

HEGYHÁTSÁL TÉRSÉGÉBEN VÉGZETT REPÜLŐGÉPES MÉRÉSEK FELDOLGOZÁSA ÉS ELEMZÉSE

EÖTVÖS LORÁND TUDOMÁNYEGYETEM
TERMÉSZETTUDOMÁNYI KAR
METEOROLÓGIAI TANSZÉK



Készítette:

WENHARDT TAMÁS

Témavezetők:

DR. BARCZA ZOLTÁN

ELTE TTK Meteorológiai Tanszék

DR. HASZPRA LÁSZLÓ

Országos Meteorológiai Szolgálat

Budapest, 2009

Tartalomjegyzék

Tartalomjegyzék.....	2
1. Bevezetés.....	3
2. A planetáris határréteg	5
3. Felhasznált adatok és módszerek	8
3.1. Repülőgépes mérések	8
3.2. A keveredési réteg magasságának meghatározása a részecskemódszerrel (“parcel method”).....	10
3.3. A keveredési réteg magasságának meghatározása a kibővített részecskemódszerrel (“advanced parcel method”)	11
3.4. A keveredési réteg magasságának meghatározása a virtuális potenciális hőmérsékleti-, CO ₂ - és specifikus nedvességprofilok segítségével.	14
3.5. A keveredési réteg magasságát kiszámító modell bemutatása.....	17
4. Eredmények.....	19
4.1. Részecskemódszer által kapott eredmények	19
4.1.1. Részecskemódszerrel nem meghatározható a PHR magassága	19
4.1.2. Részecskemódszerrel meghatározható a PHR magassága	20
4.2. Kibővített részecskemódszer.....	21
4.3. Több profil felhasználásával nyert eredmények.....	23
4.4. A Yi et al. (2001) modell által kapott eredmények	23
4.5. Az eredmények összehasonlítása	25
4.5.1 A részecskemódszer és kibővített részecskemódszer összehasonlítása	26
4.5.2 A részecskemódszer és a profilok által nyert eredmények összehasonlítása	27
4.5.3 Az ECMWF modelladatok összehasonlítása a részecskemódszer által kapott eredményekkel	28
4.5.4 A Yi et al. (2001) modell által kapott eredmények összehasonlítása.....	34
Összefoglalás.....	39
Köszönetnyilvánítás	40
Irodalomjegyzék.....	41
Függelék	43

1. Bevezetés

A globális éghajlatváltozás problémája lassan beszivárog a hétköznapi emberek gondolataiba is, szinte nem telik el olyan hét, mikor a média nem foglalkozik e témával. E tény a kutatók számára egyre több feladatot és nagyobb felelősséget jelent, hiszen pontos és tudományosan megalapozott információra van szükségük a döntéshozóknak a helyes lépések megtételére annak érdekében, hogy csökkentsék az éghajlatváltozás kockázatát (IPCC, 2007). Eközben az éghajlati rendszer még mindig számos titkot rejt magában, bizonyos mechanizmusokat, visszacsatolásokat még mindig nem ismerünk kielégítő pontossággal. Az éghajlati modellek fejlesztése, pontosítása pedig egyre több mérési adatot követel meg.

A magyarországi üvegházhatású gázok kutatásának első komplex mérőhelye a nyugat-magyarországi Hegyhátsál település mellett lévő TV adótorony (1. ábra) (Haszpra és Barcza, 2005). A légköri szén-dioxid-koncentráció (CO_2) mérése 1994-ben indult meg itt, jelenleg négy magassági szinten történik nagy pontosságú CO_2 -koncentráció és ehhez kapcsolódó meteorológiai mérés. A bioszféra és a légkör közötti szén-dioxid-kicserélődés mérése 1997 óta zajlik Hegyhátsálon (Haszpra et al., 2001). 2001 óta a TV adótorony feletti repülőgépes mérések nyújtanak további információt a térség üvegházgáz mérlegéről (1. ábra). A komplex mérőrendszer 2006 eleje óta egyéb üvegházhatású gázok (metán, dinitrogén-oxid, kénhexafluorid) mérésével is kiegészült (Kovács, 2006; Haszpra et al., 2008).



1. ábra. A Hegyhátsáli TV adótorony (bal oldal) és a légköri mérésekre használt repülőgép (jobb oldal)

A 2001-ben elkezdett repülőgépes, palackos levegő-mintavételen alapuló méréseket 2006 januárjától *in-situ* CO₂-mérések egészítették ki. A korábbi havi egyszeri, hét mintavételi szinten végrehajtott mérés mellett egy új műszer (AOS – Atmospheric Observing Systems, Inc. – szén-dioxid analízátor) lehetőséget teremtett nagy pontosságú és nagy időbeli felbontású adatok rögzítésére. Az AOS rendszerrel 205 mérésre került sor. 2007. június óta egy Campbell Scientific CS215 típusú hőmérséklet- és relatívnedvesség-mérő szenzornak köszönhetően rendelkezésre állnak a CO₂-koncentrációk mellett másodperces időbeli felbontásban az alapvető meteorológiai adatok is.

Munkám során elvégeztem a Campbell-Scientific CS215 műszer adatainak feldolgozását és szinkronizálását az AOS műszer által szolgáltatott CO₂ adatokkal. A Campbell műszer adataiból előállítottam a hőmérsékleti, virtuális potenciális hőmérsékleti, relatív nedvességi, specifikus nedvességi profilokat a légkör alsó 3000 méteres rétegére vonatkozóan. Az AOS műszer által szolgáltatott adatokból elkészítettem a CO₂ profilokat, szintén a légkör alsó 3000 méteres rétegére.

A szakdolgozatom célja, hogy a planetáris határréteg szerkezetét vizsgáljam a rendelkezésre álló repülőgépes mérési adatok segítségével úgy, hogy használjam a CO₂ és a vízgőz függőleges profiljában rejlő információt a számítások pontosítása érdekében.

A Magyarországon egyedi adatbázis alapján dolgozatomban a PHR magasságszámítás eredményeit mutatom be. A PHR tulajdonságainak vizsgálatait a szinoptikus helyzet elemzésével egészítem ki. A kapott eredményeket más forrásból származó adatokkal vetem össze: egyrészt az Európai Középtávú Időjárás-előrejelző Központ (ECMWF), másrészt egy adaptált modell segítségével számított PHR magasság értékekkel (Yi et al., 2001).

A PHR szerkezetének meghatározásával és modellezésével lehetőség nyílik, hogy a hegyhátsági régióban jobban megértsük és megismerjük a függőleges szén-dioxid-kicserélődés és horizontális szén-dioxid-advekciónak a dinamikáját, valamint a felszínközeli és magasabban elhelyezkedő légrétegek közötti szén-dioxid-kicserélődés mechanizmusát (lásd pl. Bakwin et al., 2004).

2. A planetáris határréteg

Életünk túlnyomó részét a földfelszín közvetlen közelében töltjük. Bár számunkra az itt zajló folyamatok megszokottak, talán kevésbé ismert, hogy meteorológiai szempontból a felszínközeli karakterisztikák nem jellemzőek a légkör nagy kiterjedésű részeire. Az egyik fő oka ennek a különbségnek a felszín hatása, ami határfelületként lép fel a légköri áramlások szempontjából (Stull, 1988).

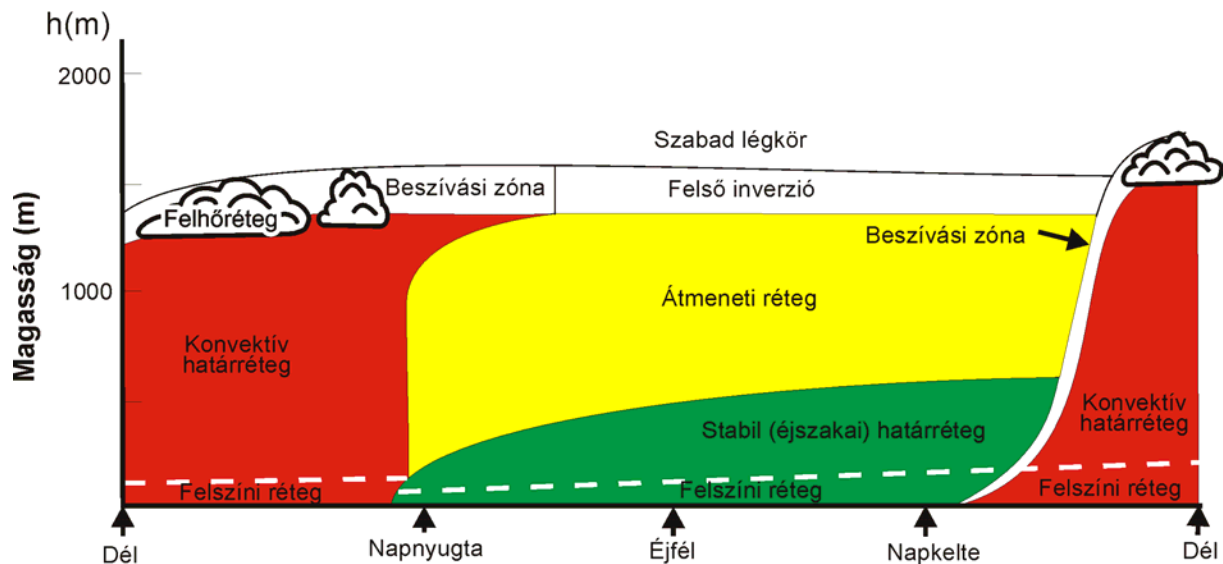
A troposzféra magassága közepes földrajzi szélességeken kb. 11 km, de általában csak az alsó 1-3 kilométernyi levegőt befolyásolja a földfelszín. A légkörnek ezt a rétegét, amelynek tulajdonságait közvetlenül módosít az alatta elhelyezkedő felszín, planetáris határrétegnek (PHR) nevezzük, amelynek vastagsága tipikusan 0,2 és 3 km között változik. A PHR-et a troposzféra egy részeként definiáljuk, mely a földfelszín jelenlétének közvetlen hatása alatt áll, és kb. egy órás időintervallumon belül reagál a felszíni hatásokra (Stull, 1988; Seibert et al., 2000). Természetesen igaz, hogy közvetve az egész troposzférára kiterjednek a felszín hatásai, hiszen a PHR és a szabad troposzféra között is van keveredés, de a határrétegen kívüli tartomány csak lassan reagál a felszíni hatásokra. Ezért szerepel a PHR definíciójában az egy órás időskála. Ez nem azt jelenti, hogy ezen idő alatt egyensúlyba kerül a PHR, hanem azt, hogy a változások ennyi időn belül biztosan érzékelhetővé válnak, pl. változik a PHR magassága, vagy a turbulens kicserélődés erőssége.

A planetáris határréteg az emberi tevékenység színtere, itt helyezkednek el a különböző szennyezőanyag-források, itt található a növényzet túlnyomó része. A PHR magassága és áramlási rendszere meghatározza a kibocsátási helyről elsodródó szennyeződés mozgását, hígulását. A PHR-ben játszódnak le az ülepedési folyamatok, vagyis sok esetben itt kezdődik és fejeződik is be az éghajlatváltozás szempontjából fontos üvegházhatású gázok, szennyezőanyagok légköri körforgalma.

A planetáris határréteg szerkezetét a felszíni kényszerek befolyásolják. Ezek közé tartozik a sűrűlódás, a turbulens hőszállítás és a domborzat áramlásmódosító hatása. A planetáris határrétegben zajlanak a függőleges anyag- és tulajdonságszállítási folyamatok: az impulzus, a szenzibilis hő valamint a látens hőszállítás, a szén-dioxid-kicserélődés valamint a szennyezőanyagok transzportja. A PHR vastagsága időben és térben is változik, de jellegzetes napi menettel rendelkezik (2. ábra).

A PHR-en belül a legfontosabb átviteli folyamat a turbulencia, ennek erőssége befolyásolja a PHR magasságváltozását. A határrétegen kívül turbulencia elsősorban a

konvektív úton keletkező felhőkben, valamint az alacsony és a magas szintű futóáramlások környezetében figyelhető meg, erős szélnyírás jelenlétében (Stull, 1988).

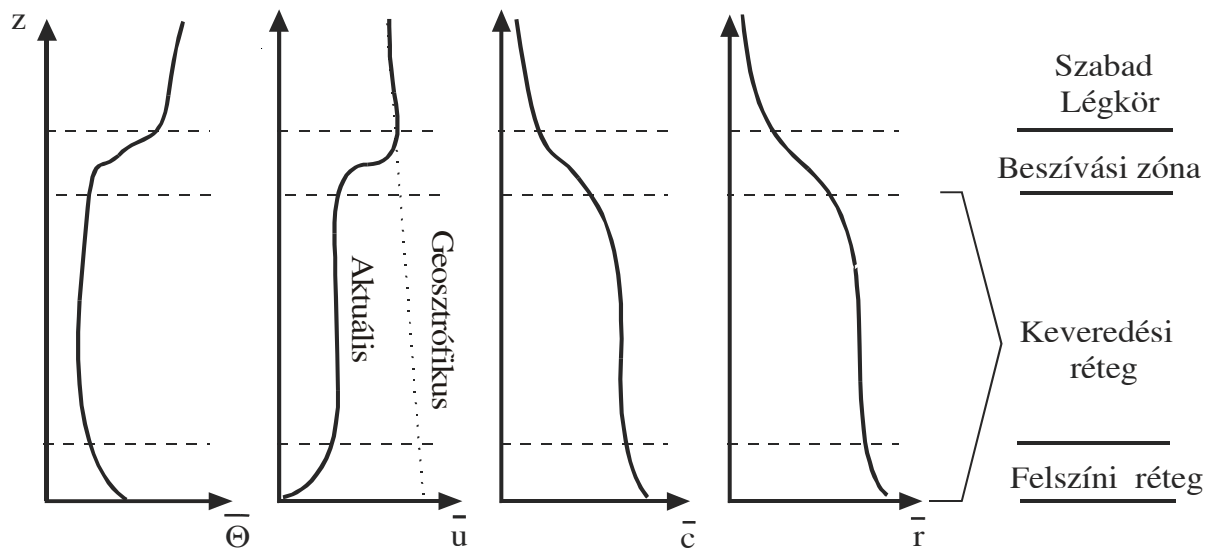


2. ábra. A planetáris határréteg jellegzetes napi menete (Stull, 1988 alapján).

Ahogy a 2. ábrán látható, a konvekció felhőmentes esetben napfelkelte után kb. fél órával indul meg, és energia-utánpótlását a naplementét megelőző órákban veszíti el. A planetáris határréteg kora délután éri el maximális vastagságát, amit nemcsak a felszín közeléből induló örvénytestek, hanem a PHR felső határán kialakuló légbeszívás, vagyis a kevésbé turbulens levegő felülről történő bekeveredése is alakít. Míg a konvektív PHR vastagsága 1–2 km, a konvektív felszínközeli rétegé kb. 50–150 m.

Az intenzív turbulens kicserélődés eredményeként a virtuális potenciális hőmérséklet-, a nedvesség- és a szennyezőanyag-koncentráció alig változik a magassággal (3. ábra). A keveredési réteg (angolul „mixed layer”) alatt azt a légréteget értjük, ahol a felszínközeli forrásokból származó szennyezőanyag átkeveredik, homogén függőleges koncentrációt hozva létre. Megjegyezzük, hogy a légszennyeződésmeteorológiában használt keveredési réteg fogalmát első megközelítésben a planetáris határréteggel azonosíthatjuk. Abban az esetben, ha több egymás feletti inverziós réteg alakul ki az alsó troposzférában, akkor a keveredési réteg

legfeljebb az első inverziós szintig terjed, míg a PHR, vagyis a felszín hatását kifejező réteg e fölé is nyúlhat.



3. ábra. A konvektív PHR jellegzetes átlagos potenciális hőmérséklet ($\bar{\Theta}$), szélesség (\bar{u}), szennyezőanyag koncentráció (\bar{c}) és vízgőz keverési arány (\bar{r}) profiljai (Stull, 1988).

A virtuális potenciális hőmérsékleti profil közel adiabatikus a keveredési rétegben. A felszínközeli rétegben, közvetlenül a talaj felett gyakran található egy ún. super-adiabatikus réteg. A keveredési réteg tetején lévő stabilis réteg záróréteget jelent az emelkedő termikek számára, ami elég erős ahhoz, hogy hőmérsékleti inverziót hozzon létre. A konvektív határréteg növekedésekor, az inverziós réteg emelkedésekor a PHR „beszívja”, bekebelezi a szabad troposzféra levegőjét: ez a beszívási zóna. Itt keveredik be a külső levegő a homogén határrétegbe, és részben ez biztosítja a PHR és a szabad troposzféra közötti levegő- és nyomanyag kicserélődést.

A dolgozatban bemutatásra kerülő vizsgálatok során a keveredési réteg magasságát határozzuk meg. Ha a beszívási zóna vastagsága elhanyagolható a keveredési réteg magasságához képest, akkor az eredményeink a PHR magasságaként is értelmezhetők.

3. Felhasznált adatok és módszerek

3.1. Repülőgépes mérések

A CARBOEUROPE-IP nevű EU6 pályázat keretén belül a 2006-2008 időszakban zajlott a CO₂ koncentráció függőleges profiljának *in-situ* meghatározása Hegyhátsál közelében. Átlagosan heti 2 repülőgépes mérés történt, így nagy időbeli felbontással kaptunk információt a planetáris határréteg szerkezetéről, illetve a határrétegben és közvetlenül felette uralkodó CO₂ keverési arányról.

A repülőgépes mérések során két mérőműszert használtunk: az egyik az AOS (Atmospheric Observing Systems, Inc.¹) által gyártott szén-dioxid-analizátor, míg a másik a 2007 júniusa óta üzemelő Campbell Scientific gyártmányú CS215² hőmérséklet- és relatívnedvesség-mérő műszer. A mérés során keletkező adatok memóriakártyára kerülnek, és az ELTE Meteorológiai Tanszék számítógépein kerülnek archiválásra.

A keveredési réteg magassága több módszerrel is meghatározható. *In-situ* mérési adatok (repülőgépes mérések, rádiószondás felszállások, ballonos mérések) segítségével származtatható (Coulter, 1979; Kaimal et al., 1981; Seibert et al., 2000; Hennemuth and Lammert, 2006), illetve különböző numerikus módszerekkel modellezhető (Seibert et al., 2000; Yi et al., 2001)

Az egyik legmegbízhatóbb módszer a virtuális potenciális hőmérséklet meghatározásán alapul, ezért elsőként ennek származtatását végeztük el.

Virtuális hőmérsékletnek azt a hőmérsékletet nevezzük, amit a száraz levegő felvenne, ha az adott nyomáson a sűrűsége megegyezne az r [kg/kg] vízgőz keverési arányú levegő hőmérsékletével:

$$t_v = t(1 + 0,608 * r) \quad (1)$$

ahol t_v a virtuális hőmérséklet, és t a léghőmérséklet. Amennyiben a hőmérséklet helyett a potenciális hőmérsékletre alkalmazzuk az (1) egyenletet, eredményképpen a virtuális potenciális hőmérsékletet kapjuk.

¹ <http://www.aosinc.net/>

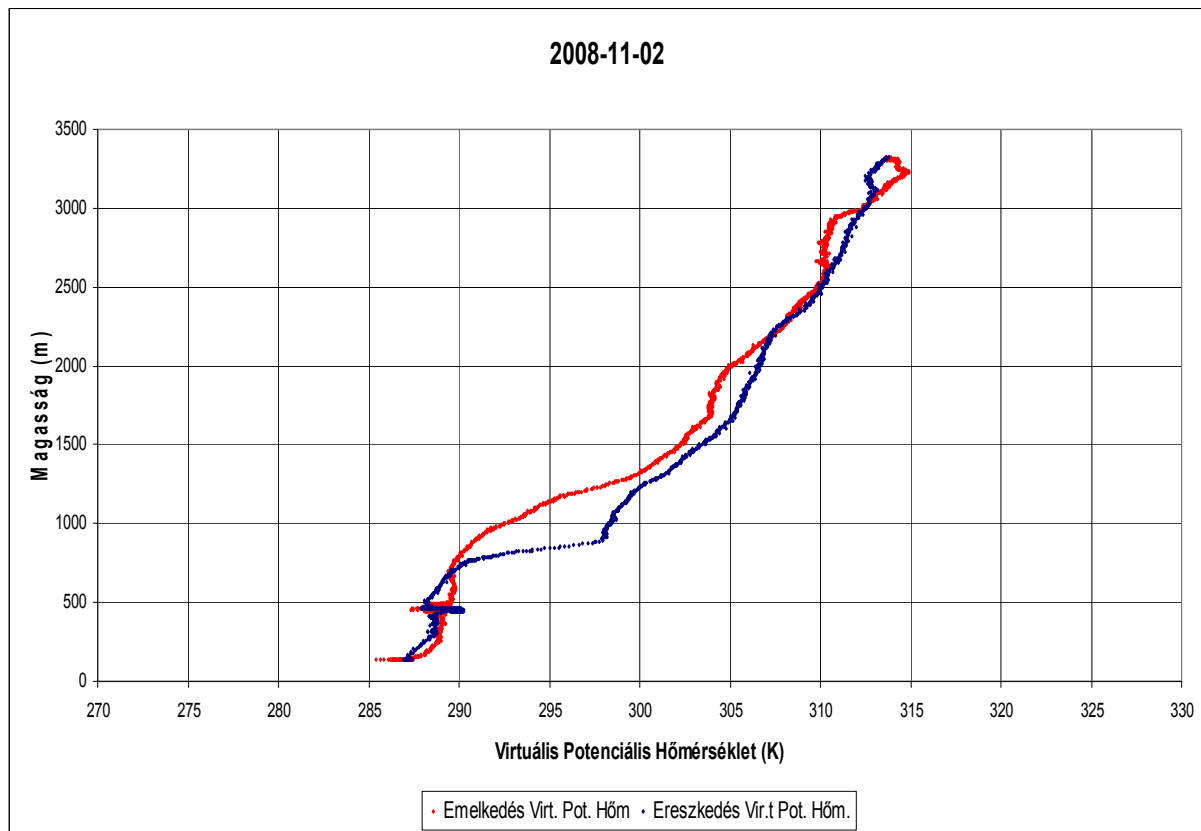
² <http://www.campbellsci.com/cs215>

Az adatok feldolgozása során az AOS műszer által regisztrált adatokból a CO₂ adatsorra, a légnyomás adatokra és a műszer által jegyzett időpontokra volt szükségem. A CS215 műszer által regisztrált adatokból mindent felhasználtam a virtuális potenciális hőmérséklet kiszámításához (relatív nedvesség, hőmérséklet, GPS által szolgáltatott földrajzi koordináták, magasság).

A virtuális potenciális hőmérséklet kiszámítása előtt korrekciókat kellett elvégezni a Campbell műszer által mért adatsoron. A felesleges adatokat törölni kellett az adatsorok elejéről és végéről. A következő lépésben egyeztetni kellett időpont szerint az adatsorokat, hogy a megfelelő nyomási időpontban, amit az AOS műszer mér, a megfelelő időpontban mért Campbell műszer általi érték legyen. Ehhez szükség van a Campbell műszer által szolgáltatott GPS órajelre, melyet dátummá kellett átalakítani. Miután elvégeztem az órajel átalakítását, szintén egy törlési periódus következett, hogy az adatsorok megegyező hosszúságúak legyenek. Itt alkalmanként adatvesztés lép fel, de mivel az adatok nyomásértékek nélkül számomra értéktelenek, így a fellépő veszteségtől eltekinthetünk. Miután a program elvégezte az adatsorok egyeztetését, következik a virtuális potenciális hőmérséklet kiszámolása.

Az adatok további feldolgozására Microsoft Excelben került sor, melyben ábrázoltam a virtuális potenciális hőmérsékletet a magasság függvényében (4. ábra). Minden egyes diagramhoz tartozik egy szinoptikus térkép, melyen az adott nap időjárási helyzet tekinthető meg. A szinoptikus térképet az Országos Meteorológiai Szolgálat által publikált napi időjárásjelentésekből vettük.

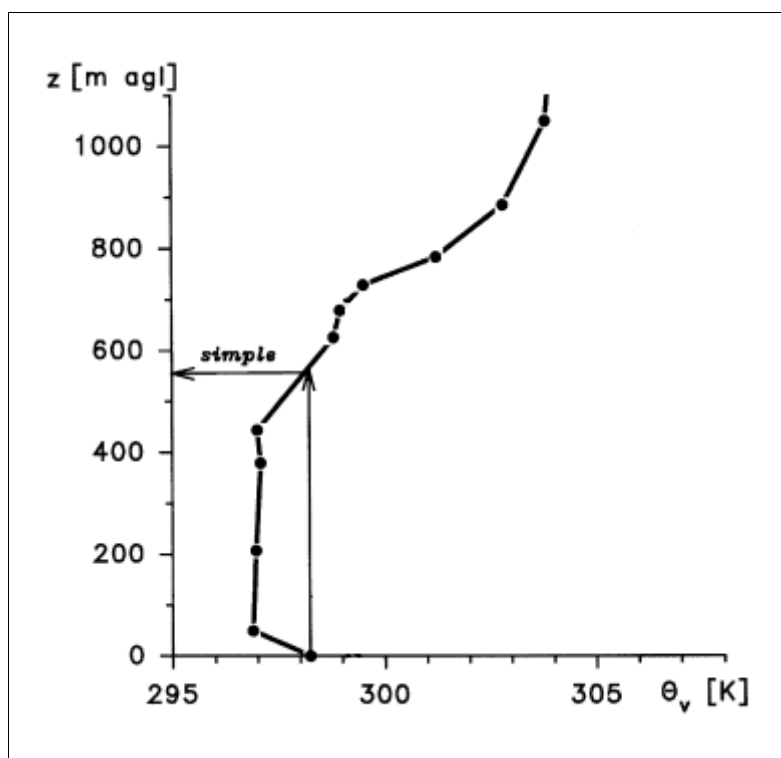
Az adatok feldolgozásával 71 darab teljes (összetett: emelkedő és leszálló ágat is tartalmazó) profil keletkezett, ami a további számítások alapját képezte.



4. ábra. Virtuális potenciális hőmérsékleti profil

3.2. A keveredési réteg magasságának meghatározása a részecskemódszerrel (“parcel method”)

A keveredési réteg magasságát elsőként a Holzworth (1964) által publikált ún. részecskemódszer segítségével határoztuk meg. A módszer alapját az képezi, hogy a magasság szerinti virtuális potenciális hőmérsékleti profilon megkeressük, hogy melyik az az első magassági szint, ahol a profil újra felveszi a kiindulási, azaz a felszínen vagy annak közelében mért virtuális potenciális hőmérsékleti értéket. Ezt az értéket megtalálva valószínűsíthető lehet, hogy ezen a magasságon található a PHR teteje, viszont figyelembe kell venni, hogy a profilban hol tapasztalható nagy virtuális potenciális hőmérsékleti ugrás, azaz ahol szakadás figyelhető meg a profil szerkezetében. Ezt és az előbb leírt módszert párosítva sok esetben egyértelműen meghatározhatjuk, hogy milyen magasan fekszik a planetáris határréteg teteje (5. ábra).



5. ábra. Holzworth (1964) által publikált ún. részecskemódszer sematikus vázlata, mely a virtuális potenciális hőmérséklet (θ_v) magasság szerinti (z) alakulását veszi figyelembe (Seibert et al. (2000) 1. ábrája alapján).

3.3. A keveredési réteg magasságának meghatározása a kibővített részecskemódszerrel (“advanced parcel method”)

A keveredési réteg magasságát nem csak a Holzworth (1964) által publikált ún. részecskemódszer segítségével határoztuk meg. A planetáris határréteg magasságát a Seibert et al. (2000) által publikált ún. kibővített részecskemódszerrel (angolul „advanced parcel method”) is meghatározhatjuk, pontosíthatjuk. A módszert akkor célszerű alkalmazni, amikor Holzworth (1964) módszerével a virtuális hőmérséklet magasság szerinti profiljának adataiból fakadóan nem lehetséges a keveredési réteg magasságának meghatározása.

Seibert et al. (2000) kimondja, hogy ha nem határozható meg egyértelműen a keveredési réteg magassága, akkor egy bizonyos virtuális potenciális hőmérsékleti értéket

$(\delta\Theta_v)$ hozzá kell adni a felszínen, vagy annak közelében mért virtuális potenciális hőmérsékleti értékhez (Θ_v), és az így összegzett értéknek megfelelően magassági szintet kell megkeresni a virtuális potenciális hőmérséklet magasság szerinti profilján. Ezzel sok esetben kiküszöbölhető az a jelenség, amikor a felszínről vagy annak közeléből indított virtuális potenciális hőmérséklet magasság szerinti profilján nem található meg újból a kiindulási érték.

A plusz virtuális potenciális hőmérsékleti tag $(\delta\Theta_v)$ [K] számítási módszerét Seibert et al. (2000) munkája alapján határoztuk meg:

$$\delta\Theta_v = C_1 \frac{\langle w'\Theta'_v \rangle}{\sqrt[3]{u_*^3 + C_2 w_*^3}} \quad (2)$$

ahol $\langle w'\Theta'_v \rangle$ a virtuális potenciális hőmérséklet felszíni árama [K.m/s], u_* az úgynevezett súrlódási sebesség (a mechanikus turbulencia erősségének skálaparamétere, mértékegysége m/s), w_* a konvekció sebességét jellemző skálaparaméter [m/s] (lásd alább), valamint $C_1=20$ és $C_2=0,6$ mértékegység nélküli paraméterek.

A (2) egyenletet alkalmazva kapjuk meg a felszínközeli plusz virtuális potenciális hőmérsékleti tagot. A képletben szereplő tagokat a hegyhátsági TV adótoronyra 82 méter magasan telepített eddy-kovariancia mérőrendszernek köszönhetően kaptuk meg (Barcza, 2001; Haszpra et al., 2005).

A hegyhátsági mérések feldolgozását először egy adatválogatással kezdtem, hogy az adott repülési időpontokban tekinthessük a megfelelő eddy-kovariancia méréseket. Fontos hogy a toronymérés adatai folyamatosan UTC+1-ben vannak megadva, míg a repülőgépes mérések adatait UTC-ben rögzítjük. Az eddy-kovariancia értékek órás átlagolásban vannak megadva. A legtöbb repülőgépes mérés a kétórás időtartamot is meghaladta, így átlagolással megkaphattuk a konkrét felszíni eddy-kovariancia mérés értékeit, melyek az adott repülési időtartamra vonatkoztak.

Az eddy-kovariancia mérésekből számunkra fontosabb adatok a súrlódási sebesség (u_*), a szenzibilis hőáram (H , mértékegysége W/m^2) és a levegő sűrűsége (ρ , mértékegysége kg/m^3). Ezen utóbbi értékek a (2) egyenlet számlálójában szereplő $\langle w'\Theta'_v \rangle$ virtuális potenciális hőmérséklet fluxusának kiszámításához szükségesek:

$$\langle w' \Theta'_v \rangle \approx \frac{H}{C_{pd} \rho} \quad (3)$$

ahol $C_{pd}=1004,67$ J/kg/K a száraz levegő állandó nyomáson vett fajhőjét jelenti.

A következő fontos lépés a w_* [m/s], azaz a konvektív sebesség kiszámítása (Barcza et al., 2005):

$$w_* = \left(\frac{g \overline{\langle w' \Theta'_v \rangle} h_1}{T} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4)$$

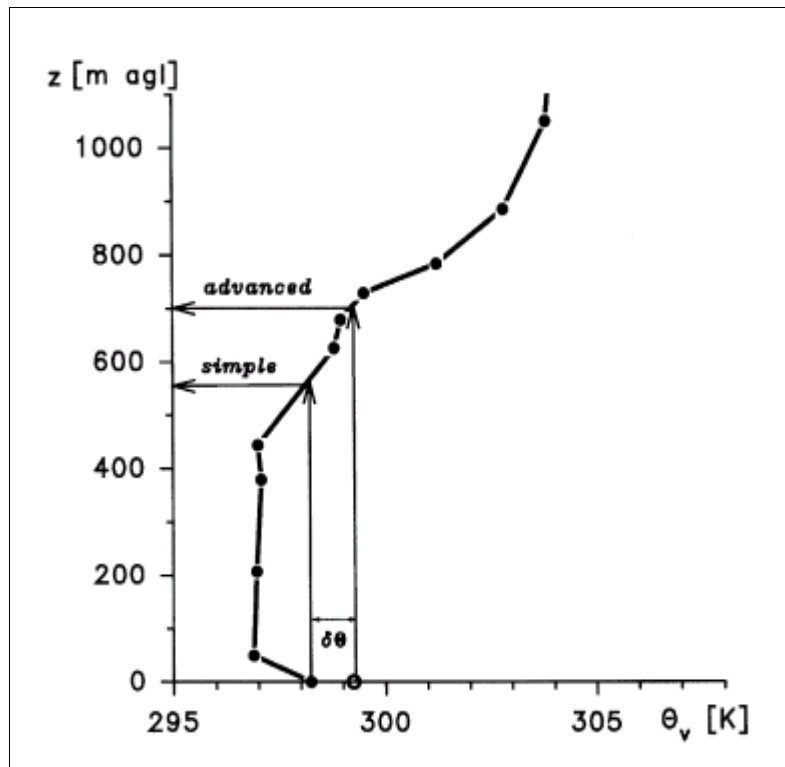
ahol a képletben szereplő g [m/s²] a gravitációs állandó, h_1 pedig a planetáris határreteg magasságának a priori értéke, T [K] pedig a felszíni hőmérséklet értéke. Ez utóbbi értéket szintén a hegyhátsáli toronymérés adataiból vettük.

A (4) képletben szereplő h_1 a priori planetáris határreteg-magasság a mi esetünkben az Európai Középtávú Időjárás-előrejelző Központ (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, ECMWF) által számított adat, melyet az operatív determinisztikus modell állít elő forecast időpontokra. Jelen esetben 3, 6, 9 és 12 UTC időpontokra az éjfélkor indított forecastból, míg 15, 18, 21 és 24 UTC időpontokra a 12 UTC-kor indított forecastból vettük az adatokat. Az adatok a T799L91 modellből származnak, 0,25×0,25 fokos térbeli felbontásban az ECMWF MARS adatbázisából. Az adatokat az Országos Meteorológiai Szolgálat munkatársai bocsátották rendelkezésünkre.

Az ECMWF a Richardson szám alapján számítja a planetáris határreteg magasságát. Azt a modellszintet tekintik a határreteg tetejének, ahol a modelladatok alapján számított Richardson szám elér egy bizonyos (0,25) kritikus értéket (bővebben lásd <http://www.ecmwf.int/research/ifsdocs/CY25r1/Physics/Physics-04-09.html>).

Az ECMWF határreteg-magasság adatokat nem csak a kibővített részecskemódszerhez használjuk fel, hanem az általunk számított mérési eredményekkel is összevetjük a későbbiekben.

A (2) egyenletben szereplő tagok kiszámítása után becsülhetjük a plusz virtuális potenciális hőmérsékleti tagot. Ezen tag segítségével meghatározható a planetáris határreteg (a posteriori) magassága (6. ábra).



6. ábra. A kibővített részecskemódszerrel megállapítható planetáris határréteg-magasság sematikus ábrája. A határréteg magasságát az „advanced” szó jelzi ez esetben (Seibert et al. (2000) 1. ábrája alapján).

3.4. A keveredési réteg magasságának meghatározása a virtuális potenciális hőmérsékleti-, CO_2 - és specifikus nedvességprofilok segítségével.

Ezt a kombinált módszert akkor célszerű alkalmazni, amikor Holzworth (1964) részecskemódszerével, illetve a Seibert et al. (2000) által publikált kibővített részecskemódszerrel nem lehetséges a PHR magasságának a meghatározása. Ebben az

esetben az adatfeldolgozás során előállítjuk a virtuális potenciális hőmérsékleti profilok mellett a specifikus nedvesség (7. ábra) illetve a CO₂ (8. ábra) profilokat is.

A specifikus nedvesség (S) a nedves levegő tömegegységében foglalt vízgőz tömegét fejezi ki, melynek definíciója a következő:

$$S = \frac{r}{1+r} \quad (5)$$

Az (5) egyenletben szereplő r tag a keverési arányt jelenti, melyet az alábbi egyenlet alapján számolunk ki.

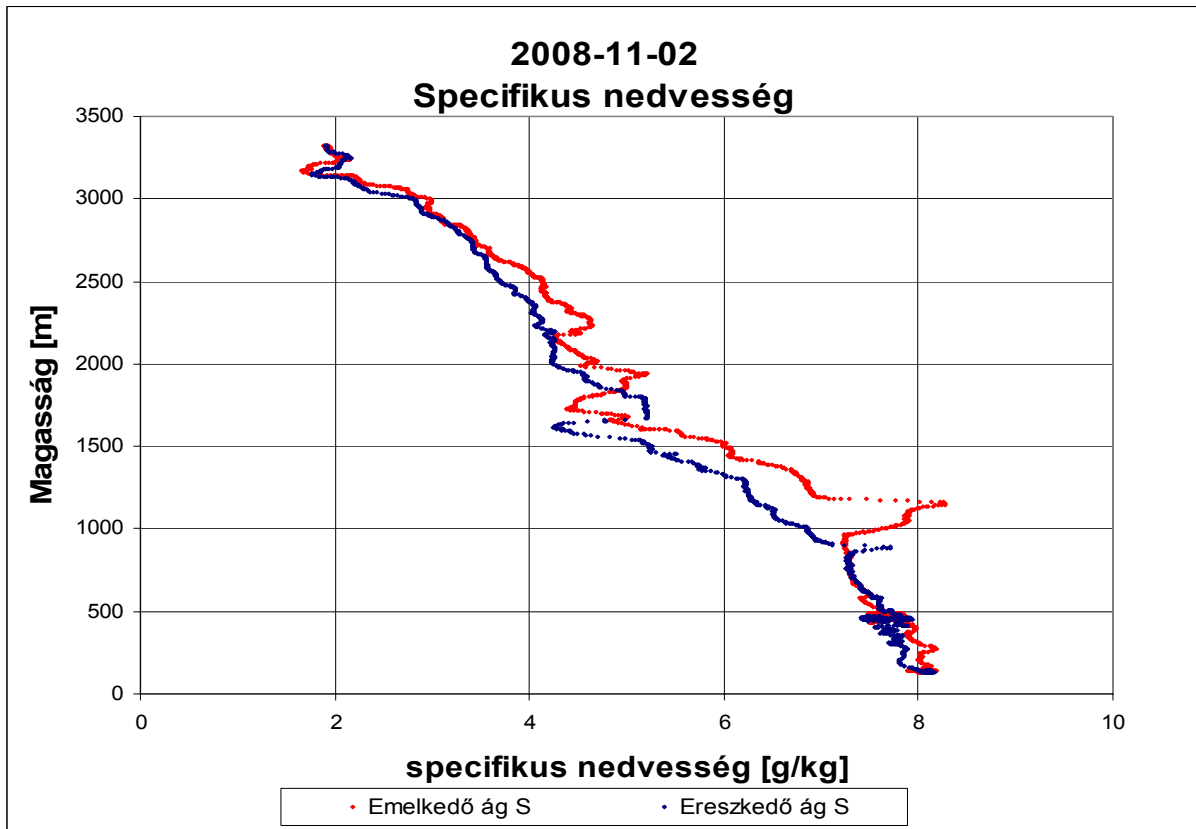
$$r = \frac{0,622 \cdot e}{p - e} \quad (6)$$

Itt p a légnyomást jelenti, melyet a repülőgépes mérés szolgáltat, míg e a gőznyomás. A gőznyomást a telítési gőznyomás illetve a relatív nedvesség (f) értékekből a következő egyenletből származtatjuk.

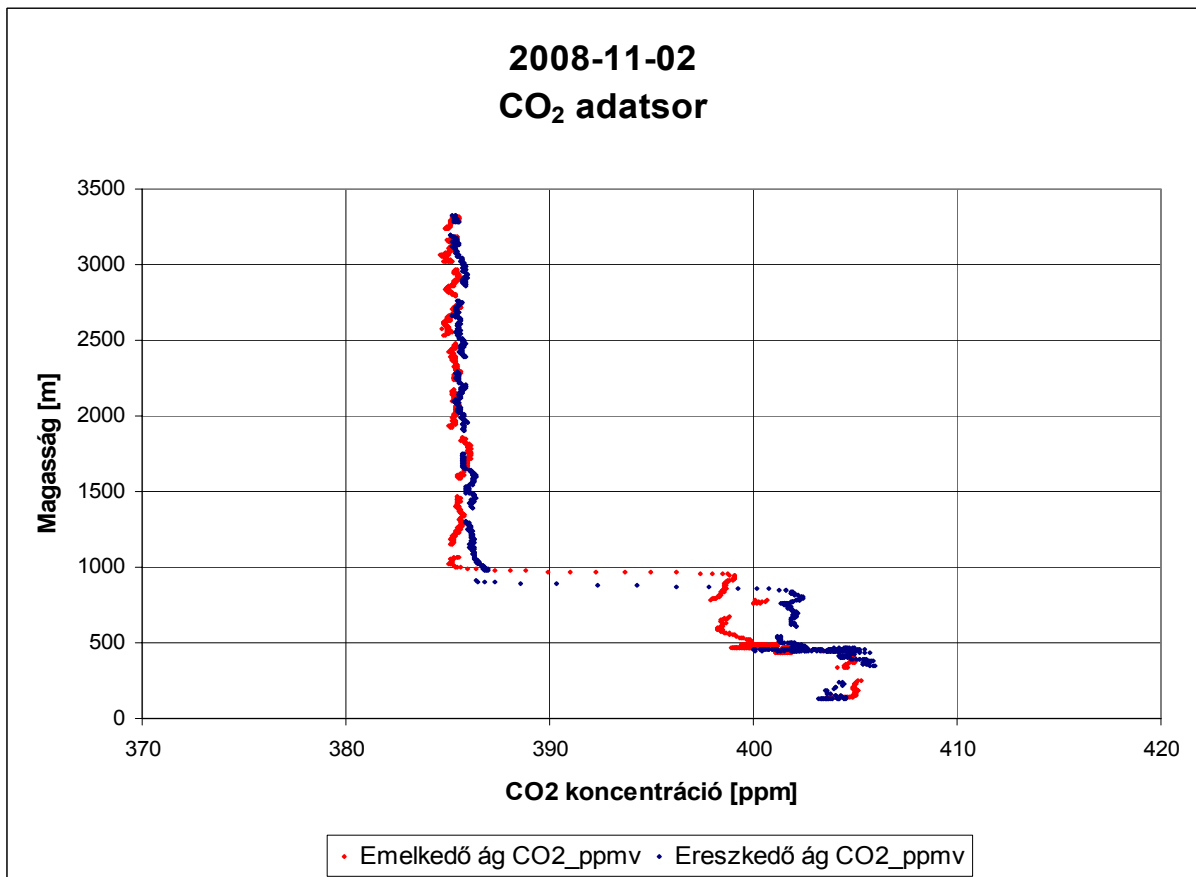
$$f = \frac{e}{e_s} \cdot 100 \quad (7)$$

A (7) egyenletben szereplő e_s a telítési gőznyomást jelenti, melyet a repülőgéppel mért hőmérsékletadatok (t) felhasználásával a Magnus–Teten empirikus formula segítségével számoltuk ki.

$$e_s = 6,11 \cdot 10^{\frac{7,5t}{237,5+t}} \quad (8)$$



7. ábra. Specifikus nedvességprofil Hegyhátsál környezetében, 2008. november 2.-án



8. ábra. Repülőgépes CO₂ profil Hegyhátsál környezetében, 2008. november 2.-án

A profilok szemrevételezésével jó közelítéssel megállapítható, hogy létezik egy olyan közös magasság, ahol mind a három profilban szakadás figyelhető meg. Ha a profilokon közel azonos magassági szinten markáns szakadás figyelhető meg, akkor jó közelítéssel azt a szintet a PHR magasságaként definiálhatjuk. A módszer hátránya, hogy nem objektív, ezért az adatok értékelésekor ezt figyelembe kell venni.

3.5. A keveredési réteg magasságát kiszámító modell bemutatása

A planetáris határréteg modellezése összetett feladat (Seibert et al., 2000). A legtöbb modell bizonyos felszíni fluxusokat használ, és kiindulási adatként szüksége van vertikális hőmérsékleti profilra. A PHR pontos vizsgálatához viszont kevés a vertikális hőmérsékleti profil, ami a rádiószondát felbocsátó mérőállomások csekély számának tudható be. A Seibert et al. (2000) által publikált tanulmányban ezt a hiányosságot próbálták kiküszöbölni. Itt prognosztikai egyenletekkel próbálták leírni a konvektív keveredési réteg fejlődését. Normál esetben a turbulens kinetikus energia parametrizációját használják fel.

Léteznek azonban ennél egyszerűbb modellek is. Mi a PHR magasságának meghatározására egy jóval egyszerűbb módszert használtunk fel, melyet Yi et al. (2001) publikált. A modell lényege, hogy kizárólag a felszíni szenzibilis hőáramot használja fel a keveredési réteg magasságának meghatározásához. A Yi et al. (2001) modell az amerikai Wisconsin város melletti adótoronyra szerelt mérőrendszer adatait használja fel. Az ebből származó adatokat még kiegészítették radar, rádiószondás és rádióakusztikus szondázó mérőrendszer (RASS – Radio Acoustic Sounding System) által mért adatokkal.

A Hegyhátsál települése mellett lévő TV adótorony környezetében a planetáris határréteg magasságának modellezéséhez szükség van a mérési napokon, a környéken mért szenzibilis hőáram adataira, melyeket ugyancsak a már említett eddy-kovariancia mérőrendszer szolgáltat (lásd 3.3. fejezet).

A modell felállítása során a (3) egyenletből indulunk ki. A virtuális potenciális hőmérséklet felszíni fluxusát időben integrálva, majd a kapott értékből gyököt vonva kapjuk a következő mennyiséget:

$$\Gamma(t) = \sqrt{\int_0^t (\Theta_v \cdot w)_s dt} \quad (9)$$

Az időtől függő Γ integrálmennyiség meghatározásával, valamint a és b mértékegység nélküli paraméterek (lásd Yi et al., 2001) felhasználásával kapjuk meg a planetáris határreteg magasságát az adott t időpontra:

$$z(t) = a + b\Gamma(t) \quad (10)$$

A számításokat Microsoft Excelben végeztem el.

Fontos megemlíteni, hogy a szenzibilis hőáram napfelkelte után kb. fél órával kezdi el kifejteni hatását. Amikor a nap lenyugszik, a szenzibilis hőáram értéke nullára csökken és a PHR magasságának fejlődése megáll. A TV adótorony környezetében lévő eltérő növényzetnek, azaz a térbeli inhomogenitásnak köszönhetően az eddy-kovariancia mérésekben véletlen hibák léphetnek fel, amely mérési hibák továbbterjednek a modellben, ezért a modell által szolgáltatott eredmények hibával terhelték. Emiatt értelemszerűen a modellezett adatok validálásakor a hiba bizonytalanságot okoz.

4. Eredmények

A részecskemódszer és a kibővített részecskemódszer segítségével egyértelműen és objektív módon meghatározhatjuk a planetáris határreteg (PHR) magasságát, és bemenő adatot szolgáltatathatunk az egyes transzportmodellek számára (Bakwin et al., 2004). Ezen kívül a mérési adatokkal validálhatjuk a numerikus időjárás előrejelző modellek által Magyarország területére becsült határreteg magasság adatokat (pl. ECMWF, Aladin).

A mérésekkel jobban megismerhetjük Hegyhátsál régiójának függőleges CO₂-kicserélődését és a horizontális CO₂-advekciónak dinamikáját. A vizsgálatok hozzájárulnak a PHR működésének pontosabb megismeréséhez, és a határreteg fejlődését szabályzó folyamatok alaposabb megértéséhez, mivel a PHR magassága meghatározza például a vízgőz és a szén-dioxid függőleges keveredését, hígulását.

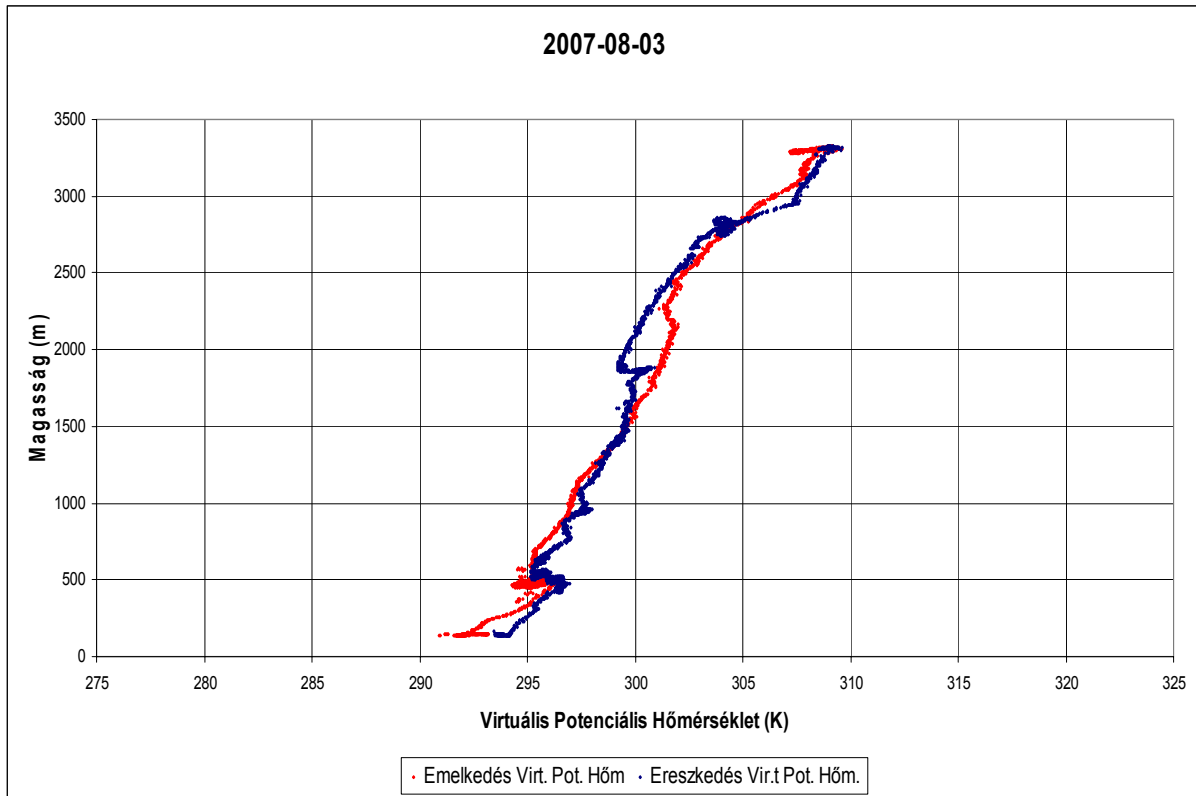
4.1. Részecskemódszer által kapott eredmények

4.1.1. Részecskemódszerrel nem meghatározható a PHR magassága

Számításaink során több olyan esettel is találkoztunk, amikor a profil nem vette fel semmilyen magasságban a kiindulási virtuális potenciális hőmérséklet felszíni értékét. Ebben a szituációban a részecskemódszer segítségével a planetáris határreteg magassága nem határozható meg. A méréssorozat elemzése után 71 darab elkészített profilból 16 esetben nem lehetett meghatározni a keveredési réteg magasságát.

A 9. ábrán egy ilyen mérési profilt mutatunk be. Amint az ábráról látható, a virtuális potenciális hőmérsékleti profil szinte szigorúan monoton növekvő, ezért a kiindulási értéket a profil semmilyen magassági szinten nem veszi fel többé.

Ezen esetekben más módszerre van szükség a PHR magasság meghatározására (lásd alább).

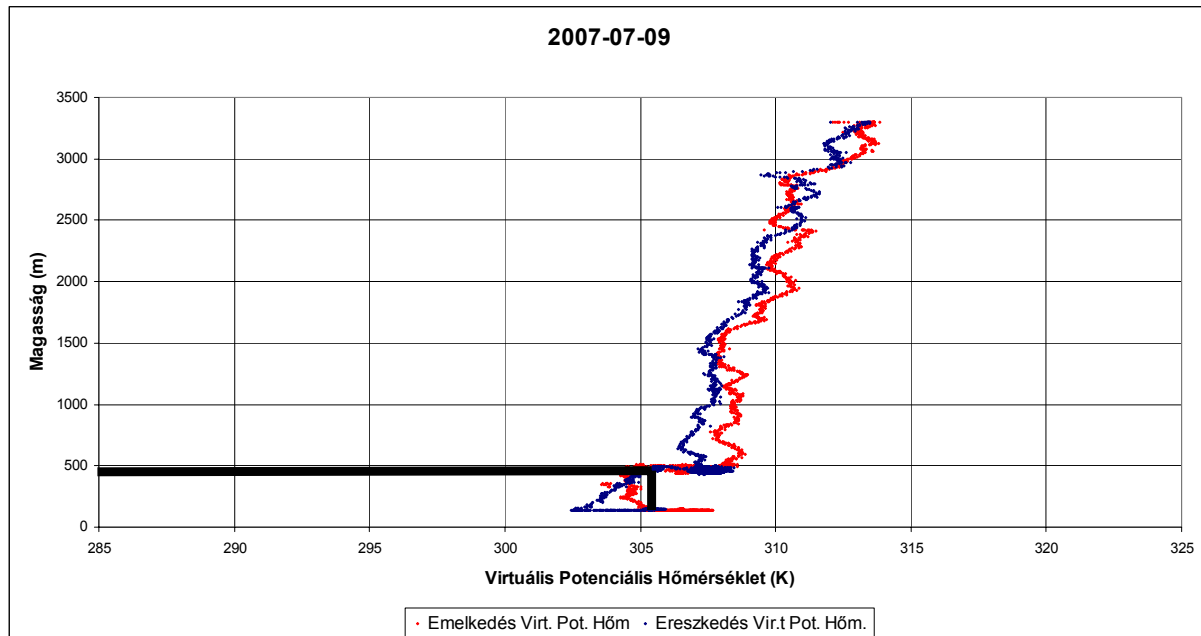


9. ábra. Összetett virtuális potenciális hőmérsékleti profil a magasság függvényében 2007. augusztus 3-án, Hegyhátsál környezetében.

4.1.2. Részecskemódszerrel meghatározható a PHR magassága

A legtöbb esetben a Holzworth (1964) által publikált részecskemódszerrel egyértelműen meghatározható az a magasság, amelyen a profil újra felveszi a talaj közelében mért virtuális potenciális hőmérsékleti értéket. Ebben az esetben erre a magassági szintre definiáljuk a planetáris határréteg tetejét, melyet a 10. ábra segítségével szemléltetünk. Ahogy az ábra alapján látható, a repülőgép emelkedése illetve ereszkedése közben egyértelműen behatárolható az a magassági szint, ahol a felszíni értéket újra felveszi a profil, illetve a zárórétegnek köszönhetően szakadás figyelhető meg a profilon. Az emelkedési illetve ereszkedési ágra meghatározott magasságokat átlagoljuk, és ez az átlag adja meg az adott repülésre a planetáris határréteg magasságát.

71 darab vizsgált mérésünkből 55 esetben működött ez az elv, így ez egy biztos módszer arra, hogy objektíven meghatározzuk a planetáris határreteg magasságát. A számítások eredményeit a Függelékben táblázatos formában közöljük.



10. ábra. Összetett virtuális potenciális hőmérsékleti profil a magasság függvényében 2007. szeptember 9-én, Hegyhátsál környezetében.

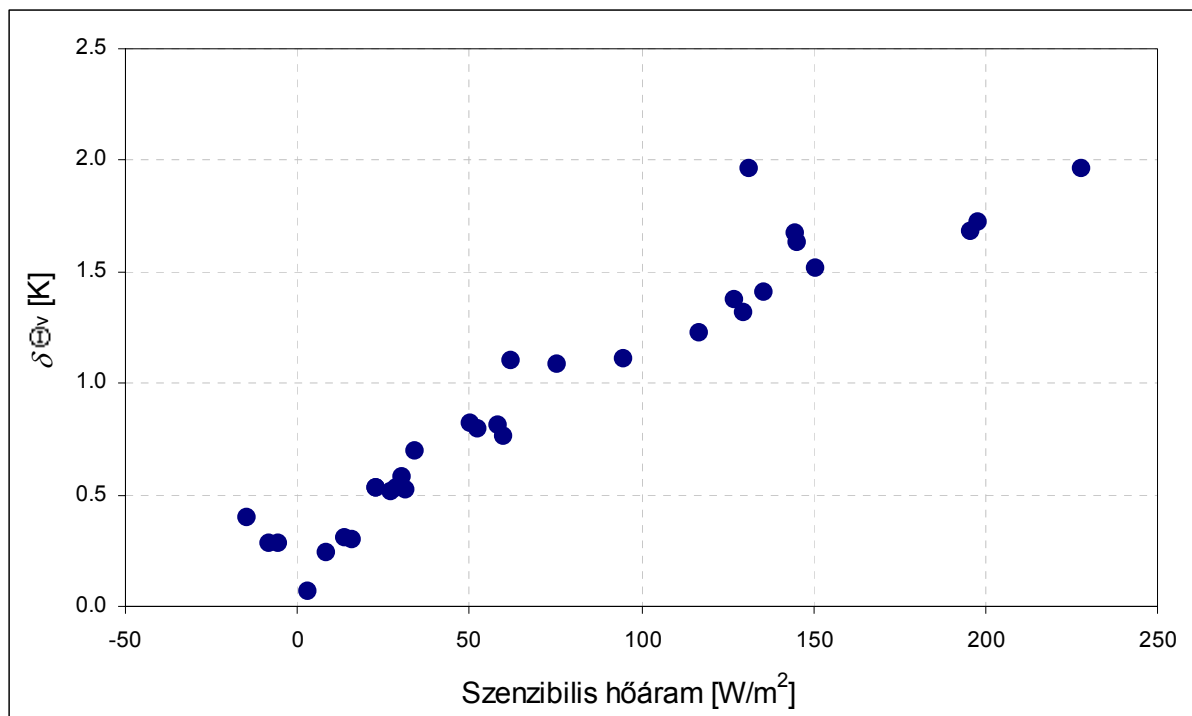
A 10. ábrán egy olyan esetet mutatunk be, amikor a módszer működött. Itt vastag vízszintes fekete vonal jelöli az emelkedési illetve ereszkedési ágon meghatározott határreteg magasságának átlagát, melyet a részecskemódszer felhasználásával határoztunk meg. A vastag fekete vonal jól tükrözi a profilon megfigyelhető szakadási felületet is.

4.2. Kibővített részecskemódszer

A kibővített részecskemódszer elve alapján számottevő javulást vártunk a planetáris határreteg magasságának meghatározásában azokban az esetekben, melyekben az egyszerű módszerrel nem kaptunk eredményt (pl. 9. ábra).

A módszer hatékonyságát tudományos diákköri dolgozatomban 33 darab mérési profilon vizsgáltuk (Wenhardt, 2007). Több olyan mérés is volt, amikor a részecskemódszerrel nem lehetett meghatározni a keveredési réteg magasságát. A mérések újbóli elemzése során azt tapasztaltuk, hogy csak egyetlen alkalom volt, amikor a kibővített részecskemódszerrel sikerült a planetáris határreteg magasságának meghatározása (2007.07.06.). A tapasztalatok szerint tehát ezzel a módszerrel nem értünk el lényegi javulást. A kibővített részecskemódszer eredményei szorosan követik az egyszerűsített részecskemódszer eredményeit (lásd később), de plusz információt nem szolgáltatnak (lásd Függelék).

Érdekességképpen megvizsgáltuk, hogy a $\delta\Theta_v$ virtuális potenciális hőmérsékleti tag hogyan függ a Hegyhátsálon mért szenzibilis hőáram értékeitől. A 11. ábrán bemutatott eredmény szerint az elvárásainknak megfelelően (lásd definíció) a plusz tag szorosan összefügg a felszín szenzibilis hőáramának alakulásával.



11. ábra. A kiegészítő virtuális potenciális hőmérsékleti tag alakulása a szenzibilis hőáram függvényében. A szenzibilis hőáram értékek Hegyhátsálon mért adatok.

Fontos megjegyezni, hogy mivel nem modelladatokkal dolgoztunk, így a szenzibilis hőáram negatív értékeket is felvett a mérés alatt, ami a valóságban a modellezett adatokkal lehetetlen lenne, mivel napközben az energiamérleg pozitív.

4.3. Több profil felhasználásával nyert eredmények

Ha kizárólag a specifikus nedvesség illetve CO₂-profilokat tekintjük, akkor ezek segítségével szubjektív módon is meghatározható a PHR magassága. Ebben az esetben a 71 db mérésből 61 alkalommal tudtuk meghatározni a keveredési réteg magasságát.

Mivel ez a módszer szubjektív, a számítások során előállított specifikus nedvesség illetve CO₂-profilokat csak azokban az esetekben használjuk a későbbiekben, amikor se a részecskemódszerrel, se a kibővített részecskemódszerrel nem határozható meg a PHR magassága. A feltételezésünk az, hogy a két plusz profil elemzésével megadható lesz egy olyan magasság, amit a keveredési réteg magasságaként definiálhatunk.

A profilok elemzésével 71 darab mérés közül 3 esetben nem tudtuk se a profilok, se a részecskemódszer segítségével meghatározni a planetáris határréteg magasságát, így számottevő javulást értünk el a módszer alkalmazásával. A kapott eredményeket a Függelékben táblázatos formában közöljük.

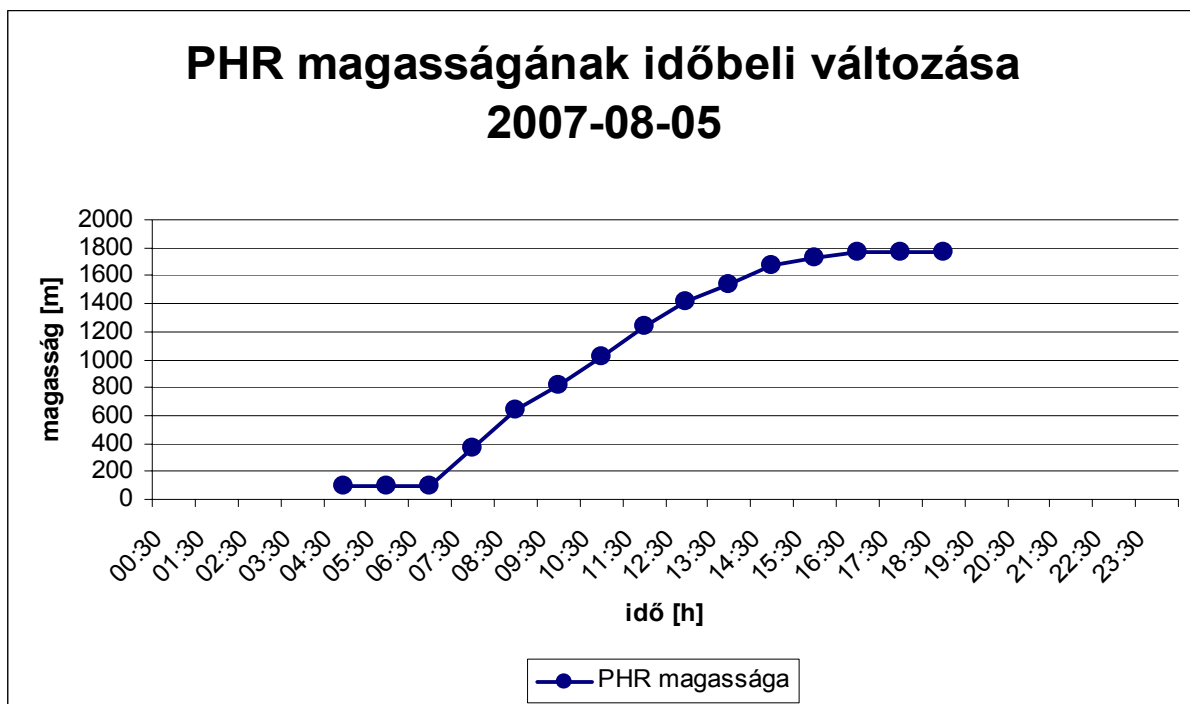
A módszert akkor is használhatjuk, amikor a részecskemódszerrel konkrét eredményt érünk el: egyrészt a magasságadat pontosítása céljából, másrészt az adat kontrollálása érdekében.

4.4. A Yi et al. (2001) modell által kapott eredmények

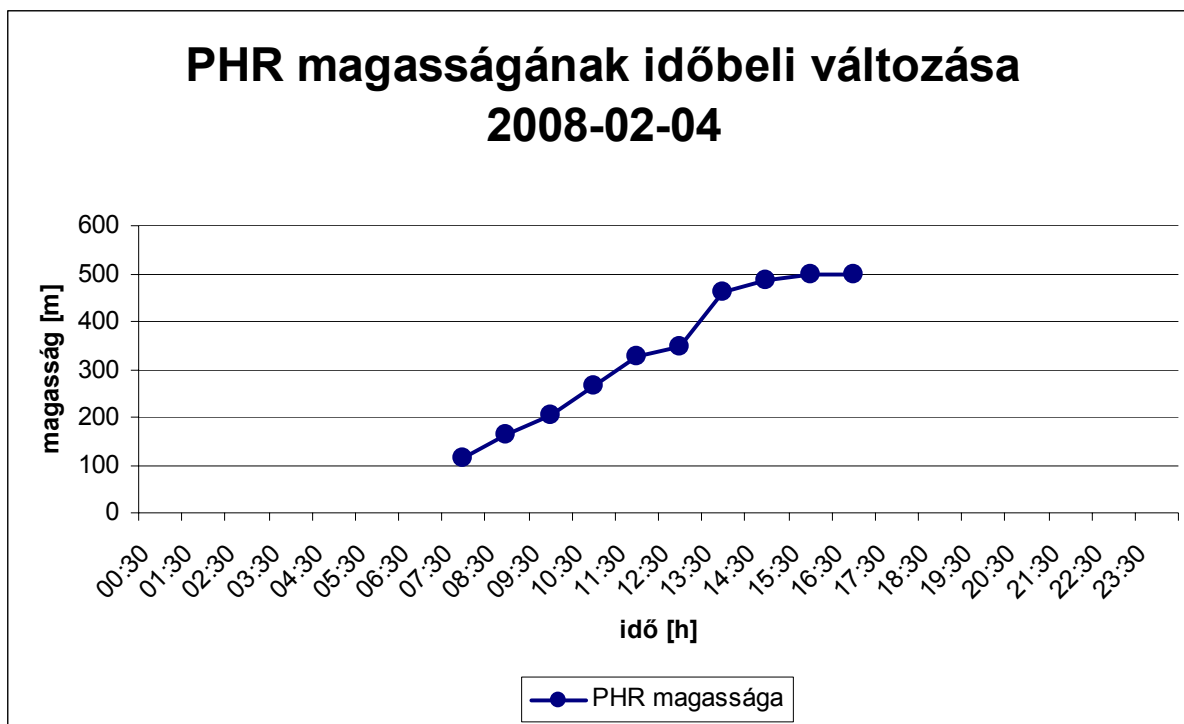
A Yi et al. (2001) által publikált modell segítségével egy újabb adatbázist nyerünk a planetáris határréteg magasságának napi alakulásáról. Az összes esetből 9 alkalommal nem kaptunk érdemi eredményt, ami az eddy-kovariancia adatok hiányának tudható be. A modellt elemezve pontosabban megismerhetjük a keveredési réteg nappali dinamikáját (12. ábra; 13. ábra)

Az ábrákon megfigyelhető a napfelkelte utáni monoton emelkedés. Ez az emelkedés annak tudható be, hogy a felszín melegedésével pozitívvá válik a szenzibilis hőáram. A PHR magasság a kora délutáni órákban éri el a maximumot, és napnyugtáig ez a magasság szinte változatlan marad. Fontos megjegyezni, hogy ezzel a modellel az éjszakai stabil határreteg nem modellezhető.

A nyári időszakban az erős besugárzás miatt gyorsabban és nagyobb magasságig nő a határreteg a besugárzás megkezdését követően (12. ábra). Ezzel ellentétben a téli időszakban ez az emelkedés sokkal lassabb, és a keveredési réteg is csak kisebb magasságokig terjed ki (13. ábra), köszönhetően a besugárzás évszakos változásának.



12. ábra. A planetáris határreteg magasságának alakulás a Yi et al. (2001) módszer alapján 2007. augusztus 5-én



13. ábra. A planetáris határréteg magasságának alakulása a Yi et al. (2001) módszer alapján 2007. február 4-én

4.5. Az eredmények összehasonlítása

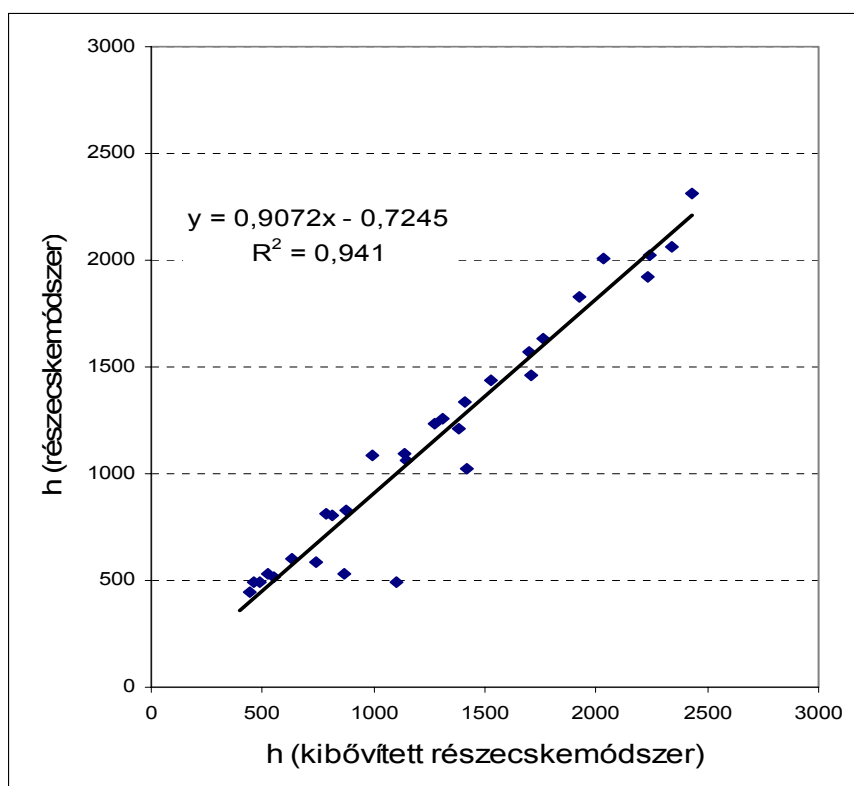
Az alábbi fejezetben bemutatjuk a különböző módszerekkel kapott planetáris határréteg magasság adatainak kapcsolatát. Az összehasonlítás során a méréseken alapuló adatokat összevetjük egymással, majd pedig az ECMWF operatív modellje és a Yi et al. (2001) modell által szimulált PHR magasság adatokkal. A számszerű eredményeket a Függelékben mutatjuk be. Itt feltüntettük a mérés napját, időtartamát, illetve az egyes módszerek alapján számított PHR magasság adatokat. Egy külön oszlop mutatja be, hogy frontális vagy frontmentes időszakban történt-e a mérés.

Két esetben (2007.07.09. és 2008.08.03.) nem használtuk fel a Függelékben közölt adatokat. Ezekben a napokon a részecskemódszerrel, illetve az ECMWF modellje által meghatározott planetáris határréteg magasságértékek irreális, fizikailag nem magyarázható mértékben eltértek egymástól, így a későbbi számolásainkat nagymértékben torzította volna az adatok figyelembe vétele.

4.5.1 A részecskemódszer és kibővített részecskemódszer összehasonlítása

A Függelékben található táblázat alapján látható, hogy a legtöbb olyan időpont, amikor nem lehetett meghatározni a planetáris határreteg magasságát, akkor fordult elő, amikor az ország felett front vonult át. Ilyenkor kevés a besugárzás a valószínűsíthető felhőreteg miatt. Ha kevesebb a nettó besugárzás, akkor kisebb a felszíni szenzibilis hőáram, és így kisebb a kiegészítő virtuális potenciális hőmérsékleti tag is (11. ábra). Ennek következtében az összegzett felszíni virtuális potenciális hőmérsékleti értéket sehol sem veszi fel a profil, így a kibővített részecskemódszer nem ad többlet információt a PHR magasságáról a részecskemódszerhez képest.

Vizsgálataink egyik legfontosabb tapasztalata, hogy a kibővített részecskemódszert alkalmazva közel azonos eredményeket kaptunk, mint a sima részecskemódszer esetén. Ezt a kapcsolatot mutatja be a 14. ábra.



14. ábra. A részecskemódszerrel és a kibővített részecskemódszerrel meghatározott PHR magasság kapcsolata a vizsgált időszakban. Az ábrán feltüntettük az illesztett egyenes egyenletét, valamint a lineáris korrelációs együttható négyzetét (R^2).

A 14. ábrán a 2007. június 25. és 2007. november 11. közötti időszakban vizsgáltuk a részecskemódszer és a kibővített részecskemódszer kapcsolatát.

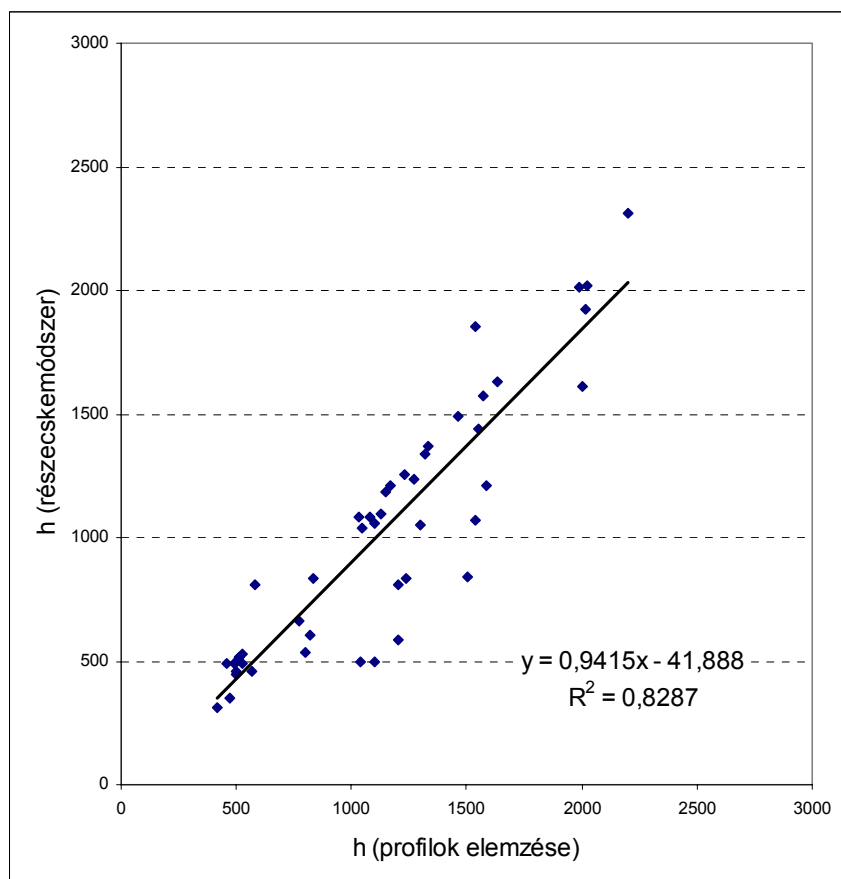
A Függelékben található táblázatban látható, hogy a kibővített részecskemódszer egy esetben segített a planetáris határréteg meghatározásában, abban az esetben, amikor a részecskemódszerrel nem kaptunk eredményt. Ezt a tényt és a két mennyiség közötti erős kapcsolatot ($R^2=0,94$) figyelembe véve elmondható, hogy a kibővített részecskemódszer hasonló eredményre vezet, mint a részecskemódszer, ezért a továbbiakban a kibővített részecskemódszerrel nem végzünk számításokat.

4.5.2 A részecskemódszer és a profilok által nyert eredmények összehasonlítása

Ha kizárólag a profilokat elemezzük, eredményül hasonló adatokat kapunk a planetáris határréteg magasságára, mint amikor Holzworth (1964) részecskemódszerét alkalmazzuk a mérésekre.

A függelékben 7 helyen megfigyelhető, hogy amikor a részecskemódszerrel jól definiált magasságot kapunk, akkor a több profil elemzésén alapuló módszer nem vezet megoldáshoz, azaz a keveredési réteg magassága nem határozható meg. A jelenség annak tudható be, hogy front átvonulásakor szakadás áll elő a meteorológiai paraméterekben, sok esetben erős a szabad troposzférikus levegő és a határréteg levegője közti átkeveredés, a hőmérsékleti és a különböző meteorológiai állapotjelző (pl. CO_2 és vízgőz) rétegződés zavaros lehet, így a határréteg sok esetben nincs is értelmezve.

A két módszer összevetése során látható, hogy a kibővített részecskemódszerhez képest a kapcsolat gyengül, viszont az ($R^2=0,83$) lineáris korrelációs együttható négyzetének magas értéke mutatja a két mennyiség közti szoros kapcsolatot (15. ábra).

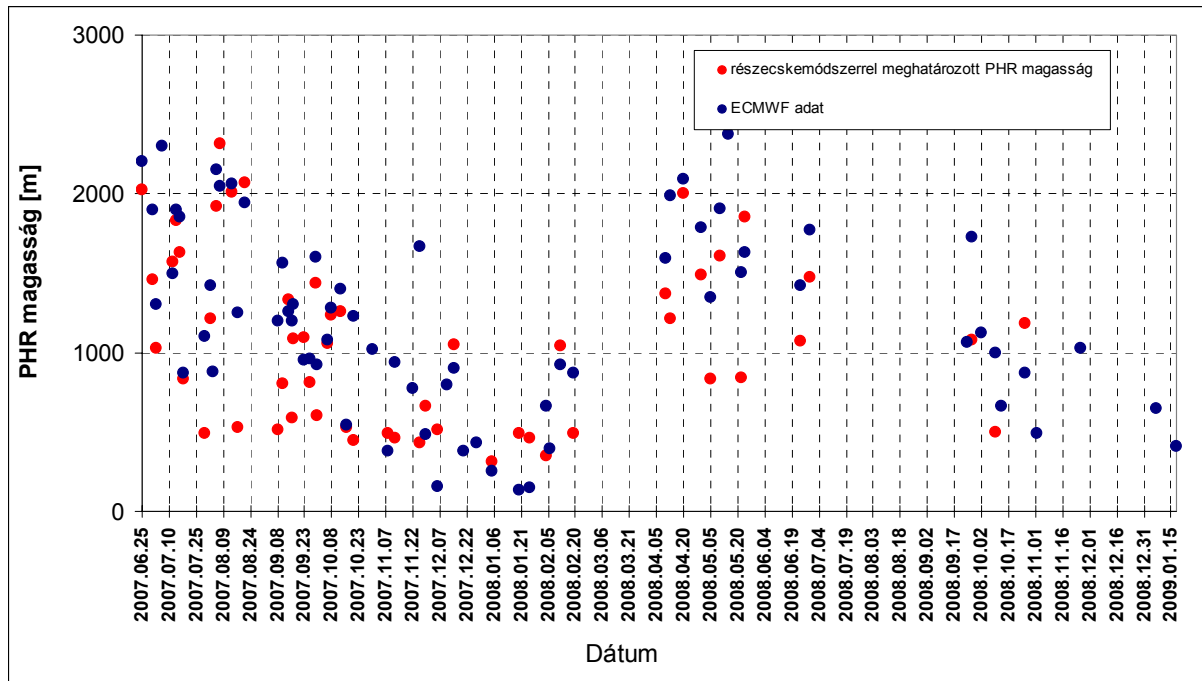


15. ábra. A részecskemódszerrel és a profilok elemzése által meghatározott PHR magasság kapcsolata a vizsgált időszakban. Az ábrán feltüntettük az illesztett egyenes egyenletét, valamint a lineáris korrelációs együttható négyzetét (R^2).

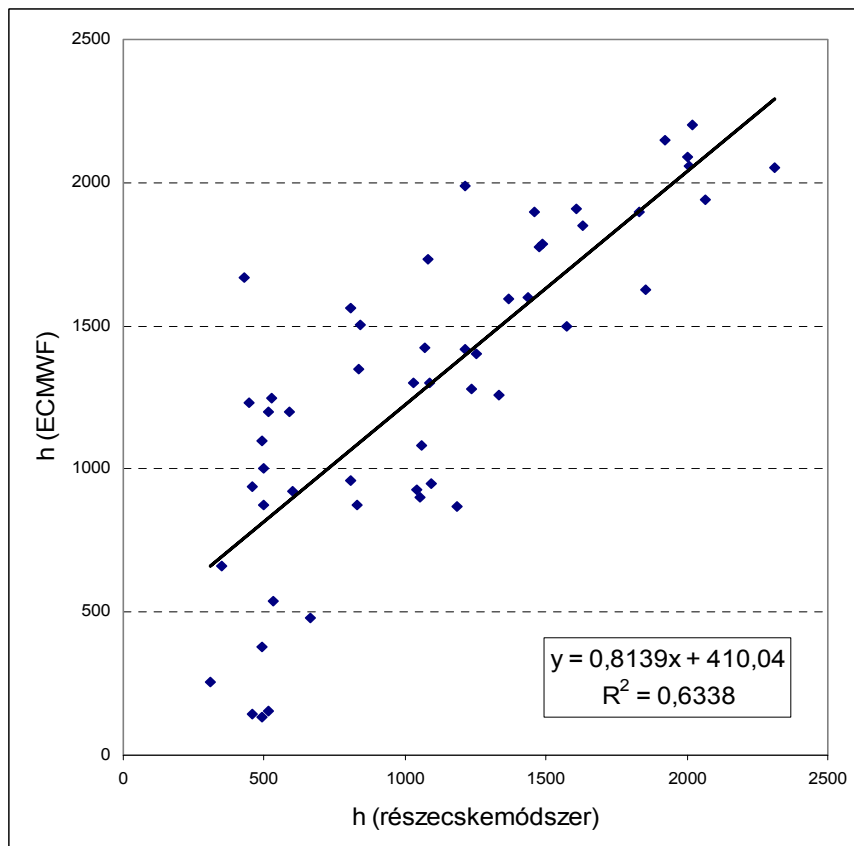
4.5.3 Az ECMWF modelladatok összehasonlítása a részecskemódszer által kapott eredményekkel

Az Európai Középtávú Időjárás-előrejelző Központ (ECMWF) operatív determinisztikus modellje 3 óránként adja meg a PHR magasságát. A repülőgépes adatok egyetlen időpontra vonatkoznak, így az ECMWF adatok használhatók a PHR fejlődésének leírására is. Az ECMWF adatok minőségét azonban mérési adatok nélkül nem tudjuk megítélni. Jelen dolgozatban bemutatott mérési adatokkal objektív módon tudjuk becsülni az ECMWF adatok minőségét Magyarország területére.

A 16. ábrán sematikus formában mutatjuk be a mérési napokon a részecskemódszerrel kapott planetáris határréteg magasságadatokat és az ECMWF által modellezett adatokat.



16. ábra. A részecskemódszerrel meghatározott PHR magasság és az ECMWF PHR magasság kapcsolata a teljes vizsgált időszakban.

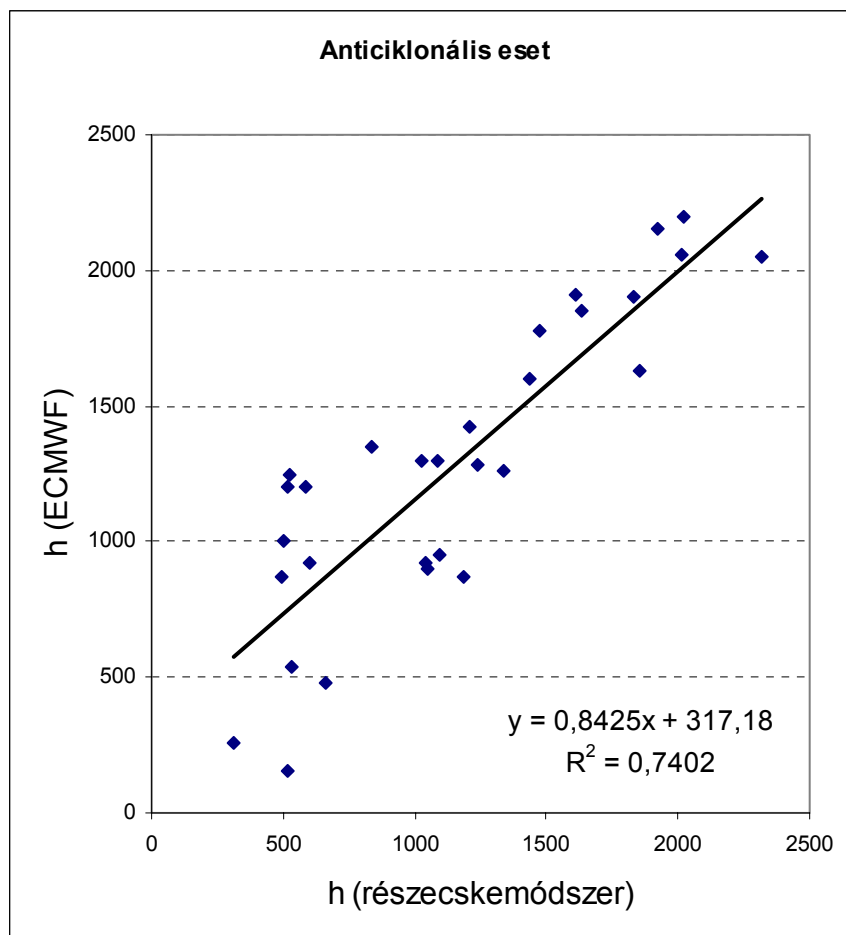


17. ábra. A részecskemódszerrel meghatározott PHR magasság és az ECMWF PHR magasság kapcsolata a teljes vizsgált időszakban. Az ábrán feltüntettük az illesztett egyenes egyenletét, valamint a lineáris korrelációs együttható négyzetét (R^2).

A 17. ábrán a részecskemódszerrel meghatározott, illetve az ECMWF modell által származtatott PHR magasság adatok összefüggése látható. Az ábrán az illesztett egyenes egyenletéből jól látható, hogy az ECMWF modellje főleg nagy magasságok esetén egyezik jól a mért értékekkel. Azokban az esetekben, amikor a PHR alacsonyabb, nagyobb eltérés tapasztalható. A korreláció négyzetének viszonylag magas értékéből látható, hogy a modell általánosságban viszonylag jól becsüli a keveredési réteg magasságát.

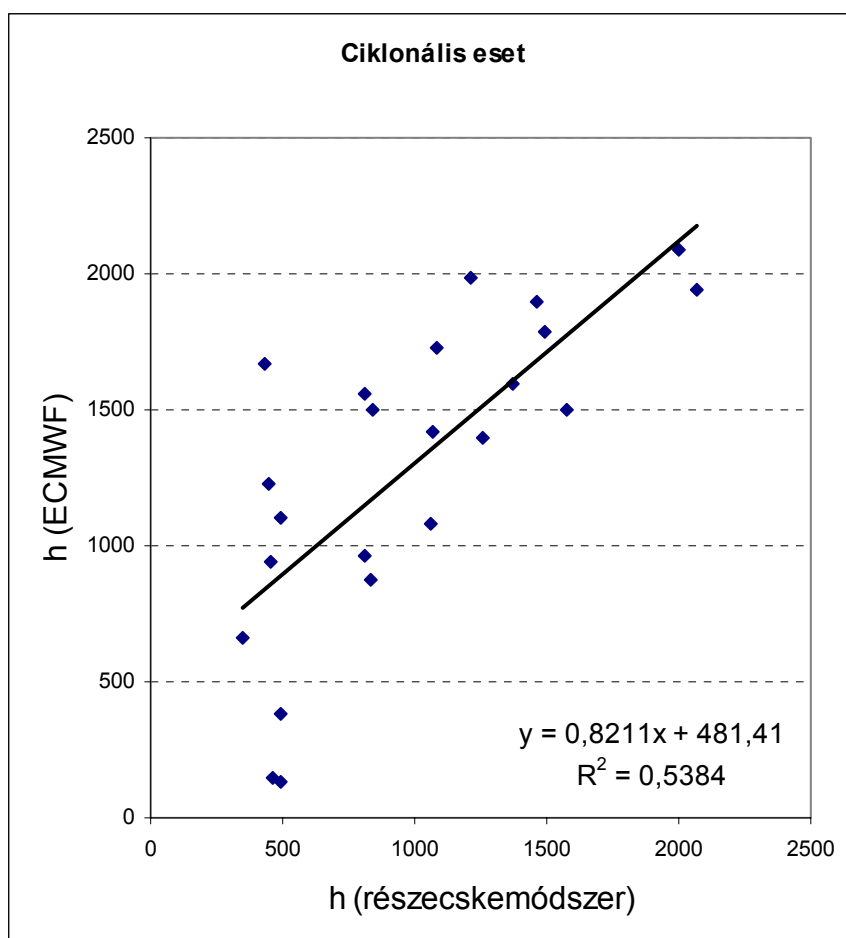
Definíció szerint a planetáris határréteg csak akkor jól definiált, ha magasnyomású, anticiklonális az időjárási helyzet (Stull, 1988). Ahogy a Függelék alapján látható, a frontok jelenléte befolyásolja az eredményeket. Emiatt célszerűnek tűnik szétválasztani a magasnyomású (anticiklonális) eseteket, és külön vizsgálni az ECMWF adatokkal való összefüggőséget.

Anticiklonális esetben, amikor az ország felett általában tiszta az idő, a részecskemódszer és az ECMWF által becsült magasság jó egyezést ad (18. ábra). Tiszta időben, felhőmentes égen a felszínre jutott nagyobb energiamennyiség következtében a határréteg a termikus turbulencia hatására megvastagszik, kialakul a jellegzetes virtuális potenciális hőmérsékleti rétegződés.



18. ábra. A részecskemódszerrel meghatározott PHR magasság és az ECMWF PHR magasság kapcsolata anticiklonális esetben. Az ábrán feltüntettük az illesztett egyenes egyenletét, valamint a lineáris korrelációs együttható négyzetét (R^2).

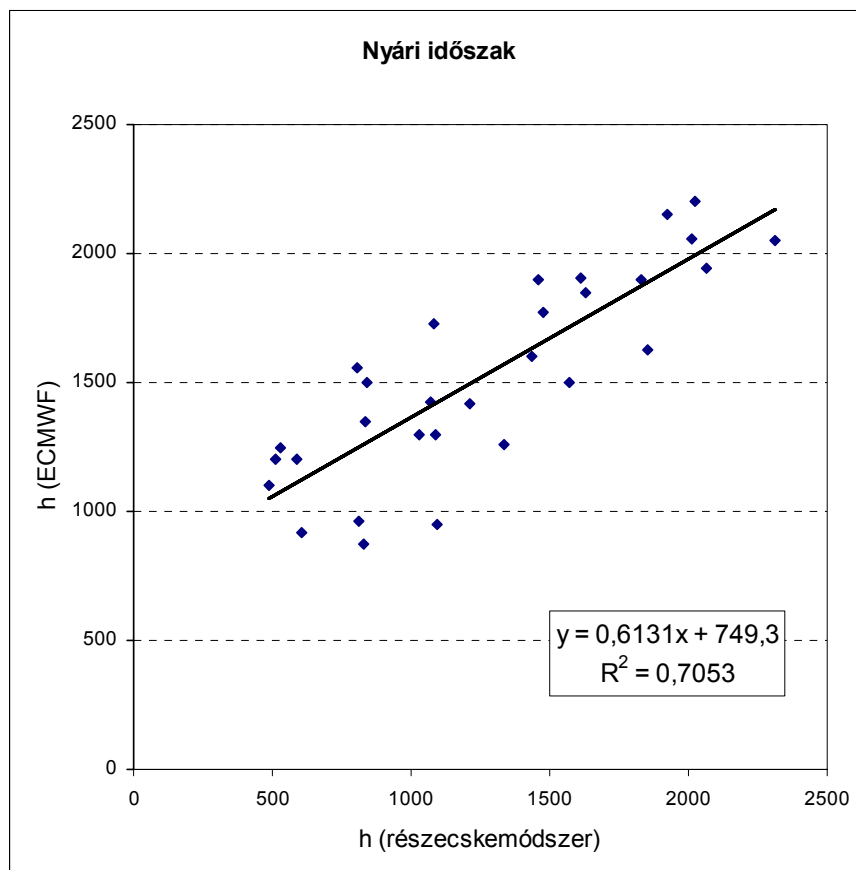
Ciklonális időjárási helyzetben, azaz front átvonulása esetén a meteorológiai állapotjelzők szakadása miatt a kapcsolat romlását tapasztaljuk, a korreláció négyzetének értéke kisebb, mint az egész vizsgált időszakban (19. ábra). Az ECMWF modellje, ahogy azt az ábrán a regressziós egyenes egyenlete is mutatja, ezekben az időjárási helyzetekben rendszerint felülbecsüli a határréteg magasságát.



19. ábra. A részecskemódszerrel meghatározott PHR magasság és az ECMWF PHR magasság kapcsolata ciklonális esetben. Az ábrán feltüntettük az illesztett egyenes egyenletét, valamint a lineáris korrelációs együttható négyzetét (R^2).

A részecskemódszer és az ECMWF modelljének kapcsolatát nem csak ciklonális-anticiklonális esetben vizsgáltuk. Méréseink során megállapítottuk, hogy a planetáris határreteg magassága főleg a nyári időszakban veszi fel a legnagyobb értékeket. A felszín feletti légréteg dinamikájáról tudjuk, hogy a keveredési réteg magasságának egyik legfontosabb meghatározó folyamata a konvekció. (Yi et al., 2001) A konvekció az alsó légréteg termikus instabilitása miatt kialakuló hőáramlást jelenti. A hőáramlás legkönnyebben azokon a napokon alakul ki, amikor a naptól érkező nettó besugárzás számottevő. A nap éves menetéből és a mért besugárzási adatokból tudjuk, hogy ez az időszak májustól egészen szeptember végéig terjed ki. A nagy nettó besugárzásnak köszönhetően megindul a felszín irányából a szenzibilis hőátadás, majd pedig a keveredési réteget kialakító konvekció.

A 71 darab mérési adatból 35 darab mérés a májusától szeptemberig tartó időszakban zajlott. Ezekben az esetekben feltételezzük, hogy a sugárzási viszonyok megfelelőek voltak a konvekció kialakulásához. Vizsgálatunk során ennek az időszaknak a részecskemódszer segítségével meghatározott PHR magasság adatait szeretnénk összehasonlítani az ECMWF modelljének adataival, melyet a 20. ábrán szemléltetünk.



20. ábra. A vizsgált időszakban, konvektív viszonyok hatására kialakuló PHR magasságadatok összehasonlítása. Az ábrán feltüntettük az illesztett egyenes egyenletét, valamint a lineáris korrelációs együttható négyzetét (R^2).

A 20. ábrán látható, hogy a részecskemódszer által kapott eredmények igen jó egyezést mutatnak az ECMWF adatokkal ($R^2=0,7$). Az ábrán feltüntetett regressziós egyenes helyzetéből következtetést vonhatunk le. Az ECMWF modellje kis magasságok esetén felülbecsüli a határreteg magasságát, míg nagy magasságokban jó egyezést mutat vele.

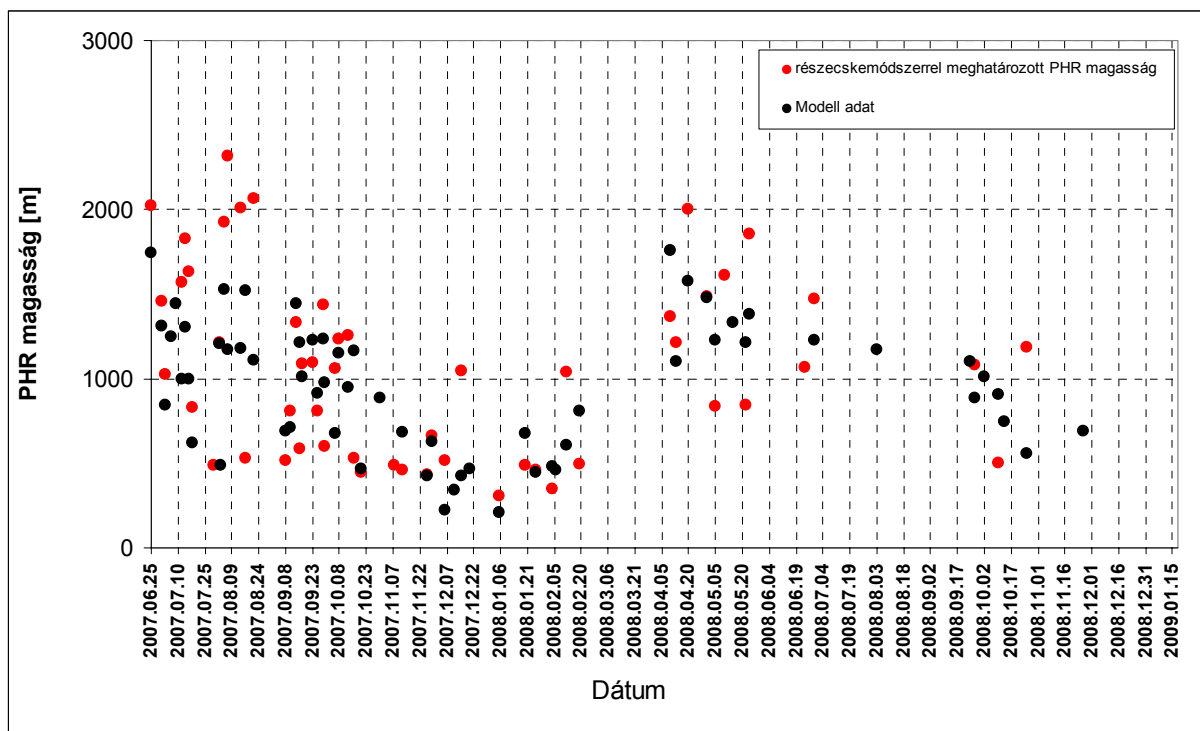
A részecskemódszer által kapott adatok és az ECMWF modelladatainak összehasonlításával kapott fontos tapasztalat, hogy az ECMWF modellje a legtöbb esetben kisebb magasságok esetén sokkal nagyobb értéket ad a planetáris határreteg magasságára,

mint a részecskemódszer, viszont nagy magasságok esetén viszonylag jó az egyezés. Ez a tapasztalati tény figyelmeztet arra, hogy az üvegházgáz- vagy szennyezőanyag terjedési-modellek hamis eredményhez vezetnek, ha a numerikus időjárás-előrejelző modellek által számított PHR adatokkal dolgoznak. Feltétlenül szükség van egy olyan modell kidolgozására, amellyel a valósághoz közelebb álló PHR magasság adatok számíthatóak Magyarorszag területére. Ehhez adhatnak támpontot az egyszerű határrétegmagasság számító modellek.

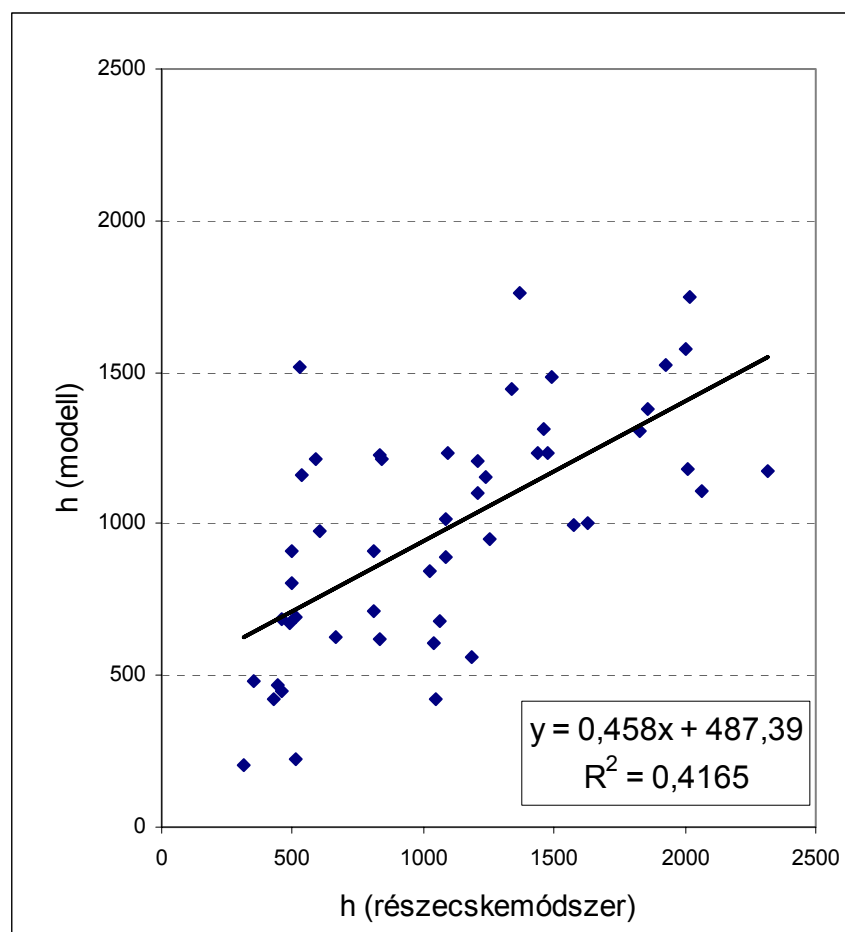
4.5.4 A Yi et al. (2001) modell által kapott eredmények összehasonlítása

A Yi et al. (2001) modell az óras felbontásban rendelkezésünkre álló szenzibilis hőáram adatok felhasználásával képet szolgáltat a planetáris határréteg magasságának napi menetéről. A modelleredmények tanulmányozása lehetőséget nyújt a keveredési réteg dinamikájának pontosabb megismeréséhez.

A modell eredményeit a részecskemódszerrel meghatározott magasságadatokkal vetettük össze, kapcsolatukat a 21. ábrán szematikusan tüntettük fel.

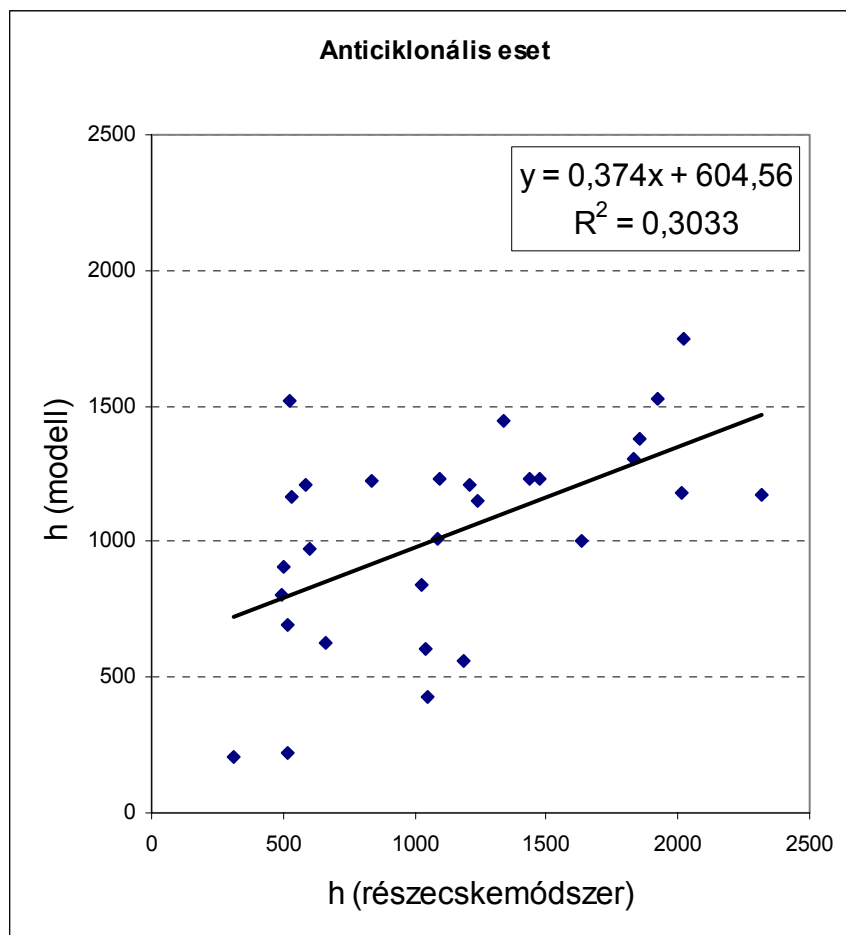


21. ábra. A részecskemódszerrel meghatározott PHR magasság és a Yi et al. (2001) modell által kapott magasság kapcsolata a teljes vizsgált időszakban.



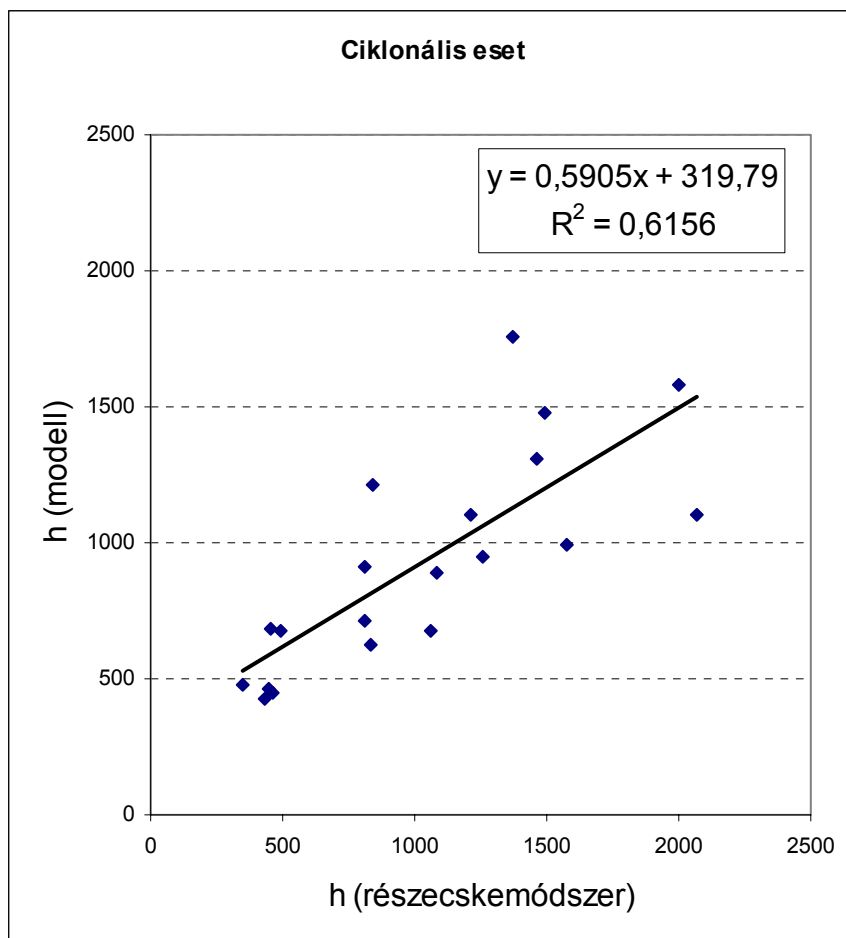
22. ábra. A részecskemódszerrel meghatározott PHR magasság és a Yi et al. (2001) modell segítségével számított PHR magasság kapcsolata a mérési időszakban. Az ábrán feltüntettük az illesztett egyenes egyenletét, valamint a lineáris korrelációs együttható négyzetét (R^2).

A két módszer kapcsolata a 22. ábrán látható a teljes mérési időszakra. Az összevetésük során azt tapasztaltuk, hogy a kapott planetáris határreteg magasságok nagymértékben eltérnek egymástól. Ez az eltérés mind alacsony, mind közepes és nagy magasságok esetén jelentkezik. A korrelációs együttható négyzetének alacsony értékéből ($R^2=0,42$) tükröződik a két módszer gyenge kapcsolata. Fontos megjegyezni, hogy a Yi et al. (2001) modell az ECMWF planetáris határreteg modelljével szemben körülbelül 1000 méter magasságig fölébecsüli, 1000 méter felett rendszerint alulbecsüli a keveredési réteg magasságát a részecskemódszerrel meghatározott értékekhez képest.



23. ábra. A részecskemódszerrel meghatározott PHR magasság és a Yi et al. (2001) modell által számított PHR magasság kapcsolata anticiklonális esetben. Az ábrán feltüntettük az illesztett egyenes egyenletét, valamint a lineáris korrelációs együttható négyzetét (R^2).

Megvizsgáltuk a Yi et al. (2001) modell által kapott adatokat mind anticiklonális, mind ciklonális időjárási helyzet esetén. Az ECMWF modelljéhez hasonlóan azt az eredményt vártuk, hogy tiszta időben, amikor felhőmentes az időszak és zavartalan a besugárzás, a szenzibilis hőáramon alapuló modell jobban fog hasonlítani a részecskemódszer eredményeire. Anticiklonális esetben a korábbi tapasztalatainkkal ellentétben a kapcsolat gyengült, ami a 23. ábrán a korrelációs együttható négyzet ($R^2=0,3$) nagyon alacsony értékéből látható.

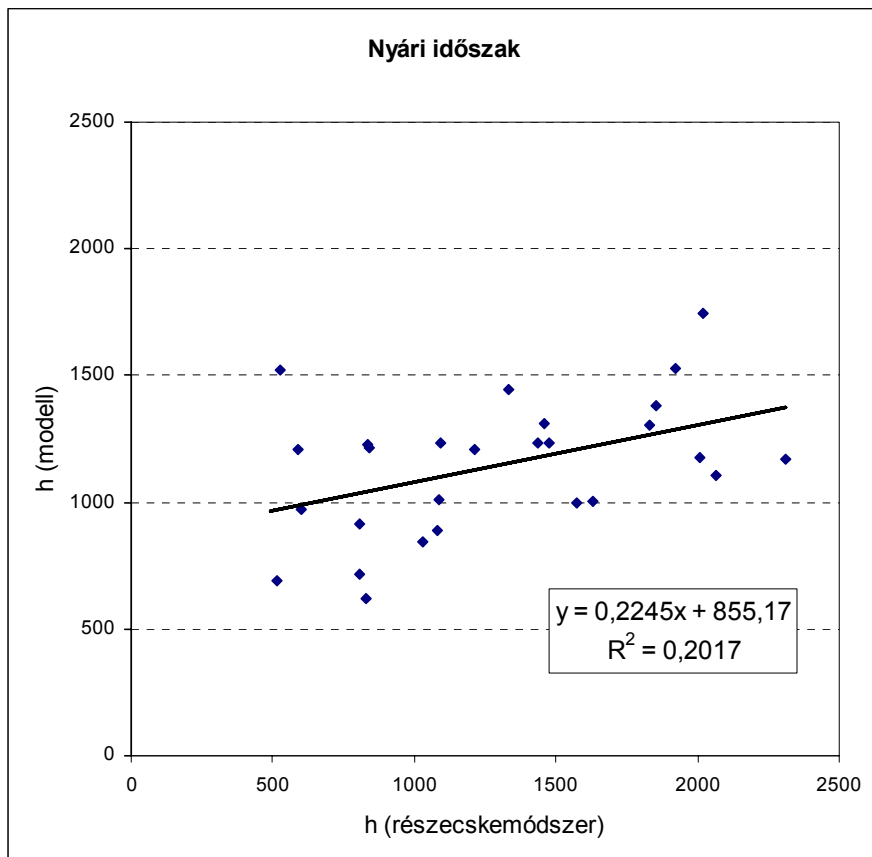


24 ábra. A részecskemódszerrel meghatározott PHR magasság és a Yi et al. (2000) modell PHR magasság kapcsolata a ciklonális esetben. Az ábrán feltüntettük az illesztett egyenes egyenletét, valamint a lineáris korrelációs együttható négyzetét (R^2).

Ahogy korábban láttuk, ciklonális esetben az ECMWF modellje rosszabb értékeket adott eredményül a részecskemódszerhez képest. Ezzel ellentétben a Yi et al. (2001) modell sokkal jobban reprezentálta ebben az időjárási szituációban a részecskemódszerrel meghatározott planetáris határréteg-magasságot. A két módszer kapcsolatát tekintve elmondható, hogy a teljes vizsgált időszakhoz képest is jobb egyezőséget mutatnak a mért és modellezett határrétegeadatok, ami a 24. ábrán szereplő korrelációs együttható négyzet értéke is alátámaszt ($R^2=0,62$).

A mérések elemzése során összehasonlítottuk a részecskemódszer és az ECMWF modell kapcsolatát korlátozott időintervallumon konvektív feltételek mellett. Mivel a Yi et al. (2001) modell bemenő adatainak egyike a szenzibilis hőáram, ezért célszerűnek tartottuk, hogy a korábbi elemzést itt újra megismételjük és feltérképezzük a részecskemódszer által

meghatározott planetáris határréteg és a Yi et al. (2001) modell által szolgáltatott magasságadatok összehasonlítását. Az elemzést a már korábban megállapított májustól szeptember végéig tartó időszakban végeztük el (2007-re és 2008-ra). Az eredmény a 25. ábrán látható.



25. ábra. A vizsgált időszakban, konvektív viszonyok hatására kialakuló PHR magasság adatok összehasonlítása a részecskemódszer és a Yi et al. (2001) modell alapján. Az ábrán feltüntettük az illesztett egyenes egyenletét, valamint a lineáris korrelációs együttható négyzetét (R^2).

Az elemzés során megállapítható, hogy a modell által szolgáltatott adatok nagymértékben eltérnek a részecskemódszerrel meghatározott határrétegmagasság-adatoktól. A Yi et al. (2001) modellnél már korábban megfigyelt jelenség itt is megfigyelhető. A modell körülbelül 1000-1200 méterig felülbecsüli a határrétegmagasság-adatokat, míg a nagyobb magasságokban felülbecslés tapasztalható.

Fontos megállapítani, hogy a Yi et al. (2001) modell által kapott adatok kevés egyezést mutatnak más módszer által számolt PHR magasság adatokkal. A modell szisztematikusan alacsony magasságokban felül, míg nagy magasságokban alulbecsüli a tényleges keveredési réteg magasság adatokat.

Összefoglalás

Diplomamunkám célja az volt, hogy a planetáris határréteg (PHR) szerkezetét vizsgáljam a rendelkezésünkre álló repülőgépes mérési adatok segítségével, és meghatározzam a PHR magasságát.

Munkám során elvégeztem a 2007. júniusa óta működő CS215 műszer által szolgáltatott adatok feldolgozását, és a hőmérsékleti, CO₂ és specifikus nedvesség profilok elemzését.

A hőmérsékleti és egyéb említett profilok alapján lehetőség nyílt a planetáris határréteg magasságának meghatározására. A Magyarországon egyedi adatbázis alapján dolgozatomban a PHR magasságszámítás eredményeit mutattam be háromfajta módszer segítségével, és a kapott eredményeket más forrásból származó adatokkal vettem össze (ECMWF modell; Yi et al. (2001) modell). Összehasonlítottam az egyes módszerek folyamatát és az általuk kapott eredményeket, illetve következtetéseket vontam le az egyes módszerek hatékonyságáról. A kibővített részecskemódszer alkalmazásával és a több profil elemzését felhasználva közel azonos eredményekhez jutottunk, mint amikor a részecskemódszer felhasználásával állapítottuk meg a planetáris határréteg magasságát. A részecskemódszert összehasonlítottuk különböző időjárási helyzetekben az egyes modellekkel, mely során azt a tapasztalatot vontuk le, hogy a két modell nagymértékben eltér egymástól. Az ECMWF a különböző időjárási helyzetekben rendszerint felülbecsüli, a Yi et al. (2001) modell rendszerint alulbecsüli a planetáris határréteg magasságát.

Fontos megemlíteni, hogy minden légköri transzportmodellnek egyik alapvető bemenő alapadata a planetáris határréteg (PHR) vastagsága. A modellező munka csak akkor lehet pontos, ha a PHR vastagság adatok megbízhatóak. Az adatok megbízhatóságának ellenőrzéséhez mérési adatokra van szükség. Munkám során lehetőség nyílt arra, hogy magyarországi adatok alapján ellenőrizhessük a PHR vastagság becslésére szolgáló modellek eredményeit. A mérési adatokból egy adatbázist készítettünk és ezt az adatbázist hasonlítottuk össze más forrásból származó adatokkal, melynek köszönhetően objektív véleményt alkothattunk a modellezett PHR magasság adatokról.

Köszönetnyilvánítás

Ezúton szeretném megköszönni dr. Barcza Zoltán témavezetőmnek, a rengeteg segítséget, a folyamatos biztatást, a sok türelmet, a lelkes odaadó segítőkész és hozzáértő témavezetését, a rengeteg adatot, amit biztosított számomra, hogy a dolgozat témáját minél több oldalról megvizsgálhassam.

Köszönettel tartozom dr. Haszpra Lászlónak a dolgozat ellenőrzésében nyújtott segítségért és a rengeteg fontos adatért, amit rendelkezésemre bocsátott.

Köszönettel tartozom Tarczay Klárának a programozásban nyújtott segítségéért. Köszönet a rengeteg türelemért és az odaadó segítségért.

Köszönettel tartozom Ihász Istvánnak az ECMWF MARS adatbázisához való hozzáférés lehetőségének biztosításáért.

Köszönettel tartozom továbbá azoknak az embereknek, akik lelkesítettek, bátorítottak véleményt alkottak a dolgozatomról és türelemmel voltak irántam ebben a nehéz időszakban is.

Irodalomjegyzék

Bakwin, P. S., Davis, K. J., Yi, C., Wofsy, S. C., Munger, J. W., Haszpra, L., Barcza, Z., 2004. Regional carbon dioxide fluxes from mixing ratio data. *Tellus B* 56, 301-311.

Barcza, Z. 2001. Long term atmosphere/biosphere exchange of CO₂ in Hungary. Ph.D. thesis, Eötvös Loránd University, Budapest. 115p.

Barcza, Z., Haszpra, L., Davis, K., 2005. A practical guide to the virtual tall towers approach (with examples). Technical Note. 6 pp.

Coulter, R. L., 1979. A comparison of three methods for measuring mixing-layer height. *Journal of Applied Meteorology* 18, 1495-1499.

Haszpra, L. és Barcza, Z., 2005. Légköri szén-dioxid-mérések Magyarországon. *Magyar Tudomány* 50/1, 104-112.

Haszpra, L., Barcza, Z., Bakwin, P. S., Berger, B. W., Davis, K. J., Weidinger, T., 2001. Measuring system for the long-term monitoring of biosphere/atmosphere exchange of carbon dioxide. *Journal of Geophysical Research* 106D, 3057-3070.

Haszpra, L., Barcza, Z., Davis, K. J., Tarczay, K., 2005. Long-term tall tower carbon dioxide flux monitoring over an area of mixed vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 132, 58-77. doi:10.1016/j.agrformet.2005.07.002

Haszpra, L., Barcza, Z., Hidy, D., Szilágyi, I., Dlugokencky, E., Tans, P., 2008. Trends and temporal variations of major greenhouse gases at a rural site in Central Europe. *Atmospheric Environment* 42, 8707-8716. doi:10.1016/j.atmosenv.2008.09.012

Hennemuth, B., and Lammert, A., 2006. Determination of the atmospheric boundary layer height from radiosonde and lidar backscatter. *Boundary-Layer Meteorology* 120, 181-200. DOI 10.1007/s10546-005-9035-3

Holzworth, G. C., 1964. Estimates of mean maximum mixing depths in the contiguous united states. *Monthly Weather Review* 92, 235-242.

IPCC, 2007. *Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA, 996 pp.

Kaimal, J.C., Abshire, N.L., Chadwick, R.B., Decker, M.T., Hooke, W.H., Kroepfli, R.A., Neff, W.D., Pasqualucci, F., Hildebrand, P.H., 1982. Estimating the depth of the daytime convective boundary layer. *Journal of Applied Meteorology* 21, 1123-1129.

Kovács, E., 2006. Üvegházhatású gázok légköri mennyiségének monitorozása Magyarországon. *Tudományos Diákköri Dolgozat. ELTE Meteorológiai Tanszék.* pp 33.

Seibert, P., Beyrich, F., Gryning, S. E., Joffre, S., Rasmussen A., and Tercier, P., 2000. Review and intercomparison of operational methods for the determination of the mixing height. *Atmospheric Environment* 34, 1001-1027.

Stull, R. B., 1988. *An introduction to boundary layer meteorology.* Atmospheric Sciences Library, Kluwer Acad., Norwell, Mass. pp 666.

Wenhardt, T., 2007. A planetáris határreteg tulajdonságainak vizsgálata magyarországi repülőgépes mérések alapján. *Tudományos Diákköri Dolgozat. ELTE Meteorológiai Tanszék,* pp. 31.

Yi, C., Davis, K. J., Berger, B. W., Bakwin, P. S., 2001. Long-term observations of the dynamics of the continental planetary boundary layer. *Journal of Atmospheric Sciences*, 58: 1288-1299.

Függelék

DÁTUM	Repülés időtartam (UTC)	Szinoptikus helyzet	PHR magassága [m]				
			Részecske módszer	Kibővített részecske módszer	ECMWF	Yi modell	Több profil elemzése
2007.06.25	12:44 - 14:02	Nincs	2022	2242	2200	1745	2020
2007.07.01	10:50 - 13:03	Front	1460	1709	1900	1312	NM
2007.07.03	08:21 - 09:40	Nincs	1027	1418	1300	842	NM
2007.07.06	12:17 - 13:41	Nincs	NM	400	2300	1249	2100
2007.07.09	11:04 - 12:15	Front	490	1102	2500	1447	490
2007.07.12	11:00 - 12:15	Front	1573	1700	1500	995	1573
2007.07.14	12:54 - 14:14	Nincs	1831	1925	1900	1306	NM
2007.07.16	10:26 - 11:49	Nincs	1631,5	1761	1850	1001	1630
2007.07.18	08:20 - 09:43	Front	832	878	872	622	832
2007.07.30	15:34 - 16:50	Front	491	461	1100	NM	491
2007.08.02	09:27 - 11:07	Nincs	1210,5	1383	1420	1210	1585
2007.08.03	12:54 - 14:49	Front	NM	NM	880	490	800
2007.08.05	11:40 - 13:00	Nincs	1924	2233	2150	1526	2014
2007.08.07	12:27 - 13:50	Nincs	2314	2434	2050	1172	2200
2007.08.14	14:10 - 15:28	Nincs	2010	2030	2060	1179	1988
2007.08.17	15:01 - 16:24	Nincs	528	528	1250	1520	528
2007.08.21	11:33 - 12:50	Front	2066	2338	1940	1106	NM
2007.09.08	11:29 - 13:30	Nincs	514	547	1200	692	514
2007.09.11	10:44 - 12:03	Front	807,5	815	1560	714	580
2007.09.14	13:16 - 16:04	Nincs	1335	1408	1260	1445	1316
2007.09.16	10:42 - 12:30	Nincs	587,5	745	1200	1211	1200
2007.09.17	11:40 - 13:37	Nincs	1085,5	994	1300	1013	1032
2007.09.23	13:19 - 14:36	Nincs	1093,5	1141	950	1231	1129
2007.09.26	12:36 - 13:45	Front	809	786	960	912	1200
2007.09.29	11:41 - 13:39	Nincs	1436,5	1525	1600	1235	1548
2007.09.30	12:10 - 14:05	Nincs	603	637	920	974	820
2007.10.06	12:10 - 13:59	Front	1059	1152	1080	680	1100
2007.10.08	14:03 - 15:19	Nincs	1237	1275	1280	1154	1270
2007.10.13	11:14 - 13:49	Front	1255	1309	1400	951	1230
2007.10.16	12:06 - 13:21	Nincs	532	864	540	1164	800
2007.10.20	09:50 - 11:22	Front	446	446	1230	466	500
2007.10.31	13:21 - 15:45	Front	NM	NM	1020	889	NM
2007.11.08	13:51 - 15:18	Front	489,5	490	380	NM	524
2007.11.12	12:10 - 13:50	Front	458	NV	939	685	565
2007.11.22	11:16 - 13:00	Front	NM	NV	775	NM	516

2007.11.26	11:30 - 13:30	Front	430	NV	1668	425	NM
2007.11.29	10:11 - 12:07	Nincs	664,5	NV	482	626	769
2007.12.06	10:31 - 12:30	Nincs	516	NV	154	221	513
2007.12.11	12:27 - 14:01	Front	NM	NV	800	339	780
2007.12.15	10:20 - 11:52	Nincs	1050	NV	900	425	1300
2007.12.20	12:20 - 13:59	Nincs	NM	NV	378	467	901
2007.12.27	12:08 - 13:47	Nincs	NM	NV	435	NM	NM
2008.01.05	10:10 - 12:02	Nincs	310	NV	255	206	415
2008.01.20	13:00 - 14:27	Front	491	NV	132	674	460
2008.01.26	12:48 - 14:06	Front	460	NV	146	450	500
2008.02.04	12:29 - 13:59	Front	350	NV	660	480	470
2008.02.06	13:17 - 14:47	Nincs	NM	NV	391	460	500
2008.02.12	11:55 - 12:55	Nincs	1041	NV	925	608	1044
2008.02.19	11:43 - 14:20	Nincs	495	NV	873	807	1040
2008.04.10	13:25 - 15:28	Front	1368	NV	1595	1759	1330
2008.04.13	11:12 - 12:47	Front	1211,5	NV	1986	1104	1170
2008.04.20	09:19 - 11:55	Front	2000	NV	2091	1578	NM
2008.04.30	12:59 - 14:43	Front	1489	NV	1786	1481	1460
2008.05.05	10:41 - 12:15	Nincs	836,5	NV	1348	1227	1235
2008.05.10	09:26 - 11:40	Nincs	1609	NV	1907	NM	2000
2008.05.15	11:45 - 14:05	Front	NM	NV	2372	1331	NM
2008.05.22	10:39 - 12:21	Front	841,5	NV	1501	1212	1500
2008.05.24	11:36 - 13:19	Nincs	1854	NV	1627	1378	1540
2008.06.24	09:47 - 11:46	Front	1068,5	NV	1421	NM	1540
2008.06.29	09:56 - 12:23	Nincs	1474	NV	1775	1231	NM
2008.08.03	12:21 - 13:02	Nincs	500	NV	1700	1174	500
2008.09.24	12:24 - 14:00	Front	NM	NV	1065	1100	1300
2008.09.27	12:52 - 14:25	Front	1082	NV	1730	888	1082
2008.10.02	13:23 - 14:59	Front	NM	NV	1122	1015	510
2008.10.10	10:23 - 12:40	Nincs	500	NV	1000	909	1100
2008.10.13	10:10 - 12:41	Nincs	NM	NV	664	744	870
2008.10.26	09:49 - 11:34	Nincs	1184	NV	869	560	1150
2008.11.02	09:57 - 11:25	Front	NM	NV	493	NM	800
2008.11.26	12:43 - 14:14	Front	NM	NV	1024	690	1900
2009.01.07	11:12 - 12:46	Nincs	NM	NV	649	NM	1070
2009.01.18	12:37 - 14:32	Front	NM	NV	406	NM	570

Az eredmények összefoglalása és számszerű bemutatása. NM=nem megállapítható.NV=nem vizsgáltuk.