átlagok esetében már lehetőség van a SYNOP és esetleg a METAR táviratokban lévő adatokkal történő összehasonlításra. Az eltérő, változó észlelési szabályok (SPECI, az észlelés módja, értékek pontossága, stb.) miatt a SYNOP adatokra támaszkodtam. Egyrészt a szabályos mérési körülmények biztosítják, hogy a jelentkező eltérések nem az észlelés időpontjával függnek össze, másrészt, ha a nagyobb távolság ellenére is megtaláljuk az összefüggéseket, az szintén a mérések validitását erősítik meg.

Beláttuk tehát, hogy a nagy frekvenciás adatok szinkronizáltak, egységesek, az adatok ellenőrzöttek, így további kutatásra használhatók, a feldolgozásra alkalmazott szoftverek használhatóságának tesztelésére pedig szintén alkalmasak az adatsoraink.

**Fél órás adatok – a két szoftver összehasonlítása** A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) szoftverrel lehetőség volt a különböző korrekciók letiltásával is futtatni, a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015) programmal azonban kötelező volt engedélyeztetni néhány eljárást. Így összehasonlítást abban az esetben érdemes végezni, amikor a szakirodalmi ajánlásoknak megfelelően vezetjük be a korrekciókat. Ahol erre nem volt megkötés, próbáltuk a beállításokat úgy megadni, hogy a beállításbeli különbség a lehető legkisebb legyen a két futtatás között. Kivételt képez ez alól, hogy kihasználtuk a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015) adatszűrési módjait (1. táblázat), melyeket a nyers nagyfrekvenciás adatokra alkalmaz, míg a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) sokat közülük csak a nyers

**1. táblázat:** Szűrési módok (Vickers and Mahrt, 1997). A megjegyzés rovatokban az alapértelmezettől eltérőnek választott paramétereket tüntetjük fel, ahol két érték szerepel zárójelben, ott az első a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015), a második a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015) programban beállított érték. A két középső oszlopban lévő jelek: + engedélyezve (ahogy ajánlott), – letiltva (ahogy ajánlott), +! engedélyezve (ajánlás ellenére), –! letiltva (ajánlás ellenére), X nem elérhető; az első jel a METEK-re, a második a CSAT3-ra történt futtatásra vonatkozó beállítás.

Szűrések	TK3	EP6	Megj. METEK	Megj. CSAT3
Spike teszt	+,+	+,+	(1)	
Rossz felbontás	X,X	+,+		
Kigrás	X,X	+,+	(2)	
Konzisztencia	+,+	+,+		
Momentumsz.	X,X	+,+	(3)	
Szakadások	X,X	+,+	(4)	
Időeltolódás	–,+	+!,+	0 s (5)	(0,2 s,0 s)
Szélszög	X,X	+!,+!	(6)	
Nem-linearitás	+,+	+,+	(7)	
Spektráleteszt	+,+	X,X		

kovarianciákra (ezért a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015) futásideje jóval hosszabb). Az adatsorok között kisebb különbséget várunk emiatt, ugyanakkor tartósan fennálló nagy eltérésre nem számítunk. Ha a mérőműszereink jó minőségűek, akkor ritkán fordulnak elő olyan hibák, melyekre a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) által nem ismert módszereket a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015) alkalmaz. Esetünkben ez a szám változónként 10–50 között mozgott a fél órás adatok esetén, melyből nagyságrendileg 3400 adat volt, tehát az esetszám 1 % körüli. Mivel a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015) csak fél órás átlagokat számol, ez esetben az összehasonlítás alapját is ezek az adatok képezik.

A táblázatok megjegyzés rovataiban lévő számozásokhoz tartozó magyarázatok alább kerülnek felsorolásra:

- (1) Mauder et al. (2013) alapján, a két program abban különbözik, hogy a kivett csúcsokat a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) a hiányzók közé számolja, és annak nem szabad átlépnie az 5 %-ot, míg a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015) esetében külön van erre egy 1 %-os korlát. A többi statisztikai teszt nem zár ki értékeket, csak a számolt fél órás mennyiségek mellé rendel jelzőt, ezt a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015) külön karakterhelyeken tárolva adja ki egy több számjegyű változóban, míg a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) Foken and Wichura (1996) alapján összesíti.
- (2) Abban különbözik a Spike tesztől, hogy nem egyetlen érték, hanem hosszabb, pl. néhány másodpercen át tartó szakaszon keresztül fennálló kiugrást detektál.

**2. táblázat:** A két-két futtatáshoz (TK3 METEK-re, TK3 CSAT3-ra, EP6 METEK-re, EP6 CSAT3-ra) a korrekciók beállításai. A megjegyzés rovatokban az alapértelmezettől eltérőnek választott paramétereket tüntetjük fel, ahol két érték szerepel zárójelben, ott az első a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015), a második a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015) programban beállított érték. A két középső oszlopban lévő jelek: + engedélyezve (ahogy ajánlott), - letiltva (ahogy ajánlott), +! engedélyezve (ajánlás ellenére), -! letiltva (ajánlás ellenére), X nem elérhető; az első jel a METEK-re, a második a CSAT3-ra történt futtatásra vonatkozó beállítás.

Korrekció	TK3	EP6	Megj. METEK	Megj. CSAT3
Hiány pótlás	+,+	+,+	lin. interp.	lin. interp.
Head corr.	-, -	X, X		
Keresztkorreláció	+,+	+,+		
Koord. transzf.	+!, +!	+,+	Kettős forg. (8)	Kettős forg.
Spektrál korr.	+,+	+,+	Moore, 1986	Moncrieff et al., 1997
Schotanus – Liu	+,+	X, X	Schotanus et al., 1983	Liu et al., 2001
WPL-korr.	+,+	+,+	Webb et al., 1980	

- (3) A ferdeség és csúcsosság túl magas értékei esetén jelzőbitet kapcsol be az adott intervallumhoz tartozó értékek mellé.
- (4) A kiugrás szűrésétől abban különbözik, hogy nem csak átmeneti, hanem tartós kiugrásokat, folytonossági hiányokat szűr.
- (5) Az időeltolódást a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) csak a szónikus anemométer és a gázanalizátor változói között teszteli, ezért nem volt értelme a METEK-nél bekapcsolni. A LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015) programban minden változóra van külön teszt ezen kívül, ahol javítja is az elcsúszásokat, ezzel csak egy minőségi jelzőbitet állít, ha van eltolás. A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) nem engedi az eltolás feltételezett mértékét nullára állítani (pontosabban e beállítás letiltja a vizsgálatot). Egyébként alapértelmezettként mindkét program végrehajtja a keresztkorreláció maximálását, ami irrelevánssá teszi e korrekciót.
- (6) A szenzorfej körüli áramlás-módosulás hibát okoz. Ennek korrigálására kifejlesztett szélszög- („Angle of Attack”)-korrekció alkalmazható a pillanatnyi értékekre. Mivel a vertikális szél átlagának zérussá tétele érdekében valamely koordináta-forgatásos módszer mindenképpen alkalmazandó, a szélszög-korrekció fölösleges (ezért alapértelmezettként le van tiltva), bár alkalmazása nem okoz túlkompensációt.
- (7) A nem-linearitási tesztet a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) a Foken and Wichura (1996) részeként alkalmazza, de nem csak a szélre, mint ahogy azt a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015) teszi.
- (8) Planar Fit eljárást ajánlja, mert az a domborzat és a műszer hibás beállításainak hatását kiküszöböli (különböző szélirány-szektorokra külön végrehajt-

ható). A kettős forgatás akkor is használható, ha nem-linearitás (pl. zivatar) miatt az illesztett sík nem illeszkedik jól a széladatokra (*Kaimal and Finnigan, 1994*). A Planar Fit alkalmazása esetén csak a vertikális sebesség lesz zérus, a kettős forgatás azonban az  $u$  tengelyt is a horizontális szél átlagába fordítja, így ott csak a szélesebbesség jelenik meg az  $u$  változóban.

A következő feladatunk, hogy összehasonlítsuk a két feldolgozó program működését, az alkalmazott feldolgozási lépéseket, és a kapott részeredményeket (ahol lehet). A programfuttatási beállításokat a 2. táblázat részletezi. A bemutatásra kerülő ábrákon a vízszintes tengelyen a TurbulenzKnecht-3.11 (*Mauder and Foken, 2015*), a függőlegesen a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (*LI-COR, 2015*) által számolt értékek szerepelnek. A vizsgálatok alapján tudjuk, hogy a nyers adatsorok nem tartalmaznak szisztematikus hibákat. Az esetenként megjelenő anomáliákat nem-stacionárius mikro- és mezoskálájú meteorológiai jelenségek (zivatar, front, stb.) magyarázzák. A szoftverek, illetve a módszerek közötti különbségekből adódó eltérések általában meghaladják az 5–10 %-ot. 10–15 % fölötti eltérések gyakori megjelenése esetén a szoftverek, vagy az általuk alkalmazott módszerek egy része, nem alkalmazható az adataink feldolgozására, azok külön ellenőrzése szükséges, melyre példa a közelmúltban *Fratini and Mauder (2014)* tanulmánya.

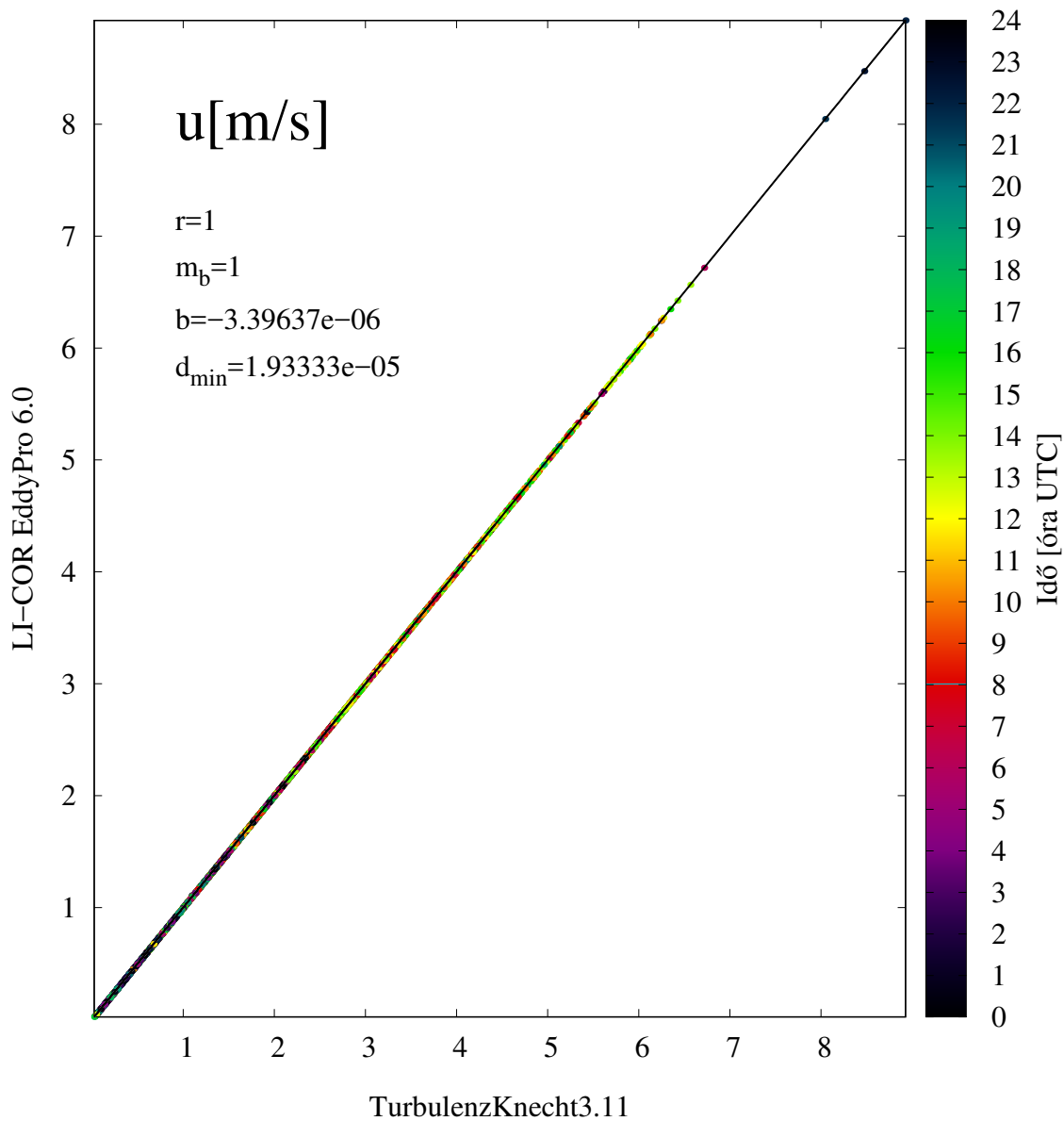
Az első ábrarozat (3.29.–3.34. ábrák) a CSAT3-ra vonatkozó eredményeket egy részét mutatja be, a következő (3.35.–3.39. ábrák) a METEK-re vonatkozókat. (Megjegyezzük, hogy a következőkben az  $u$  szélkomponens az alkalmazott kettős forgatás (*Wilczak et al., 2001*) miatt megegyezik a korábban  $W_{sp}$ -vel jelölt szélesebbességgel.)

A legtöbb közös kimeneti változó esetében jó egyezést kaptunk. A CSAT3 esetében a szélesebbesség (3.29. ábra) és a szónikus hőmérséklet (3.31. ábra) átlaga teljesen egyezik, azonban például a vertikális sebesség varianciájára a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (*LI-COR, 2015*) alacsonyabb értékeket ad. Az eltérés 8 % körüli. A vertikális hőszállítás (3.32. ábra) esetében az adatok illeszkedése nem tökéletes, az eltérések 7 % körül ingadoznak. A szenzibilis hőáram (3.33. ábra) korrigált félórás értékei kb. 20 alkalommal, főként a nulla körüli tartományban térnek el, azon kívül teljes egyezés van a két adatsor között.

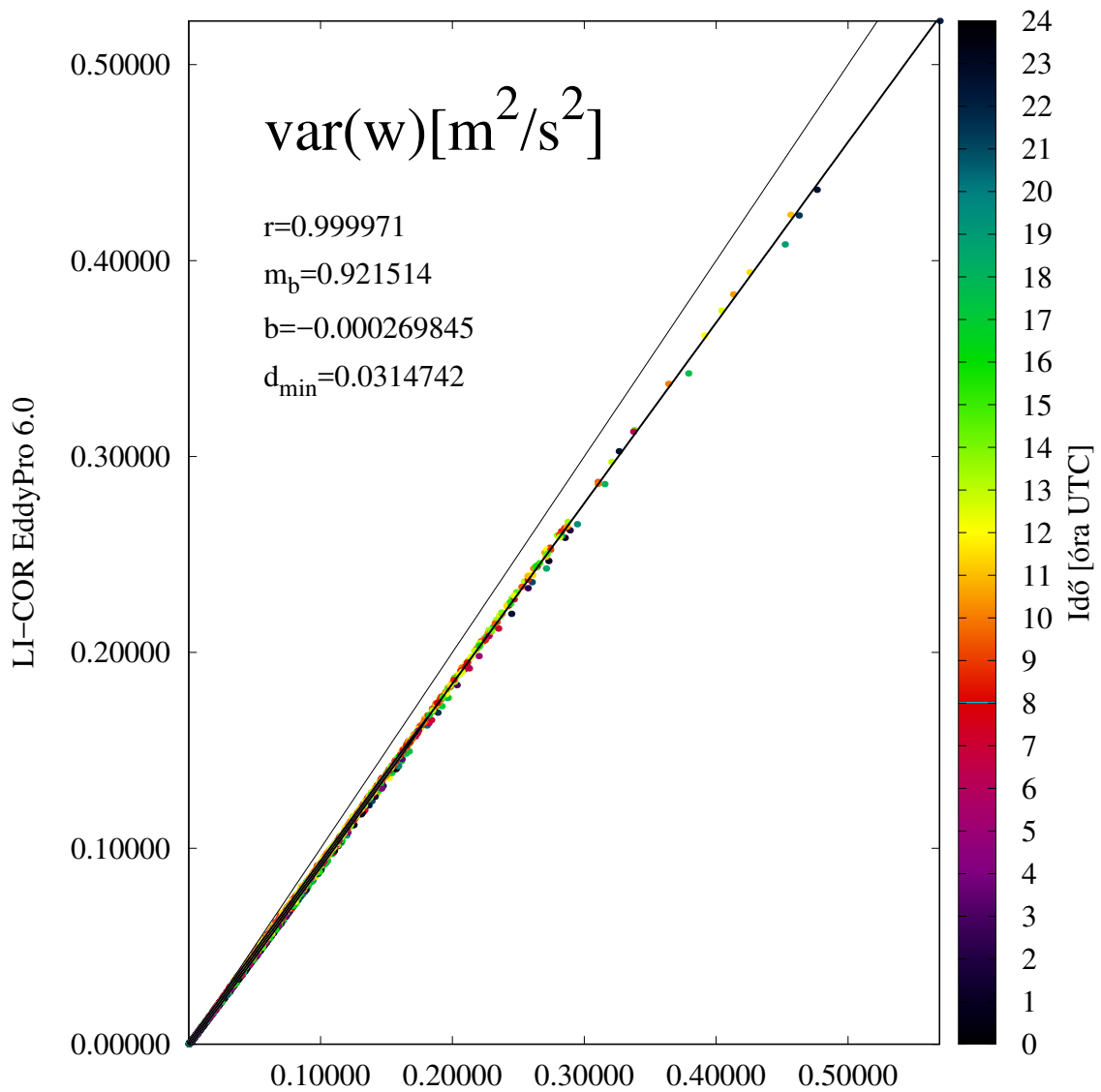
A METEK adatok esetében jelentősebbek az eltérések. A CSAT3 esetében egyezőnek választott beállítások helyett – a nagyfrekvenciás nyomás, hőmérséklet és nedvesség adatok hiányában – a két program automatikus beállításokat választott, melyek azonban különböznek.

Az okozott eltérések a hőmérséklet esetében 0,2 °C körüliek, a turbulens karakterisztikákban általában 15 % körüliek. Utóbbiak a szakirodalomban olvasható eltérésekkel összecseng (ld. pl. *Fratini and Mauder, 2014*).



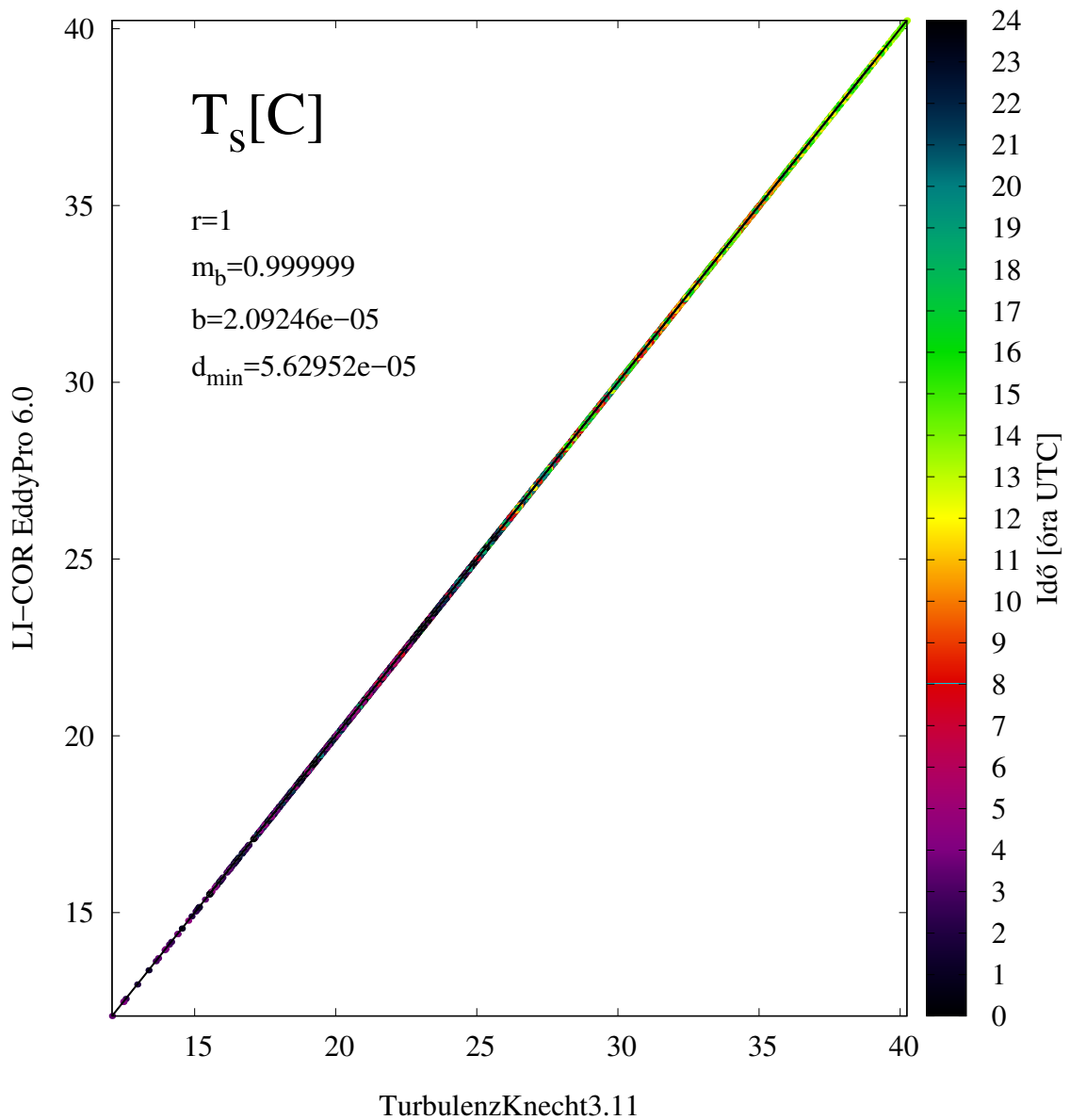


**3.29. ábra:** A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) (vízszintes) és a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015)függőleges által számolt fél órás átlagolt  $\bar{u}$  szélkomponens szórásdiagramja a CSAT3 adatai alapján.

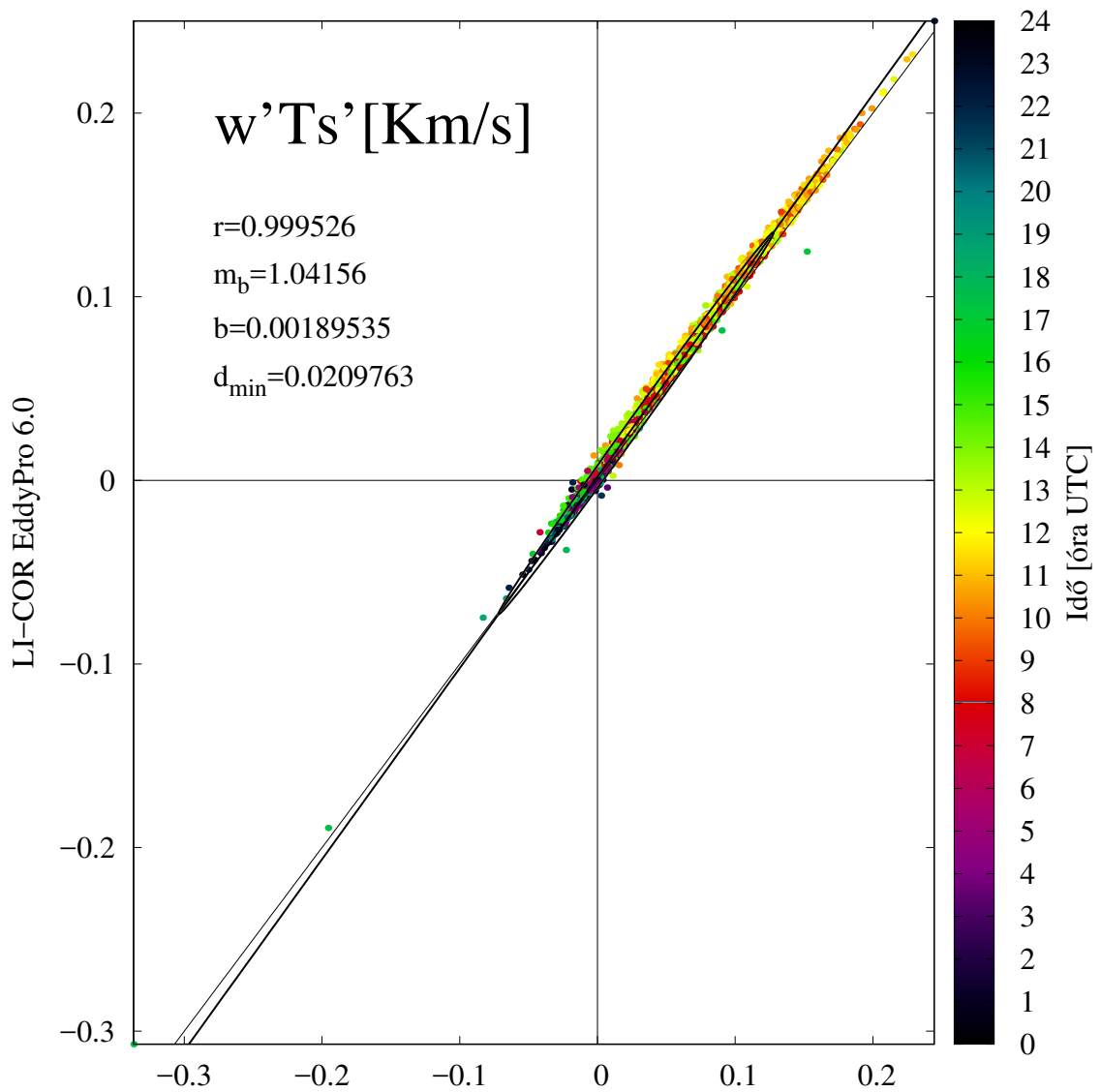


TurbulenzKnecht3.11

**3.30. ábra:** A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) (vízszintes) és a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015) függőleges által számolt fél órás  $\overline{w'^2}$  vertikális sebesség-variancia szórásdiagramja a CSAT3 adatai alapján.

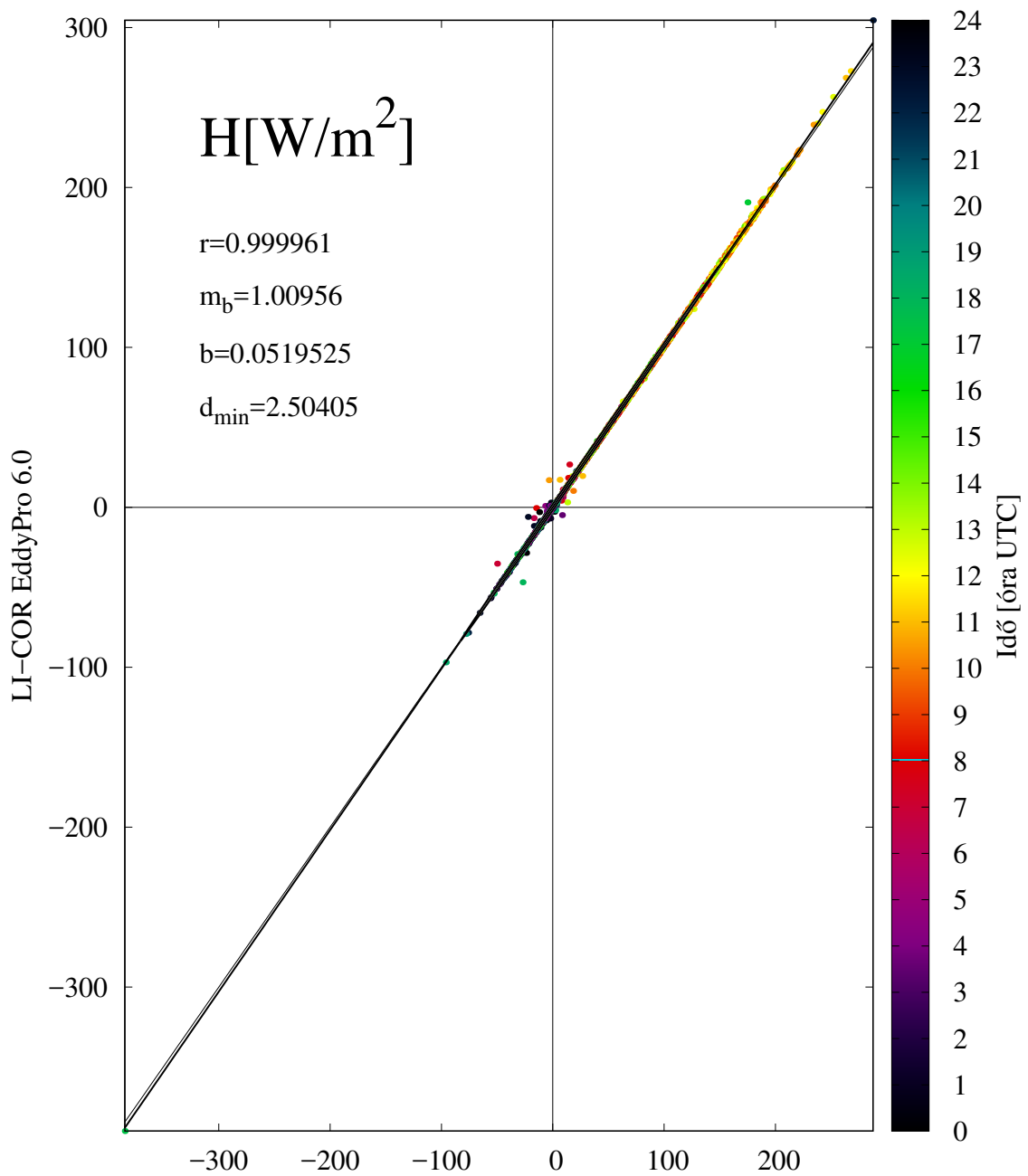


**3.31. ábra:** A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) (vízszintes) és a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015) függőleges által számolt fél órás átlagolt  $\overline{T_s}$  szónikus hőmérséklet szórásdiagramja a CSAT3 adatai alapján.

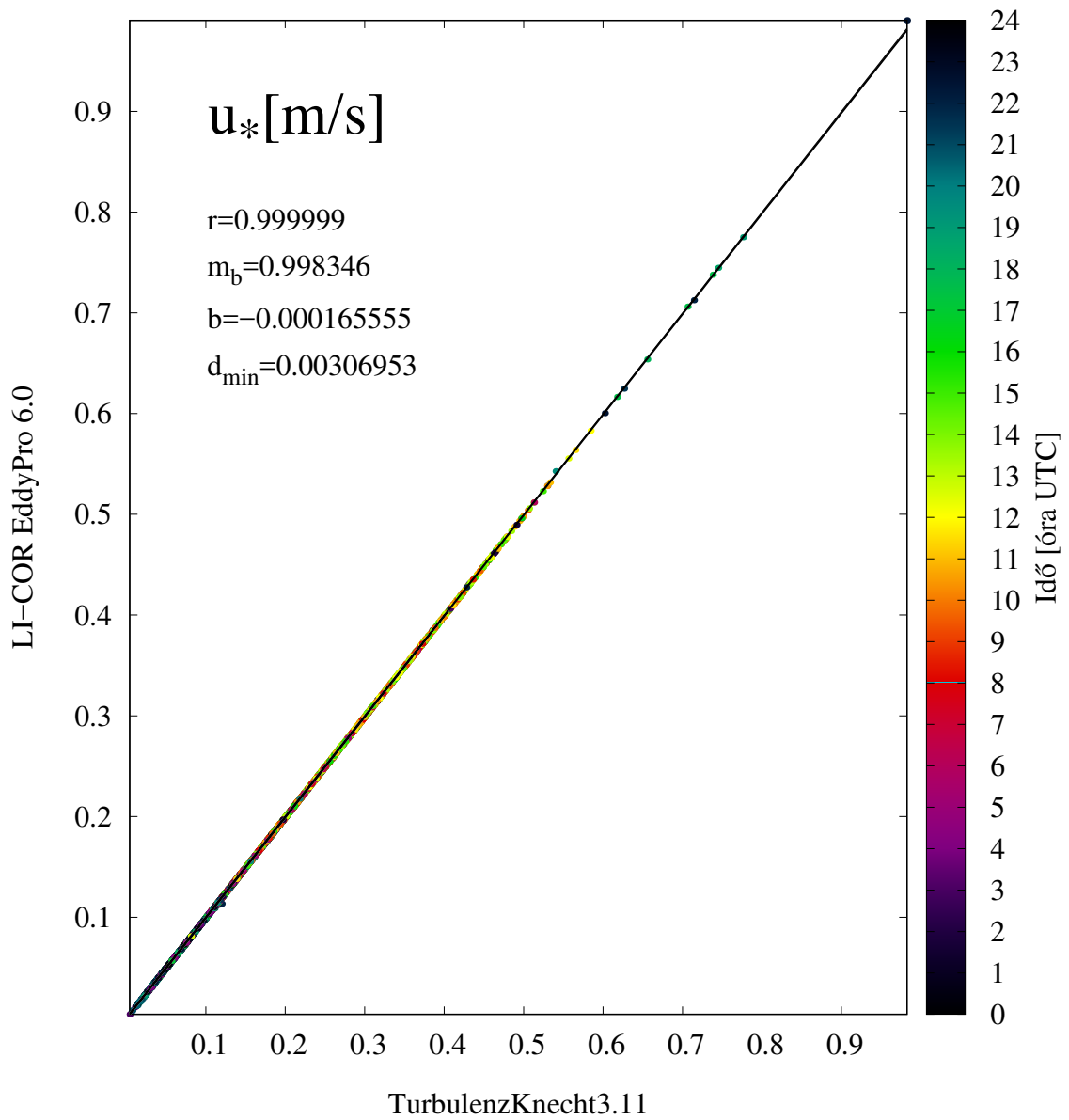


TurbulenzKnecht3.11

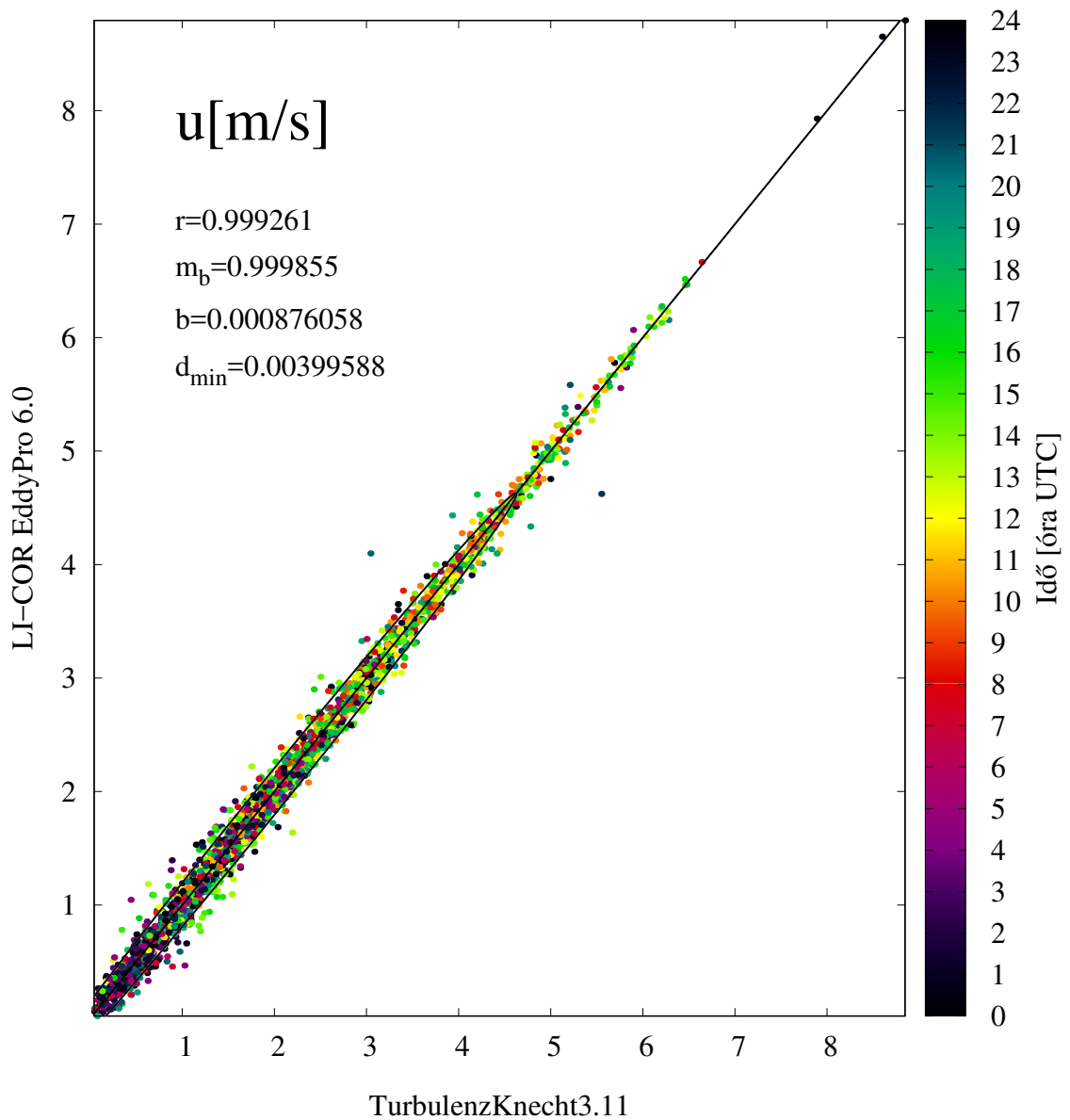
**3.32. ábra:** A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) (vízszintes) és a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015)függőleges által számolt fél órás  $w'T_s'$  hőmérséklet-szállítás szórásdiagramja a CSAT3 adatai alapján.



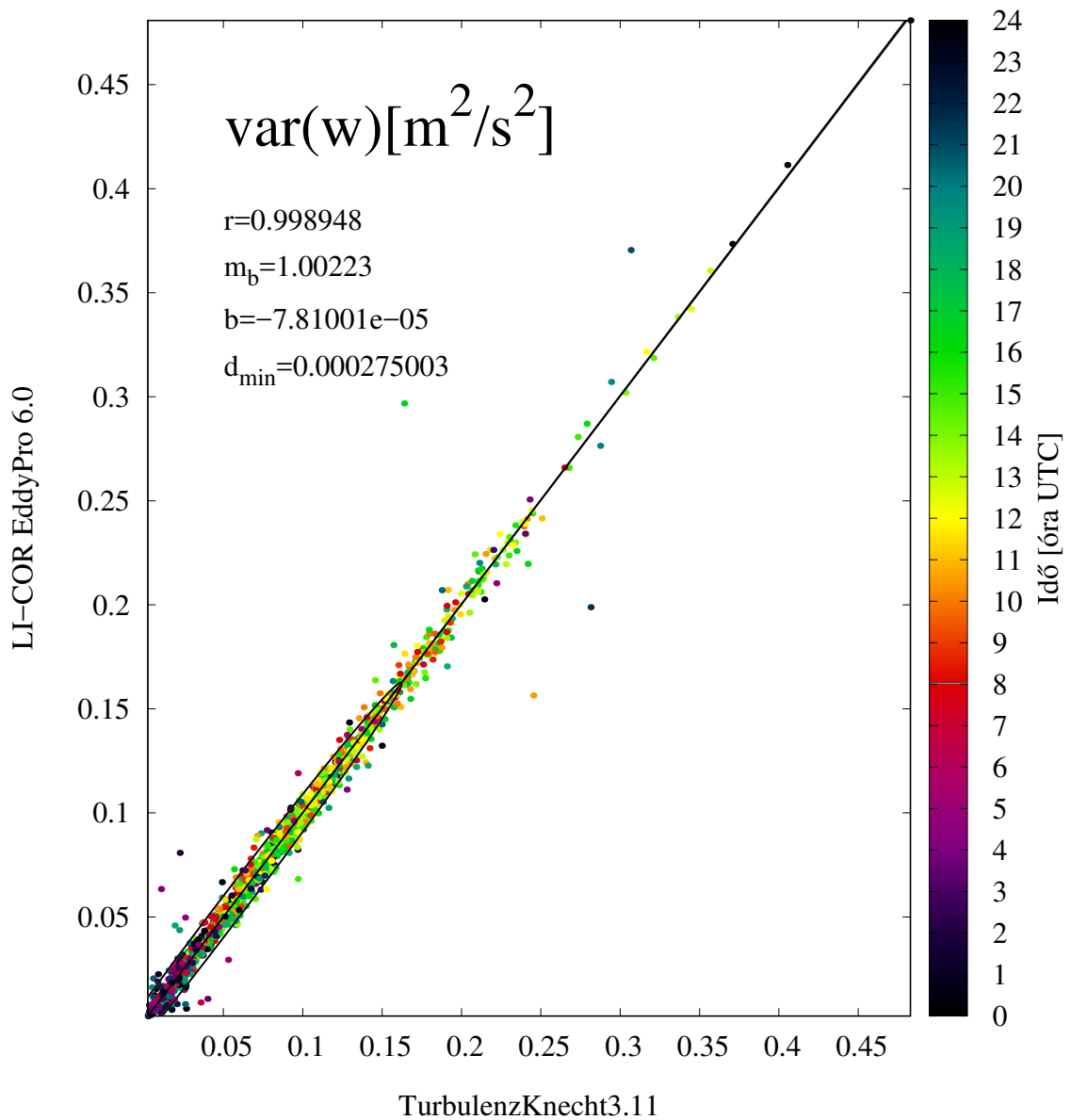
**3.33. ábra:** A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) (vízszintes) és a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015)függőleges által számolt fél órás átlagolt  $H$  szenzibilis hőáram szórásdiagramja a CSAT3 adatai alapján.



**3.34. ábra:** A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) (vízszintes) és a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015) függőleges által számolt fél órás átlagolt  $u_*$  súrlódási sebesség szórásdiagramja a CSAT3 adatai alapján.

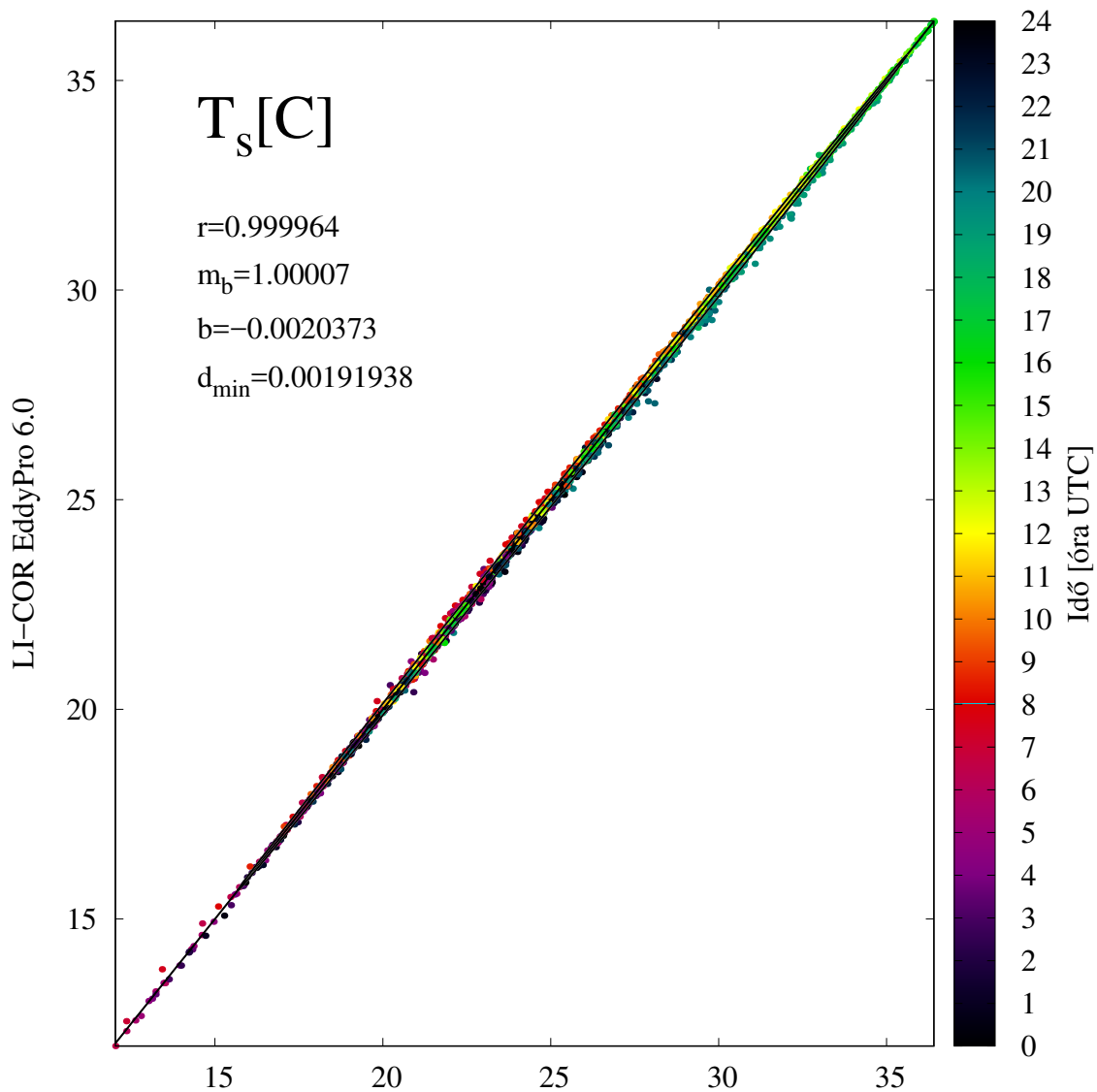


**3.35. ábra:** A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) (vízszintes) és a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015)függőleges által számolt fél órás átlagolt  $\bar{u}$  szélkomponens szórásdiagramja a METEK adatai alapján.



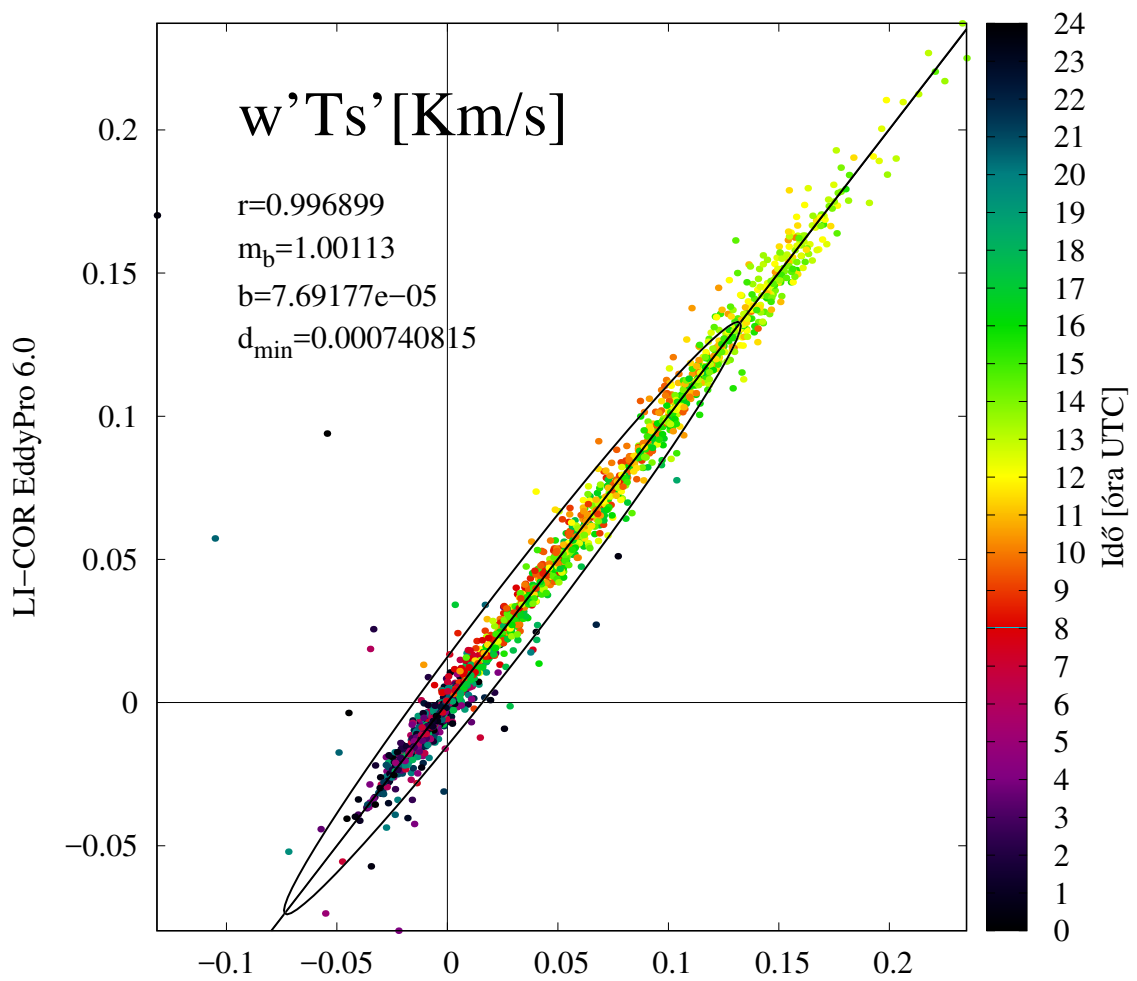
**3.36. ábra:** A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) (vízszintes) és a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015) függőleges által számolt fél órás  $\overline{w'^2}$  vertikális sebesség-variancia szórásdiagramja a METEK adatai alapján.



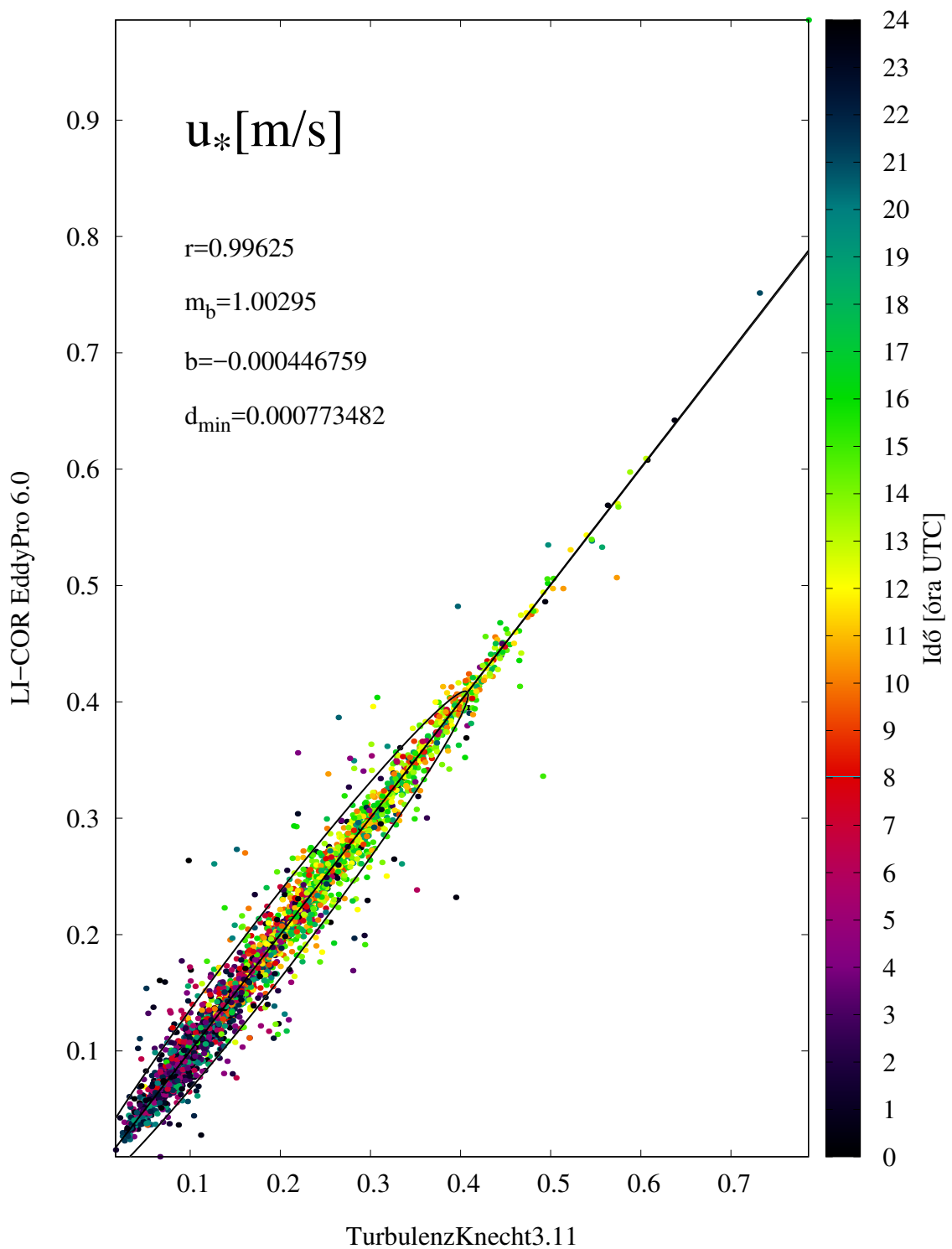


TurbulenzKnecht3.11

**3.37. ábra:** A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) (vízszintes) és a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015) függőleges által számolt fél órás átlagolt  $\overline{T_s}$  szónikus hőmérséklet szórásdiagramja a METEK adatai alapján.



**3.38. ábra:** A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) (vízszintes) és a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015) függőleges által számolt fél órás  $\overline{w'T_s'}$  hőmérséklet-szállítás szórásdiagramja a METEK adatai alapján.



**3.39. ábra:** A TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) (vízszintes) és a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (LI-COR, 2015) függőleges által számolt fél órás átlagolt  $u_*$  súrlódási sebesség szórásdiagramja a METEK adatai alapján.

### 3.2.3. Következtetések

E fejezet első felében meggyőződünk arról, hogy az adatsoraink alkalmasak a további tudományos munkára. Az imént bemutatott, a számolt fél órás turbulens karakterisztikák összehasonlítása során erős lineáris összefüggés volt kimutatható (korrelációk 0,99 fölött, meredekségek 1-hez közel) ugyanazon változó két különböző szoftverrel számolt fél órás statisztikai között. A jelentkező kisebb eltérések feltérképezéséhez részletesebb vizsgálatok (akár független, jó minőségű adatsorokon), a program alaposabb ismerete szükséges, melyet korlátoz például programfuttatási hibák, platformfüggőség megjelenése, illetve, hogy a forráskódhoz nem, vagy csak részben férünk hozzá, stb.

## 3.3. Turbulens áramok elemzése a PABLS-2015 Szegedi Határréteg Mérési Program során

Az eddigiekben az adatfeldolgozás jelentős részét képező – és még nem befejezett – technikai jellegű munkámat ismertettem. A következő szakaszban a közelmúltban megkezdett „tudományos jellegű” adatfeldolgozás elsődleges eredményeiről számolok be. Elsőként az energiamérleg-komponensek (turbulens energiaáramok) számításáról, majd a mikrometeorológiai mérések lehetséges repülésmeteorológiai alkalmazásáról írok.

### 3.3.1. Bevezető

A felszín energia-háztartása a föld-légkör rendszer energia-kicserélődési folyamatainak egyik kulcsfontosságú tényezője. Ismerete alapvető fontosságú a légköri folyamatok, így a PHR jelenségek leírásában és előrejelzésében. Az energia-szállítási, -átalakulási és -kicserélődési folyamatok mikroskálájú jelenségek, így a legtöbb időjárás előrejelző modellben egydimenziós parametrizációként (felszíni modulként) kerül beépítésre. Az elméletek kidolgozása még a mérnöki áramlástanban kezdődött, amikor Reynolds, Ekman, Kármán és kortársaik a 20. század első felében megalkották az első határréteg-modelleket. A földi határréteg létezését ezek után tényként kezelték, de csak később derült ki, hogy áramlásai hasonlítanak a laboratóriumban az érdes lemezek fölötti folyadékáramlásokhoz.

Az 1960-as évektől új módszerek honosodtak meg a turbulens áramok mérésében és modellezésében (gradiens-, Bowen-arány-módszer, közvetlen árammérési technikák). A mérnöki tudományban alkalmazott Reynolds-átlagolt mozgásegyenletet alkalmazva a légkörre számszerűsíthetővé váltak a tulajdonság-áramok, lehetővé vált a felszíni energiamérleg-komponensek megbízható mérése és a parametrizációs eljárások fejlesztése, s beépítése a nagyterésű időjárás előrejelzései, később pedig az

éghajlati modellekbe (*Budyko*, 1961). A mikrometeorológia e fejezetéről jó áttekintést ad *Stull* (1988); *Arya* (2001); *Foken and Nappo* (2008), valamint *Aubinet et al.* (2012) munkái.

Az új lehetőségek mellé azonban új problémák is társultak. Az energia megmaradása miatt a Föld felszínére beérkező sugárzási energia a felszíni turbulens energiacserélődési folyamatokban résztvevő komponensek között osztódik el. Ezért a nettó sugárzással egyensúlyt tart egyensúlyt tart a szenzibilis, a látens és a talajba vezető hőáram a felszínen. Ez volt sokáig a konceptuális modell (*Gregory and Walling*, 1979) – ami természetesen igaz –, ám a mérések ezt nem támasztották alá. Emiatt szinte „gombamód szaporodtak” a mikrometeorológiai mérési kampányok, melyeknek célja a határréteg-elméletek ellenőrzése, pontosítása mellett az energiamérleg lezárhatóságának vizsgálata volt.

Ez utóbbi téren sok kudarc érte a meteorológus társadalmat, ugyanis a mérési adatsorok alapján szinte sosem volt zárt az energiamérleg. Előrelépést a Bayreuth-i Egyetem kutatóinak eredményei jelentettek a kilencvenes évektől kezdődően. Világos volt, hogy a műszerek sem tökéletesek, a mérnökök munkájának köszönhetően azonban a műszer által okozott módosulásokat jól lehetett korrigálni. Egyre inkább úgy tűnt, a probléma természetes eredetű, s valamilyen eddig figyelmen kívül hagyott jelenség az energia egy részét „eltünteti”. Az áttörést az EBEX-2000 (*Oncley et al.*, 2007; *Mauder et al.*, 2007; *Kohsiek et al.*, 2007) mérési kampány hozta, amikor az energia-háztartás komponenseit az addig ismert összes lehetséges módon megmérték.

Sajnos ezzel sem lett zárt az energiamérleg, így mára az az elfogadott nézet alakult ki, hogy ennek nem kell minden időpillanatban teljesülnie, de hosszabb idő átlagában elvárható a zárttság. Ami kiderült, hogy a növényzetnek nagy szerepe van, hiszen tárolni képes az energiát, amit viszont műszerek nem, vagy pontatlanul mérnek, ellenben ez a tárolás magyarázhatja az energiahíányt (megjegyezzük azonban, hogy ez nem ad teljes magyarázatot a lezárási hibákra). A lehetséges okok között ott van a műszerek eltérő pontossága és reprezentativitása, a lokális advekciónak, a rendezett konvektív mozgások szerepe is. A témában *Karcher et al.* (2009) írtak összefoglaló cikket, melyben kitértek a modellezésre is.

Gazdag irodalma van a turbulens áramok meghatározásának. A bemutatott két adatfeldolgozó program mellett megemlítjük *Barcza* (2001) doktori munkáját, vagy *Ács* (2008) tankönyvét.

Mivel a növényzetben történő energiátárolás – illetve általánosabban az energiamérleg pontos lezárása – rendkívül bonyolult mikrofizikai folyamatokból tevődik össze, még az egyszerű parametrizálása is igen nagy kihívást jelent, s nem hoz lényeges javulást a határréteg-modellekben. Egy lehetséges megoldás a „Large-Eddy szimuláció (LES)”, ahol a turbulens örvényeket egyenként modellezik, s ezekhez ál-

lítják be a határréteg parametrizációkat. Ilyen összehasonlító vizsgálatokat végzett többek között *Cuxart et al.* (2006). Az ilyen kutatások tanulsága, hogy pontos mérések mellett közepesen stabil rétegződés esetén az egydimenziós PHR modellek már képesek megközelíteni a LES modelleket az előrejelzés pontossága terén, ha jól választják meg a paramétereket, és a határréteg alsó felében a valós állapotokat is képesek leírni.

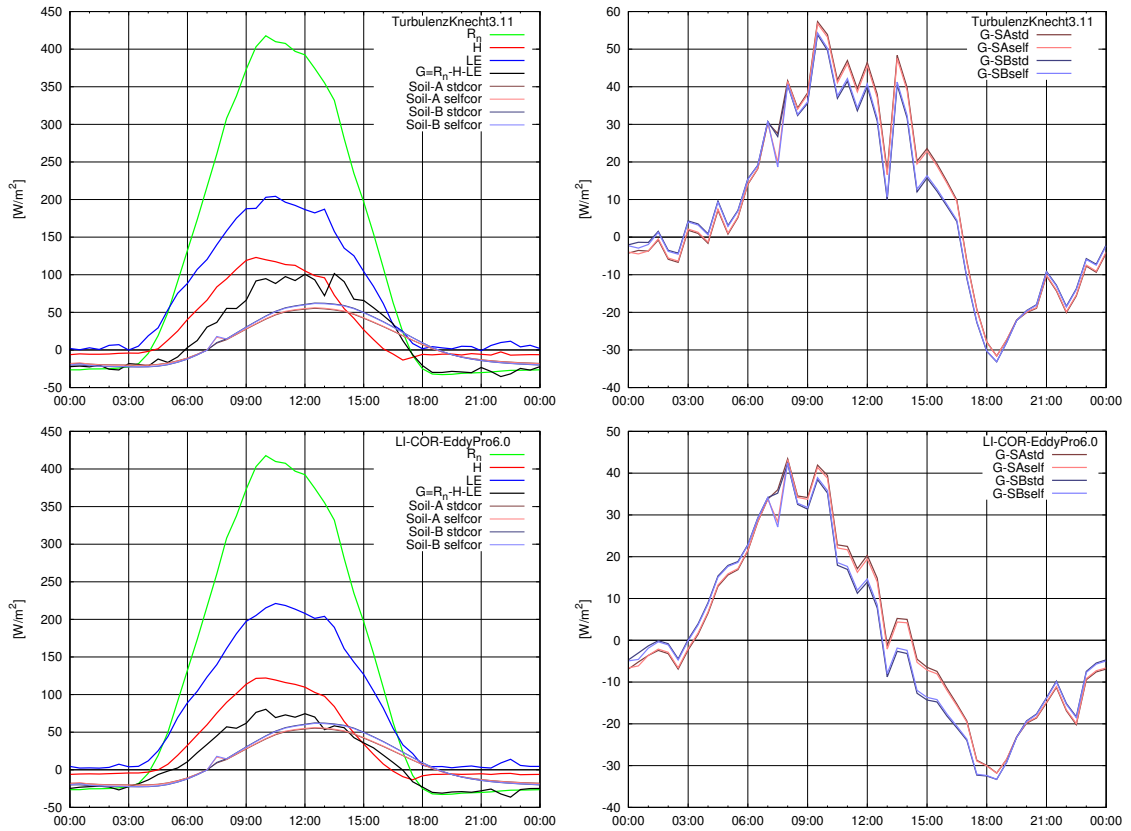
E téren azonban máig folynak a kutatások, pl. az ECMWF parametrizációs eljárásainak optimalizálásában, amihez megfelelő minőségű adatbázisok szükségesek. Ez volt az egyik motivációja a nemzetközi együttműködéssel zajlott 2015-ös szegedi planetáris határréteg mérési expedíciónak. E munka egyik eleme a minél pontosabb turbulens áramok előállítása, ami jelen diplomamunka célja.

### 3.3.2. A turbulens áramok számítása

Elsőként a szinkronizált 10 Hz-es mikrometeorológiai adatbázisból számított turbulens áramok (impulzus, szenzibilis és latens hő) mutatjuk be, majd kitérünk az energiamérleg lezárásának becslésére, pontosabban a sugárzási egyenleg (Q7) és a 8 cm-es mélységben elhelyezett két egyforma Campbell önkalibráló talajhőárammérő szenzorok adatsorainak bemutatására.

A TurbulenzKnecht-3.11 (*Mauder and Foken*, 2015) és a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (*LI-COR*, 2015) programok számára lehetőség van megadni lassú válaszidejű műszerek jeleit, ezzel azonban még kevés tesztelésen estek át, ezért a METEK adatokkal együtt történő felhasználhatóságuk még nem bizonyos, a tesztelés jelenleg is tart.

A számítások során elsőként a nagyfrekvenciás adatokból számolt szenzibilis és latens hőáramot, valamint a referenciaadatokból a nettó sugárzást mutatom be, majd a belőlük számolt maradéktagot vetettem össze a mélyebb talajrétegekbe jutó hőárammal. A számolt szenzibilis és latens hőáramok rendelkezésre állnak a két programból külön, (a LI-COR™ EddyPro® 6.0 (*LI-COR*, 2015) tud számolni tárolási tagot is, ennek ellenőrzésére a közeljövőben kerül sor). Minden félórán kiszámoltuk a maradéktagokat a nettó sugárzás, illetve a szenzibilis és latens hőáram összegének különbségként ( $G = R_n - H - LE$ ). Ha az energiamérleg zárt, akkor erről tesszük fel, hogy egyezik a talajba jutó hőárammal, s napi léptékben nullává válik. Az elsődleges eredményeket a 3.40. ábra mutatja be. Fontos megjegyezni, hogy az ábrákon jelenleg a talajba jutó mért hőáramként a 8 cm mélységben mért hőáram szerepel. A valódi talajba jutó hőáramokat a 2, 5 és 10 cm méter mélyen Campbell CS616 szenzorokkal mért talajnedvesség, valamint Campbell termoelemes infra hőmérőkkel mért talajfelszín-hőmérséklet adatokból számolhatjuk (*Cuxart et al.*, 2016).



**3.40. ábra:** A felszíni energiamérleg-komponensek 2015. június 26. és 2015. szeptember 8. közötti időszakban számolt átlagos napi mente (bal oldalon), valamint az energiamérleg maradék tagja és az egyes 8 cm mélyen mért talajbeli hőáramok különbségei (jobb oldalon). Bal oldalon zölddel a sugárzási egyenleg, pirossal a szenzibilis, késsel a latens hőáram, feketével a maradék tag, a halványabb kékes és pirosas görbék a 8 cm mélyen mért talajhőáramok.

A 3.40. ábrásorozat bal oldali ábráin látható energiaáramok a szakirodalom alapján várható értékeket visszaadták. A maradék tagnak legalább a felét elviszi a nappali órákban a talaj mélyebb rétegeibe jutó hőáram. A talajbeli hőáramok fáziseltolódást szenvednek, később áll be a maximumuk, ez a 8 cm mélység következménye. Ennek következménye, ami a jobb oldali ábrákon látszik, hogy míg nappal az energiamérlegben hiány lép fel, éjszaka többletet tapasztalhatunk. Ezt úgy magyarázzuk, hogy a talaj felső nyolc centimétere a nappal beérkező energiát tárolja, éjszaka pedig leadja. Az, hogy a talaj felszínén mennyi energia lép be a talajba, számolható, és pontosabb képet ad, a jobb oldali ábrákon látható különbségek is kisebbek lesznek. A talajba jutó és a 8 cm mélyen mért hőáram különbsége napi léptékben a TK szoftverből származó adatsorok alapján  $15\text{--}19 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ , a LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (LI-COR, 2015) adatai alapján viszont nem éri el az  $5 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ . A két program által adott értékekről megemlítjük, hogy egymáshoz eléggé hasonló értékeket kaptunk, az eltérések az áramokban  $20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ -en belül maradtak.

A fenti elemzés alapján kijelenthető, hogy a munkám nagyobb részét képző technikai feladatok megoldása révén előállt egy olyan turbulens áramokat tartalmazó adatbázis, ami már alkalmazható a felszíni energia-háztartás részletesebb tanulmányozására. Nem találtunk ellentmondást a két adatfeldolgozó program eredményei között.

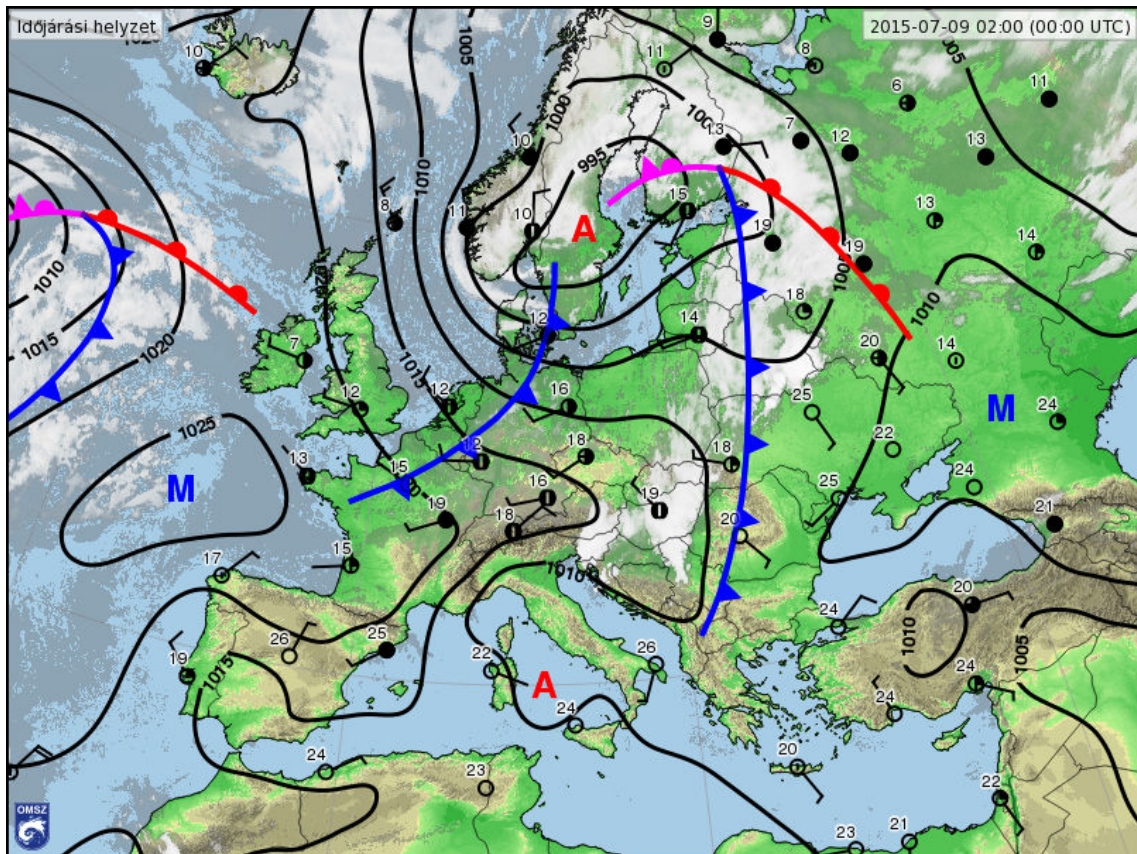
### 3.3.3. Repülésmeteorológiai alkalmazás

A mikrometeorológiai mérések nemcsak parametrizációs eljárások tesztelésére, hanem szinoptikus, illetve repülésmeteorológiai célra is alkalmazhatók, hiszen a turbulencia, a mikro- és mezoskálájú folyamatok megismerése a repülésbiztonság szempontjából is fontos.

A szegedi repülőtéren végzett mérések során – ott tartózkodásom idején – 2015. július 8-áról 2015. július 9-ére virradóra egy hidegfront mentén zivatarlánc vonult át a térség fölött. Maga a talajfront még a késő délutáni órákban megérkezett, ahogyan az az OMSZ frontanalízis térképén (3.41. ábra) is látszik.

A talajfronthoz kapcsolódóan egy kisebb zivatarrendszer a várostól mintegy 50–60 km-re északra haladt el 17 UTC körül. A talajfront gyakorlatilag ennek a kifutófrontja volt. Amikor ez a kifutófront megérkezett a repülőtérre, hirtelen megerősödött a szél és porvihar támadt. Később éjszaka a második, immár átvonuló zivatarlánc érkezése előtt, nem sokkal éjfél után (22:34 UTC) a repülőtéri mikrometeorológiai mérőrendszert villámvédelmi okokból kikapcsoltuk, kb. reggel 5:30 UTC-ig szünetelt a mérés.





3.41. ábra: Az OMSZ frontanalízis térképe 2015. július 9-én 0 UTC-kor.

**A fél órás adatok anomáliái** Korábban láttuk, hogy a két általunk használt szoftver jelentős részben hasonló értékeket számol ugyanabból az adatsorból a turbulens karakterisztikákra, valamint, hogy a METEK szenzor esetében az eltérések nagyobbak. A mikrometeorológiai mérések repülésmeteorológiában történő alkalmazhatóságának vizsgálata szempontjából nem releváns ilyen kis mértékű különbségek vizsgálata. A szemléltetéshez ezért a CSAT3–EC150 rendszer adataiból a TK programmal számolt adatsorokat használjuk.

A fél órás adatok feldolgozása során bukkantunk rá egyes helyeken kiugró statisztikai értékekre a CSAT3 adatsorra történt TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) futtatások kimeneteként kapott fél órás kovarianciák adataiban. Néhány helyen elszórtan a változók – gyakran egyszerre több is – szokatlanul magas értékeket vettek fel. A legnagyobb anomáliák július 8-án délután jelentkeztek a 17:30-as időlépcsőben. A fél órás adatokból az erre a napra előállított 3.42. ábra tárta fel előttünk, hogy a kiugrások szorosan kötődnek egy porviharhoz. A porvihar a hivatalos észleléseken követhető<sup>20</sup>, és több változóban is ebben a fél órában tapasztaltuk a kiugrásokat a szórásokban (3.42. ábra jobb oldala). Ugyanebben az időpontban az átlagos változók értékei is megváltoztak a környező időpontokhoz képest, a hőmér-

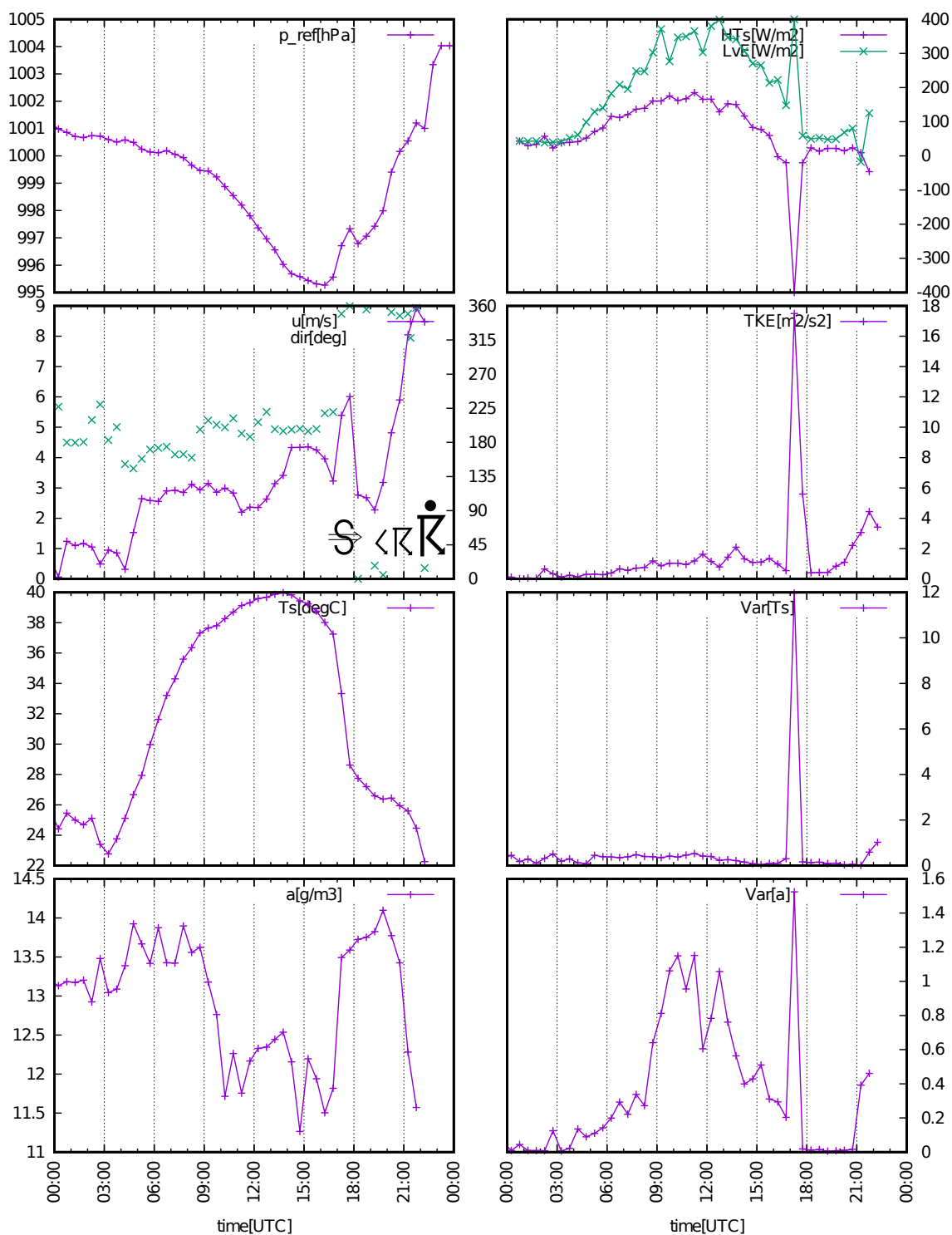
<sup>20</sup>SPECI LHUD 081713Z AUTO 24008G30KT //// // 32/16 Q1007=  
SPECI LHUD 081714Z 25009G29KT 5000 DS SS FEW053TCU SCT083 32/18 Q1007=

séklet lecsökkent, a szél északira fordult, a nedvesség megemelkedett, és a nyomás emelkedésnek indult.

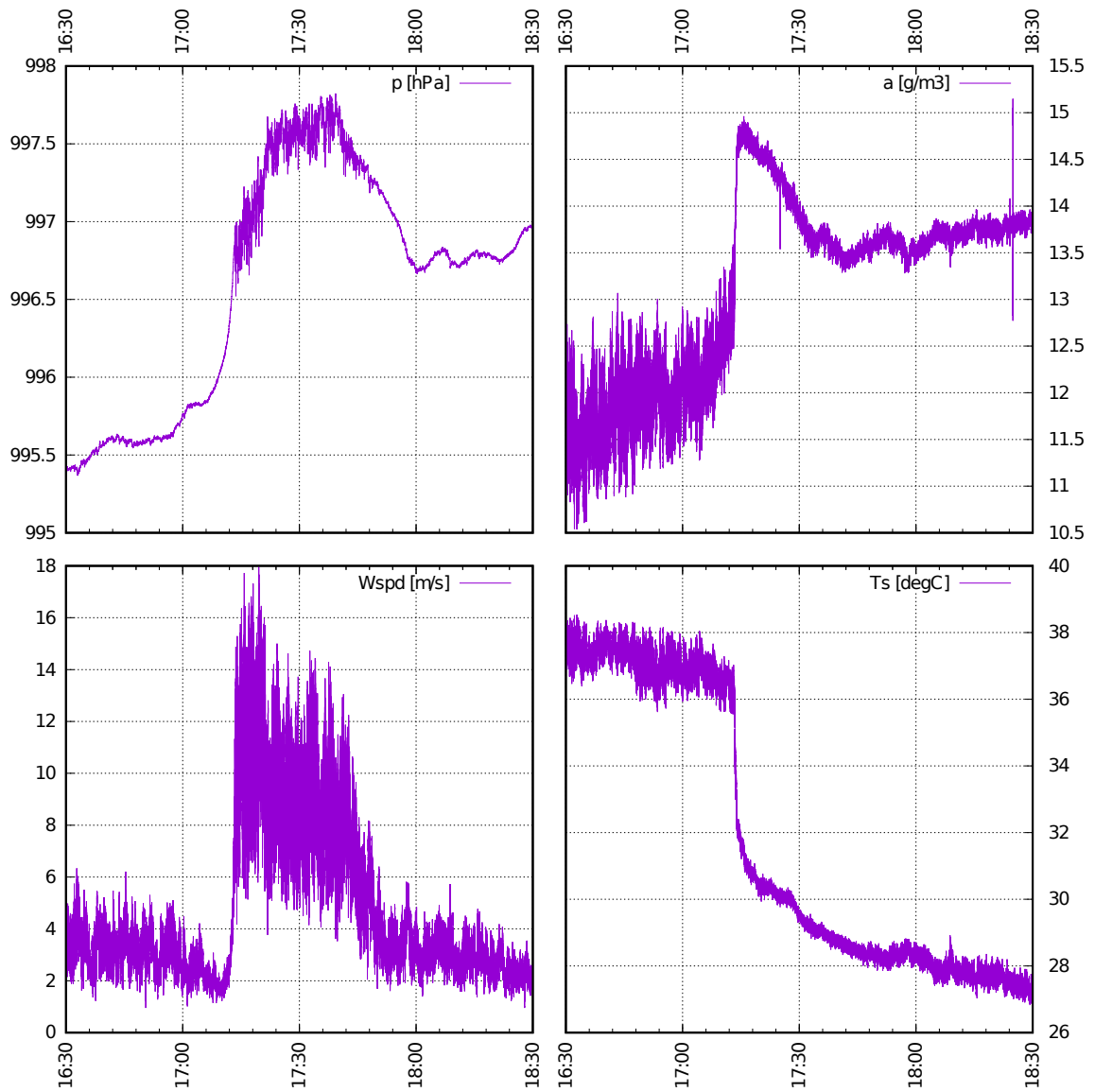
A nagyfrekvenciás adatokból (3.43. ábra), látható, hogy az időjárás rövid idő alatt jelentősen megváltozott. A hőmérséklet mintegy  $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ -ot zuhant, a szél megerősödött, viharos lökésekkel fújt az addigi szélcsend után. A nedvesség is megugrott, valamint a másodpercenként mért nyomás is ingadozni kezdett. Az ilyen erős kifutófrontok által keltett egyfajta „torlónyomás” és a rajta lévő nedvességkonvergencia jeleit fedeztük fel az adatainkban. Tovább nagyítottuk a porvihar érkezését (3.44. ábra), s kiderült, hogy csaknem  $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ -nyi hőmérséklet csökkenés 4 s alatt lezajlott. Az érkezés utáni első legnagyobb szélökés  $15\frac{\text{m}}{\text{s}}$  közelében alakult, ennél a kifutófront lassabban haladt, így a front szélessége nem lehetett sokkal több 600 m-nél.

A rekonstruált eset tanulsága a repülésbiztonság szempontjából fontos, ugyanis a délután folyamán több kisépés pilóta is használta a repteret, és az ilyen jelenségek számukra igen nagy veszélyt jelentenek. Mivel a front a zivatartól távol is ilyen markáns volt, a reptéri észlelők csak kis késéssel észlelték. Erre utal, hogy az automata SPECI került ki korábban a szelerősödés következtében, s csak utána a porvihar észlelése. A korábbi METAR távirat alapján tiszta feltételek voltak a repüléshez (CAVOK 16:45 UTC-kor), így bárki a levegőben lehetett volna, fel nem készülve a front érkezésére, mely katasztrófahelyzetet teremthetett volna. Az itt bemutatott-hoz hasonló jelenségek tehát eleinte rejtve maradhatnak az észlelők előtt, észlelésük akár percekkel az érkezésük után történhet.

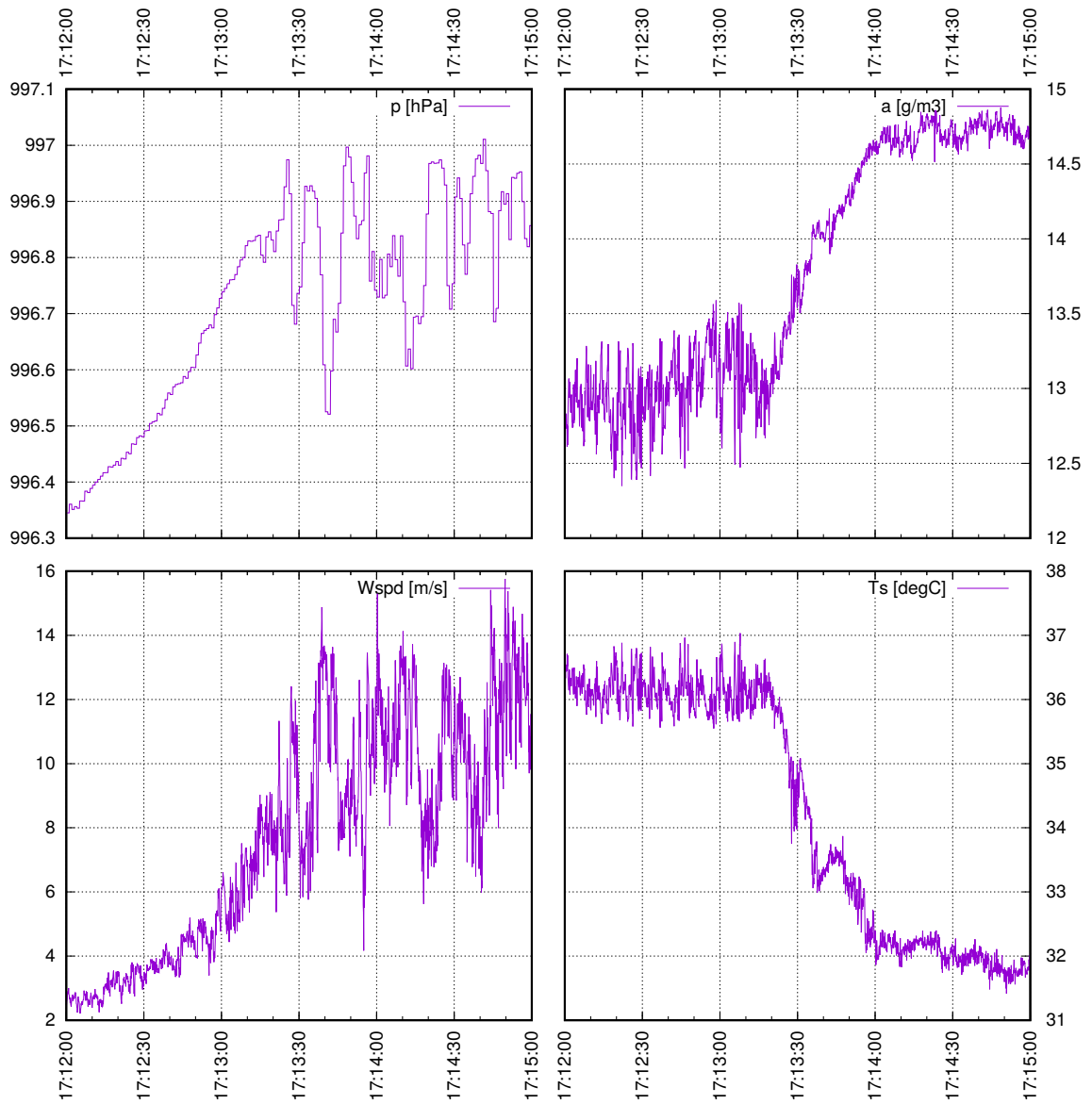
A SPECI észlelések egyes, a fentihez hasonló esetekben nem elegendőek arra, hogy egy *közeledő* veszélyhelyzetre felkészítsék a levegőben tartózkodó repülőgépek pilótáit. Szükség lehet a repülőtér környékén, illetve az irányítótoronytól távol a futópálya mentén olyan mikrometeorológiai mérőrendszer kiépítése, mely a standard meteorológiai elemek mellett a turbulenciáról is tájékoztat. Ez nagyban segíti az észlelőt, illetve a repülésvezető munkáját kritikus időjárási helyzetekben, így növelve a kisépéses repülés biztonságát.



**3.42. ábra:** Fél órás átlagok és turbulens karakterisztikák a TurbulenzKnecht-3.11 (Mauder and Foken, 2015) szoftverrel számolva a CSAT3–EC150 rendszer adatsoraiból. Felülről lefelé bal oldalt a légnyomás, a szélereőség és szélirány (zöld), a szónikus hőmérséklet és az abszolút nedvesség. Bal oldalt a szenzibilis és latens (zöld) hőáram, a turbulens kinetikus energia, valamint a szónikus hőmérséklet és a nedvesség szórása.



**3.43. ábra:** A nagyfrekvenciás adatok a porvihart körülölelő időszakban: légnyomás (jobbra fent), szélesség (jobbra lent), nedvesség (balra fent), szónikus hőmérséklet (balra lent).



3.44. ábra: A nagyfrekvenciás adatok a porvihar érkezésekor.

## 4. Összefoglalás

2015 nyarán részt vettem a PABLS-2015 Szegedi Planetáris Határréteg Mérési Expedícióban. Feladatom – a terepi mérésekben való részvétel mellett – a kampány utáni időszakban a nagy frekvenciás örvény-kovariancia mérések feldolgozása volt. A munka első lépéseként megismerkedtem a turbulens áramszámítás módszertanával, az alkalmazott minőségbiztosítási és korrekciós eljárásokkal és a rendelkezésre álló adatfeldolgozó szoftverekkel.

A gyakorlati munka kezdeti fázisában a METEK szónikus anemométer és a CSAT3–EC150 műszeregyüttes által mért 10 Hz-es felbontású mérések adatbázisba rendezésével foglalkoztam. A mérőrendszer több technikai hibájára is fény derült, melyek közül a legjelentősebb a különböző adatgyűjtők által rögzített időpontok eltérése volt. Az inkonzisztencia oka a műszerórák pontatlansága, valamint az áramszünetek alatti működőképesség különbözősége volt. Több módszerrel próbálkoztunk az eredeti időpontok helyreállításával, melyhez a fő referencia a repülőtéri észlelések SPECI táviratai voltak. Megállapítottuk, hogy a METEK szenzor frekvenciája nem pontosan 10 Hz. A két szónikus anemométer időjeleit a kereszt-korreláció maximalizálásával, illetve a két óra eltolódási sebességének meghatározásával, majd a METEK adatsor szűrésével („ritkítésével”) harmonizáltuk. A két illesztett mérési adatsor (METEK, CSAT3) közötti kereszt-korreláció maximumhelye a teljes mérési periódusban (2015. július-szeptember)  $\pm 1,5$  percen belül változott. Ezután kezdődött a tényleges adatfeldolgozás, a turbulencia-karakterisztikák számítása.

Két programcsomagot használtunk, egy pedig tesztelés alatt áll:

- A Bayreuth-i Egyetemen fejlesztett TurbulenzKnecht-3.11 (*Mauder and Foken*, 2015) szoftvert, saját számítógépeimen (egy Win7 és egy Ubuntu16.04 platformon), valamint az ELTE *atlasz* szuperszámítógépén (Debian környezet) futtattam.
- A LI-COR<sup>TM</sup> EddyPro<sup>®</sup> 6.0 (*LI-COR*, 2015) programcsomagot, majd
- A Campbell<sup>TM</sup> EdiRe<sup>®</sup> szoftvert (tesztelés alatt) egy Win7 operációs rendszerrel működő számítógépen használtam.

Az első tesztfuttatások után megtörtént a nagyfrekvenciás adatok feldolgozása. Elsőként a 10 Hz-es mérésekből (szinkronizált adatbázis) számított meteorológiai állapotjelzők 1, 5 és 10 perces átlagait hasonlítottuk össze egymással (két szónikus anemométer és az 1 perc átlagolással gyűjtött műszerek) az OMSZ Szegedi Magaslégköri Obszervatórium (12982) SYNOP távirataival. Mind egymáshoz, mind a meteorológiai táviratokhoz viszonyítva jó egyezést kaptunk. Az eltéréseket a két szónikus anemométer elhelyezésével (műszerek magasságával, egymáshoz képesti távolságukkal) magyarázhattuk.

A szinoptikus állomáson végzett mérésekkel történt történt összevetés során tapasztalt eltérések az időjárási helyzettel, illetve az eltérő mérési feltételekkel (műszer-magasság, a két mérőhely 1,8 km-es távolsága) magyarázhatók. Az elkészült összehangolt nagyfrekvenciás adatsorok egymással konzisztensek, alkalmasak további feldolgozásra.

A technikai munka után a turbulens karakterisztikák, köztük a turbulens áramok meghatározása a két korábban adaptált program felhasználásával különböző beállítások mellett. A turbulens áramok átlagos napi meneteit összevetettük a sugárzási mérleg adatsoraival. Maradék tagként meghatároztuk a talajba jutó hőáramot. Kiszámoltuk, hogy napi átlagban az energiamérleg lezárási hibája a legrosszabb esetben sem éri el a  $20 \frac{\text{W}}{\text{m}^2}$ -t.

Végezetül egy esettanulmány segítségével szemléltettem a mikrometeorológiai mérések repülésmeteorológiai alkalmazását. A szegedi repülőtéren áthaladó kifutófront során mértük a megerősödött szelet, a hirtelen hőmérséklet-csökkenést, és a szinoptikus állomáson is észlelt porvihar hatását. Arra következtettünk, hogy a standard meteorológiai elemek legfeljebb perces felbontású észlelései mellett szükség van a turbulenciáról is tájékoztató mikrometeorológiai mérőrendszer elhelyezésére a repülőtér környezetében, vagy a futópálya mentén. A repülőtéri fejlesztéseknél ilyen irányban is érdemes gondolkodni, hiszen ez is hozzájárul a repülésbiztonság növeléséhez.

## 4.1. További tervek

Az eddigi főként technikai munka után következik majd a részletesebb meteorológiai feldolgozás, aminek első lépéseit mutattam be. A tervek között szerepel a már futó két adatfeldolgozó program mellett a Campbell<sup>TM</sup> EdiRe<sup>®</sup> adaptálása, illetve saját adatfeldolgozó modul fejlesztése.

## Köszönetnyilvánítás

Szeretném megköszönni Témavezetőmnek, dr. Weidinger Tamásnak, hogy felkeltette az érdeklődésemet a mikrometeorológiai kutatások iránt, s lehetővé tette mind a gyakorlati, mind az elméleti adatfeldolgozási munkában való részvételt. Köszönöm az ELTE Meteorológiai Tanszék munkatársainak, tanárainak, hogy a Tanszék hallgatója lehettem. Külön köszönet illeti még Gyöngyösi András Zénót és André Karolinát, a Tanszék doktoranduszait, korábbi TDK-dolgozatom témavezetőjét és társszerzőjét, akik a munka elején számos technikai és számítástechnikai probléma megoldásában segítettek. Köszönöm Tordai Ágoston Vilmos BSc-s hallgatótársamnak a szegedi mérési expedíció adatbázis-építésében való részvételt. Köszönettel tar-

tozom még a terepi mérések alkalmával nyújtott segítségükért Nagy Zoltánnak, az OMSZ Légekörfizikai és Méréstechnikai Osztály vezetőjének, dr. Bordás Árpádnak, a zentai Bolyai János Gimnázium tanárának, dr. Joan Cuxart-nak és Gemma Simó Diego-nak, a Palma de Mallorca-i Baleári Egyetem (Universitat de les Illes Balears) kutatóinak hasznos tanácsaikért.

## Hivatkozások

- Ács, F. (2008), *A talaj-növény-légkör rendszer meteorológiai alkalmazású modellje*, 249 pp., ELTE Eötvös, Budapest.
- André, J.C., and P. Lacarrère (1980), Simulation numérique détaillée de la couche limite atmosphérique. comparaison avec la situation des 2 et 3 juillet 1977 à voves, *La Météorologie*, 22, 6–49.
- Arya, S.P. (2001), *Introduction to Micrometeorology*, 447 pp., Academic Press, San Diego.
- Aubinet, M., T. Vesala, and D. Papale (2012), *Eddy Covariance*, Springer Netherlands, Dordrecht.
- Barcza, Z. (2001), Long term atmosphere/biosphere exchange of co 2 in hungary, Ph.D. thesis, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest.
- Beyrich, F., and D.A.M. Engelbart (2008), Ten years of operational boundary-layer measurements at the richard - aßmann observatory lindenber: The role of remote sensing, 1(1), 012,026.
- Blackadar, A.K. (1997), *Turbulence and Diffusion in the Atmosphere*, 185 pp., Springer.
- Bradley, E.F., and O.T. Denmead (1967), *The Collection and Processing of Field Data*, Interscience, New York.
- Brost, R.A., and J.C. Wyngaard (1978), A model study of the stably stratified planetary boundary layer, *J. Atmos. Sci.*, 35(8), 1427–1440.
- Buckingham, E. (1914), On physically similar systems; illustrations of the use of dimensional equations, *Phys. Rev.*, 4(4), 345–376.
- Budyko, M.I. (1961), The heat balance of the earth's surface, *Sov. Geogr.*, 2(4), 3–13.



- Clarke, R.H., A.J. Dyer, R.R. Brooke, D.G. Reid, and A.J. Troup (1971), The wangara experiment: Boundary layer data, *Tech. Rep. 19*, Commonwealth Scientific and Industrial Research Organization, Aspendale.
- Cohen, A.E., S.M. Cavallo, M.C. Coniglio, and H.E. Brooks (2015), A review of planetary boundary layer parameterization schemes and their sensitivity in simulating southeastern u.s. cold season severe weather environments, *Wea. Forecasting*, 30(3), 591–612.
- Cuxart, J., A.A.M. Holtslag, R.J. Beare, E. Bazile, A. Beljaars, A. Cheng, L. Conangla, M. Ek, E. Freedman, R. Hamdi, A. Kerstein, H. Kitagawa, G. Lenderink, D.C. Lewellen, J. Mailhot, T. Mauritsen, V. Perov, G. Schayes, G.-J. Steeneveld, G. Svensson, P.A. Taylor, W. Weng, and S.W.K.-M. Xu (2006), Single-column model intercomparison for a stably stratified atmospheric boundary layer, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 118(2), 273–303.
- Cuxart, J., T. Weidinger, B. Wrenger, B. Matjacic, G.S. Diego, D. Martinez-Villagrasa, Árpád Bordás, Ágoston Tordai, P. Torma, and Z. Nagy (2016), Nocturnal surface thermal inversions in the pannonian basin, *EMS Annual Meeting Abstracts*, 13.
- Foken, T., and C.J. Nappo (2008), *Micrometeorology*, 320 pp., Springer Science and Business Media.
- Foken, T., and B. Wichura (1996), Tools for quality assessment of surface-based flux measurements, *Agric. Forest Meteorol.*, 78(1-2), 83–105.
- Foken, T., M. Göckede, M. Mauder, L. Mahrt, B. Amiro, and W. Munger (2004), Post-field data quality control, in *Handbook of Micrometeorology*, Atmospheric and Oceanographic Sciences Library, pp. 181–208, Springer Netherlands; Kluwer.
- Forrai, S. (1964), A standard hibaellipszis és a kiegyenlítő egyenesek Összefüggései, *A Nehézipari Műszaki Egyetem Közleményei*, 10, 129–145.
- Fratini, D., and M. Mauder (2014), Towards a consistent eddy-covariance processing: an intercomparison of eddypro and tk3, *Atmos. Meas. Tech.*, 7(7), 2273–2281.
- Gregory, K.J., and D.E. Walling (1979), *Man and environmental processes*, Dawson.
- Hanjalić, K. (1994), Advanced turbulence closure models: a view of current status and future prospects, *Int. J. Heat Fluid Flow*, 15(3), 178–203.
- Harrison, R.M. (1999), *Understanding our Environment*, 472 pp., The Royal Society of Chemistry.

- Hess, G.D., B.B. Hicks, and T. Yamada (1981), The impact of the wangara experiment, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 20(2), 135–174.
- Izumi, Y. (1971), Kansas 1968 field program data report, *Tech. Rep. 72*, Air Force Cambridge Research Laboratories.
- Izumi, Y., and J.S. Caughey (1976), Minnesota 1973 atmospheric boundary layer experiment data report., *Tech. rep.*, Air Force Cambridge Research Labs Hanscom AFB Mass.
- Kaimal, J.C., and J.J. Finnigan (1994), *Atmospheric Boundary Layer Flows: Their Structure and Measurement*, 304 pp., Oxford University Press.
- Kaimal, J.C., J.C. Wyngaard, Y. Izumi, and O.R. Coté (1972), Spectral characteristics of surface-layer turbulence, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 98(417), 563–589.
- Kampé de Fériet, M.-J. (1949), Sur un problème d’algèbre abstraite posé par la définition de la moyenne dans la théorie de la turbulence, *Ann. Soc. Sci. Bruxelles I.*, 63, 165–180.
- Karcher, D., H.-T. Mengelkamp, and T. Foken (2009), The residual of the energy balance closure and its influence on the results of three svat models, *Meteorol. Z.*, 18(6), 647–661.
- King, R.N., P.E. Hamlington, and W.J.A. Dahm (2016), Autonomic closure for turbulence simulations, *Phys. Rev. E*, 93(3), 031,301.
- Kohsiek, W., C. Liebenthal, T. Foken, R. Vogt, S.P. Oncley, C. Bernhofer, and H.A.R. de Bruin (2007), The energy balance experiment ebex-2000. part iii: Behaviour and quality of the radiation measurements, *Bound.-Lay. Meteorol.*, (1), 55–75.
- Kolmogorov, A.N. (1941), Equations of turbulent motion in an incompressible fluid., *Akad. Nauk. SSSR Dokl.*, 30, 299–303.
- Kundu, P.K., I.M. Cohen, and D.R. Dowling (2011), *Fluid Mechanics*, 5 ed., 920 pp., Academic Press, Waltham, MA.
- Lee, C.K., and M.-J. Wen (2010), A multivariate weibull disitribution, *Pak. J. Stat. Oper. Res.*, 5(2), 55–66.
- Lettau, H.H., and B. Davidson (1957), *Exploring the atmosphere’s first mile*, Symposium Publications Division, Pergamon, London.

- LI-COR, Inc. (2015), *EddyPro®6 Help and User's Guide*, LI-COR, Inc., Lincoln, NE.
- Liu, H., G. Peters, and T. Foken (2001), New equations for sonic temperature variance and buoyancy heat flux with an omnidirectional sonic anemometer, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 100(3), 459–468.
- Mauder, M., and T. Foken (2015), *Documentation and Instruction Manual of the Eddy-Covariance Software Package TK3*, Univ. Bayreuth, Abt. Mikrometeorologie.
- Mauder, M., S.P. Oncley, R. Vogt, T. Weidinger, L. Ribeiro, C. Bernhofer, T. Foken, W. Kohsiek, H.A.R. de Bruin, and H. Liu (2007), The energy balance experiment ebex-2000. part ii: Intercomparison of eddy-covariance sensors and post-field data processing methods, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 123(1), 29–54.
- Mauder, M., M. Cuntz, C. Drüe, A. Graf, C. Rebmann, H.P. Schmid, M. Schmidt, and R. Steinbrecher (2013), *Agric. Forest Meteorol.*, 169, 122–135.
- Moeng, C.-H. (1984), A large-eddy-simulation model for the study of planetary boundary-layer turbulence, *J. Atmos. Sci.*, 41(13), 2052–2062.
- Moncrieff, J.B., J.M. Massheder, H.A.R. de Bruin, J.A. Elbers, T. Friberg, B.G. Heusinkveld, P. Kabat, S. Scott, H. Soergaard, and A. Verhoef (1997), A system to measure surface fluxes of momentum, sensible heat, water vapour and carbon dioxide, *J. Hydrol.*, 188, 589–611.
- Monin, A.S., and A.M. Obukhov (1954), Basic laws of turbulent mixing in the surface layer of the atmosphere, 151, 163–187.
- Moore, C.J. (1986), Frequency response corrections for eddy correlation systems, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 37(1-2), 17–35.
- Obuhov, A.M. (1962), Some specific features of atmospheric turbulence, *J. Fluid Mech.*, 13(1), 77–81.
- Oke, T.R. (2002), *Boundary Layer Climates*, 460 pp., Routledge, London and New York.
- Oncley, S.P., T. Foken, R. Vogt, W. Kohsiek, H.A.R. de Bruin, C. Bernhofer, A. Christen, E. van Gorsel, D. Grantz, C. Feigenwinter, I. Lehner, C. Liebenthal, H. Liu, M. Mauder, A. Pitacco, L. Ribeiro, and T. Weidinger (2007), The energy balance experiment ebex-2000. part i: overview and energy balance, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 123(1), 1–28.

- Prandtl, L. (1904), Über Flüssigkeitsbewegung bei sehr kleiner Reibung, in *Internationaler Math. Kongress Heidelberg*, p. 1.
- Reynolds, O. (1895), On the dynamical theory of incompressible viscous fluids and the determination of the criterion, *Philos. Trans. Roy. Soc. London A*, 186, 123–164.
- Rotta, J. (1951), Statistische Theorie nichthomogener Turbulenz, *Z. Physik*, 129(6), 547–572.
- Schotanus, P., F.T.M. Nieuwstadt, and H.A.R. de Bruin (1983), Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 26(1), 81–93.
- Stull, R.B. (1988), *An Introduction to Boundary Layer Meteorology*, 671 pp., Springer Science and Business Media.
- Taylor, G.I. (1938), The spectrum of turbulence, *Proc. Roy. Soc. London*, 164(919), 476–490.
- Tordai, Á.V. (2015), Adatfeldolgozási módszerek fejlesztése a 2015-ös PABLS határ-réteg mérési program során, Bsc szakdolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest.
- Tordai, Á.V. (2016), Mikrometeorológiai mérőrendszer kialakítása és alkalmazása síkvidéki, magashegyi és barlangi körülmények között, TDK dolgozat, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék, Budapest.
- van der Hoven, I. (1957), Power spectrum of horizontal wind speed in the frequency range from 0.0007 to 900 cycles per hour, *J. Meteorol.*, 14(2), 160–164.
- van der Molen, M.K., J.H.C. Gash, and J.A. Elbers (2004), Sonic anemometer (co)sine response and flux measurement: Ii. the effect of introducing an angle of attack dependent calibration, *Agric. Forest Meteorol.*, 122(1–2), 95–109.
- Večenaj, Ž., and S.S.J. De Wekker (2015), Determination of non-stationarity in the surface layer during the T-REX experiment, *141*(690), 1560–1571.
- Vickers, D., and L. Mahrt (1997), Quality control and flux sampling problems for tower and aircraft data, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 14(3), 515–526.
- Villanueva, D., A. Feijóo, and J.L. Pazos (2013), Multivariate weibull distribution for wind speed and wind power behavior assessment, *Resources*, 2(3), 370–384.

- Webb, E.K., G.I. Pearman, and R. Leuning (1980), Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer, *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 106(447), 85–100.
- Wieser, A., F. Fiedler, and U. Corsmeier (2001), The influence of the sensor design on wind measurements with sonic anemometer systems, *J. Atmos. Ocean. Technol.*, 18(10), 1585–1608.
- Wilczak, J.M., S.P. Oncley, and S.A. Stage (2001), Sonic anemometer tilt correction algorithms, *Bound.-Lay. Meteorol.*, 99(1), 127–150.