

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Meteorológiai Tanszék

SEVIRI műholdas mérések feldolgozása



KÉSZÍTETTE: Dobor Laura
II. éves meteorológus MSc hallgató

Témavezetők:
dr. Barcza Zoltán
Kern Anikó
dr. Pongrácz Rita
ELTE Meteorológiai Tanszék

Budapest, 2011.

Tartalomjegyzék

| | |
|---|----|
| 1. Bevezető..... | 3 |
| 2. Az EUMETSAT | 5 |
| 3. A felhasznált adatok és módszerek | 9 |
| 3.1. A Nowcasting Munkacsoport | 9 |
| 3.2. A vizsgált paraméterek bemutatása | 10 |
| 3.3. A vizsgált paraméterek származtatásának módszerei | 11 |
| 3.4. A származtatáshoz használt adatok..... | 12 |
| 3.5. Származtatott produktumok | 14 |
| 3.6. Az evapotranszspiráció becslésére alkalmazott módszerek..... | 16 |
| 3.7. Rádiószonda adatok | 20 |
| 4. Eredmények | 21 |
| 4.1. Validáció..... | 22 |
| 4.2. Térbeli eloszlások | 29 |
| 4.3. Napi menetek | 32 |
| 4.4. Evapotranszspiráció becslése..... | 38 |
| Összefoglalás | 41 |
| Köszönetnyilvánítás..... | 43 |
| Irodalomjegyzék | 44 |

1. Bevezető

Napjainkban a folyamatos és nagymértékű technológiai fejlődés következtében a meteorológiában használt mérés technika és műszerek megújulása szinte mindennapos. A fejlesztések elsődleges célja, hogy egyre részletesebb és pontosabb információt szerezzünk környezetünk alaposabb megismerése érdekében (EOS weboldal, 2010). A meteorológia alapvetően méréseken alapuló tudomány. Emellett természetesen modellek megalkotására is szükség van, hiszen az időjárás számszerű előrejelzése nem létezik korszerű számítógépes modellek nélkül. Az adatasszimiláció az időjárás modellezésének egyik részfolyamata, mely során kezdeti feltételeket állítunk elő a numerikus időjárás előrejelző modell számára. Minden előrejelzés alapja a jelenlegi meteorológiai állapot minél pontosabb, fizikailag konzisztens leírása annak érdekében, hogy az előállított meteorológiai mezők a lehető leghűségesebben tükrözzék a valóságot (Bölni, 2003). Ennek alapfeltétele, hogy megfelelő térbeli és időbeli felbontású, nagy pontosságú méréseket tudjunk végezni. Mivel a felszíni, vagy a felszínről indított rádiószondával végzett mérések térbeli reprezentativitása kicsi és időben korlátozott, ezért alternatív mérési technikákra van szükség.

A műholdak megjelenése óta lehetőség van olyan területek meteorológiai paramétereinek becslésére is, melyek addig elérhetetlenek voltak, vagy ahol a mérések költsége miatt nem lehetséges állandó megfigyeléseket végezni. Az időbeli felbontás javítása mellett a műholdas mérések további jelentős tulajdonsága, hogy térben folytonos leképezésekre, akár a légkör vertikális szerkezetének leírására is van lehetőség (Gelybó, 2006). Az elmúlt két évtizedben a meteorológiai célú műholdak óriási fejlődésen mentek keresztül: a mérési csatornák száma megtöbbszöröződött, és emellett egyre nagyobb térbeli és időbeli felbontású megfigyeléseket végezhetünk. Ennek következtében megnőtt a műholdas adatok tárigénye, mely feldolgozási és archiválási problémákat vet fel. Fejlett szoftverek segítségével számos meteorológiai paraméter származtatható műholdas adatokból, ám ezek értelmezése valamint validációja, azaz független mérési adatokkal (például rádiószondás vagy felszíni mérésekkel) történő összevetése további munkát igényel (Kern et al., 2008).

A földi légkör üvegházhatásának jelentős részét a vízgőz jelenléte okozza, így annak vizsgálata hosszú távon a globális klímaváltozás szempontjából, míg rövid távon az időjárási folyamatok előrejelzése szempontjából meghatározó (Schmidt et al., 2010).

A vízgőztartalom légköri folyamatokban betöltött szerepe nagyon sokrétű. A légköri vízgőz számos visszacsatolási mechanizmuson keresztül befolyásolja a globális éghajlat változását. A tengerfelszín és a fölötte elhelyezkedő légrétegek felmelegedésével fokozódhat a párolgás, aminek következtében nőhet a légkör vízgőztartalma, mivel a melegebb levegő több vízgőzt képes felvenni. Ezzel tovább erősödhet az üvegházhatás, mivel ily módon az egyik legfontosabb üvegházhatású gáz mennyisége növekszik a légkörben (Dessler and Davis, 2010). Emellett a felhők elnyelik a felszínről érkező infravörös sugárzást, és az elnyelt mennyiség arányában fejtenek ki melegítő hatást. A légrétegek megnövekedett vízgőztartalma ugyanakkor negatív visszacsatolást is kiválthat. A felhők visszaverik a beérkező rövidhullámú sugárzás egy részét, így jelenlétük gátolja a felszín felmelegedését. A vízgőz okozta visszacsatolás mértékét nehéz megbecsülni, mivel a vízgőz — ellentétben pl. a széndioxiddal — nem egyenletesen oszlik el a troposzférában.

A légköri vízgőz mennyiségének meghatározása nagy térbeli és időbeli változékonysága és rövid tartózkodási ideje miatt számos nehézségbe ütközik. Erre kínál alternatív megoldást az egységnyi alapterületre vonatkozó, vertikálisan integrált vízgőz mennyiség műholdas mérésekből történő származtatása.

Az infravörös tartományban végzett műholdas mérésekből történő vízgőztartalom becslés a látható tartományban végzett mérések légköri korrekciójához is felhasználható (Kern et al., 2008). Különböző felszíni paraméterek (pl. növényborítottság, fenológiai ciklus, növényi produktivitás) származtatása során elsődleges cél a légköri hatások kiküszöbölése (pl. a vízgőz sugárzásmódosító hatása), hiszen nem a légkör külső határára érkező radiancia, hanem a felszínről kilépő radiancia alapján történik e paraméterek torzítatlan becslése. Az infravörös csatornából kinyerhető vertikálisan integrált vízgőztartalom alapján elvégzett légköri korrekció segítségével a látható tartományban távérzékeléssel mért jelek alapján visszakövetkeztethetünk a felszíni radianciára, melyből számos felszíni paraméter származtatható (ez utóbbira vonatkozóan lásd pl. Barcza et al., 2009).

Munkánk során az EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites, Meteorológiai Műholdak Hasznosításának Európai Szervezete) és az ESA (European Space Agency, Európai Űrügynökség) által közösen üzemeltetett MSG-2 geostacionárius műholdon elhelyezett SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and Infrared Imager, Továbbfejlesztett forgó látható és infravörös tartományú képalkotó) szenzor mérési adatai alapján becsljük a légkör kihullható vízgőztartalmát.

2. Az EUMETSAT

Az 1986-ban alakult EUMETSAT az európai meteorológiai műholdakat fenntartó szervezet. Legfőbb feladata megtervezni, felépíttetni, fenntartani és hasznosítani az operatíván működő meteorológiai műholdak európai rendszerét. Az időjárás analízisének és előrejelzésének támogatásán kívül jelentős figyelmet fordítanak az éghajlat és a környezet folyamatos megfigyelésének elősegítésére, beleértve a globális klímaváltozás nyomon követését. Az EUMETSAT jelenleg 24 tagállammal és 6 társult taggal rendelkezik (EUMETSAT weboldal, 2010a). Hazánk 1999 óta társult tagja, majd 2009. január 1-től teljes jogú tagja az EUMETSAT-nak. Magyarország ettől kezdve közszolgálati illetve tudományos célra korlátlanul hozzáférhet a szervezet műholdjainak adataihoz, valamint teljes szavazati joggal vesz részt a döntéshozó és tanácsadó testületekben. A teljes jogú tagsággal lehetőség nyílt arra is, hogy a magyar intézmények és cégek részt vegyenek a kutatásokban, fejlesztésekben, valamint hogy a szervezet által kiírt pályázatokon indulhassanak.

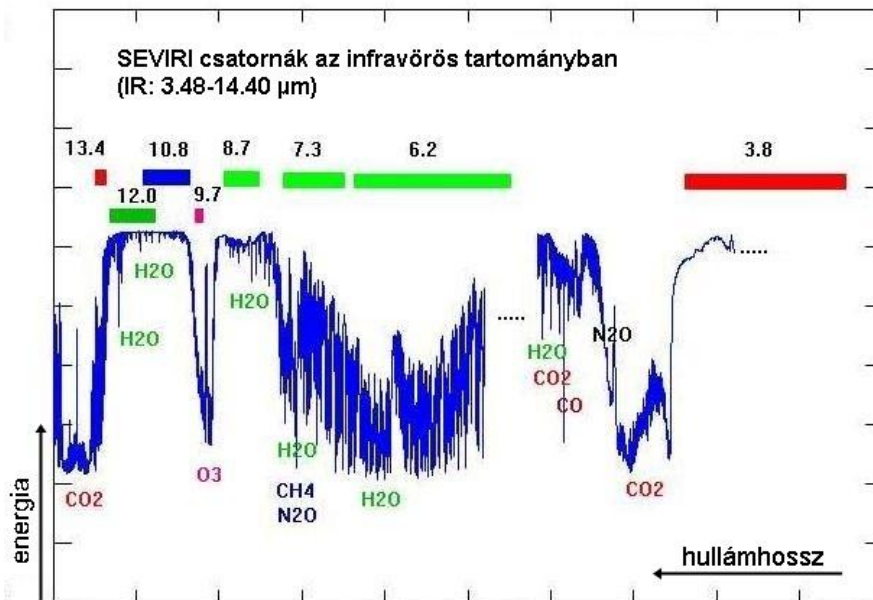
A Meteosat-1-et, az EUMETSAT első geostacionárius meteorológiai műholdját 1977-ben állították pályára (EUMETSAT weboldal, 2010b). A geostacionárius műholdak kb. 36000 km magasságban folyamatos mérést biztosítanak ugyanazon területről és általában 15 percenként szolgáltatnak adatokat. A Meteosat-1-et hat hasonló típusú műhold követte. Az MSG-1-et (Meteosat-8) (METEOSAT Second Generation), az első második generációs műholdat 2002-ben bocsátották fel, 2005-ben pedig az MSG-2-t (Meteosat-9) (1. ábra). A második generációs Meteosat műholdakat technikailag fejlettebb műszerekkel szerelték fel abból a célból, hogy magasabb szinten elégítsék ki mind az időjárás előrejelzés, mind a klímakutatás igényeit.

A SEVIRI az MSG műhold legfőbb műszere, amely 12 spektrális csatornában érzékeli a bejövő elektromágneses sugárzást 3 km-es (két látható (VIS), egy közeli infravörös (NIR) és 8 infravörös (IR) csatorna) és 1 km-es (egy nagyfelbontású látható (HRVIS) csatorna) területi felbontásban. A 2. ábrán az infravörös tartomány SEVIRI csatornáit láthatjuk a legjelentősebb üvegházgázok elnyelési sávjainak feltüntetésével. A műszer 15 perc alatt tapogatja végig a fél földgömböt, azaz a műhold látótartományát. Az MSG műholdakon továbbá a GERB (Geostacionary Earth Radiation Budget, Geostacionárius földi sugárzást mérő) műszer is megtalálható, mely a Föld sugárzási egyenlegét méri.



1. ábra: Az MSG-2 meteorológiai műhold (ESA weboldal, 2010)

Ezekon kívül vészjelző, kommunikációs valamint az adattovábbítást segítő egységek is helyet kaptak a műholdakon. Az első poláris meteorológiai műholdat a MetOp-A-t 2006. október 19-én lőtték fel, melynek felszereltsége a jelenleg megfigyelést végző amerikai poláris műholdakét is felülmúlja. Megtalálható rajta számos olyan szondázó műszer, mely alkalmas a numerikus időjárás előrejelző modellek számára nélkülözhetetlen vertikális hőmérséklet- és nedvességprofilok mérésére valamint a légkör összetételének meghatározására. Ilyenek például az AMSU (Advanced Microwave Sounding Unit, Fejlett Mikrohullámú Szondázó Egység), az MHS (Microwave Humidity Sounder, Mikrohullámú Nedvesség Szondázó), a HIRS (High Resolution Infrared Sounder, Nagyfelbontású Infravörös Szondázó) vagy a GOME-2 (Global Ozone Monitoring Experiment-2, Globális Ózonmegfigyelő Kísérlet-2) amellyel adott légoszlop teljes nyomanyag tartalma mellett a vertikális nyomanyag profilja is becsülhető.



2. ábra: SEVIRI csatornák az infravörös tartományban, valamint a legjelentősebb üvegházgázok elnyelési sávja. (ESA weboldal, 2010).

Az EUMETSAT számos munkacsoportot szervezett annak érdekében, hogy algoritmusokat valamint szoftvereket állítsanak elő a meteorológiai műholdadatok magas szintű és egységes feldolgozására. A szoftverek és a velük előállított produktumok bármely tagállam számára elérhetőek. A munkacsoportokat két osztályba sorolhatjuk: ezek a nemzetközi munkacsoportok, valamint az EUMETSAT központjában dolgozó szakemberek. A nemzetközi munkacsoportok, azaz a SAF-ok (Satellite Application Facility, Műholdas alkalmazási lehetőségek) vezetését és feladatait egy-egy nemzeti meteorológiai intézet látja el. A különböző témakörökben létrejött SAF-ok célja, hogy műholdas produktumokkal lássa el a felhasználókat. A központi munkacsoportot és a SAF-okat az EUMETSAT földi bázisa kapcsolja össze (ez az ún. Ground Segment). Eddig összesen az alábbi nyolc munkacsoport alakult meg: Nowcasting Munkacsoport, Numerikus Időjárás-előrejelző Munkacsoport (Global Navigation Satellite System Receiver for Atmospheric Sounding, A légköri szondázást segítő globális navigációs műholdrendszer), Meteorológiai Munkacsoport, Éghajlat-megfigyelő Munkacsoport, Ózon és Levegőkémiai Munkacsoport, Földfelszín-megfigyelés Munkacsoport, Operatív Hidrológiai és Vízgazdálkodás Munkacsoport (Zsugyel, 2009), és az Óceán és Tengerjég-megfigyelés Munkacsoport (1. táblázat).

1. táblázat: A nemzetközi munkacsoportok, azaz a SAF-ok.

| Munkacsoportok | Rövidítés | Vezető ország | Intézet |
|--|------------------|----------------------|----------------|
| Nowcasting Munkacsoport | NWC SAF | Spanyolország | AEMet |
| Óceán és Tengerjég-megfigyelés Munkacsoport | O3M SAF | Franciaország | MF |
| Éghajlat-megfigyelő Munkacsoport | CM SAF | Németország | DWD |
| Operatív Hidrológia és Vízgazdálkodás Munkacsoport | H SAF | Olaszország | SMA |
| GRAS Meteorológia Munkacsoport | GRAS SAF | Dánia | DMI |
| Földfelszín Megfigyelés Munkacsoport | LSA SAF | Portugália | IM |
| Numerikus Időjárás Előrejelzés Munkacsoport | NWP SAF | Nagy-Britannia | UKMO |
| Ózon és Levegőkémiai Munkacsoport | OSI SAF | Finnország | FMI |

Dolgozatomban az elsőként említett Nowcasting Munkacsoport produktumaival foglalkozunk. A Nowcasting Munkacsoport központja a Spanyol meteorológiai szolgálat, az AEMet (Agencia Estatal de Meteorologia, korábbi nevén INM) (NWC SAF weboldal, 2010).

3. A felhasznált adatok és módszerek

3.1. A Nowcasting Munkacsoport

A Nowcasting Munkacsoport teljes angol neve: „SAF in support of Nowcasting and Very Short-range Forecasting” („A nowcasting-et és az ultrarövidtávú előrejelzést segítő munkacsoport”). A nowcasting szó az időjárási helyzet elemzését és a rövid távú (0-6 órás) előrejelzésének készítését jelenti. A munkacsoport célja, hogy az időjárás analízisét valamint annak rövid távú előrejelzését segítő műholdas produktumokat elérhetővé tegye a szakemberek számára. Mindehhez egy olyan szoftvert állít elő, amely a felhasználó számára MSG és MetOp adatokból helyben, gyorsan és operatíván tudja meghatározni a nowcasting-et segítő produktumokat.

Két produktumcsomagot állítanak elő, melyeket folyamatosan fejlesztenek: a SAFNWC/MSG valamint a SAFNWC/PPS programcsomagot. Az előbbi MSG, míg az utóbbi MetOp és NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration, Nemzeti Éghajlati Adatközpont) adatok helyi feldolgozására készült. A PPS programcsomagot főként az északi országokban alkalmazzák, ahol a geostacionárius műholdak területi felbontása már nem megfelelő, de a poláris műholdak időbeli felbontása jó. Több produktum esetén a szoftverek futtatásához nem csupán műholdas adatokra, hanem numerikus időjárás előrejelző modellek eredményeire is szükség van.

Az MSG programcsomag az alábbi 13 produktumot állítja elő: 1. Felhődetektálás (Cloud Mask, CMA); 2. Felhőtípus-oszályozás (Cloud Type, CT); 3. A felhőtető hőmérséklete és magassága (Cloud Top Temperature and Height, CTTH); 4. A csapadék hullás valószínűsége (Precipitating Cloud, PC); 5. Konvektív felhőből hulló csapadék intenzitása (Convective Rain Rate, CRR); 6. Függőleges légoszlop teljes vízgőztartalma (Total Precipitable Water, TPW); 7. Függőleges légoszlop 3 rétegének vízgőztartalma (Layer Precipitable Water, LPW); 8. Instabilitási Index (Stability Analysis Imagery, SAI); 9. Nagyfelbontású látható sávból származtatott szélvektorok (High Resolution Wind, HRW), 10. Automatikus Műholdkép Interpretáció (Automatic Satellite Image Interpretation, ASII); 11. Gyorsan Fejlődő Zivatarok (Rapid Developing Thunderstorms, RDT); 12. Légtömeg Analízis (Air Mass Analysis, AMA); valamint 13. Fizikai Módszereken Alapuló Produktum (SEVIRI Physical Retrieval, SPHR). A

produktumokra a PGE (Product Generation Element, Az előállított produktumok egyik eleme) rövidítést használják, valamint a fenti sorrendben számozzák 01-13-ig.

Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál felhasználják a PGE02 (Felhőtípus-oszályozás) és a PGE03 (A felhőtető hőmérséklete és magassága) NWCSAF produktumokat az ALADIN numerikus időjárás előrejelző modellbe történő MSG fényességi hőmérsékletek asszimilációjának előfeldolgozási lépéseiben. A származtatott produktumok alapján az infravörös csatornákat csak olyan pixeleken asszimilálják ahol a felhőtető magassága a csatorna súlyfüggvényének maximuma alatt található (azaz vagy derült, vagy csak alacsony szintű felhőzettel rendelkező rácspontokon) (Montmerle et al., 2007).

A PPS programcsomag produktumai megegyeznek az MSG csomag első négy produktumával. A produktumok formátuma vagy raszter (mátrix, kép) vagy vektor. Ezek kirajzoltatása térképre vagy műholdképre egy külön programmal lehetséges, de ez a megjelenítő program nem része a programcsomagnak.

3.2. A vizsgált paraméterek bemutatása

Munkánk során a SAFNWC/MSG szoftver csomag 2010-es verzióját adaptáltuk az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén. Az általunk vizsgált vízgőz-produktumok ún. Felhőmentes égboltra vonatkozó produktumok (Clear Sky Products), azaz a vízgőztartalom származtatása műholdas mérésekből kizárólag a felhőmentes pixeleken lehetséges. Ezért minden ilyen esetben először a felhőmaszk meghatározására (C_{Ma}, PGE01) van szükség. Ezek után van lehetőség a többi származtatott mező előállítására.

A következőkben röviden áttekintjük a vizsgálatainkban szereplő három származtatott paraméter főbb jellemzőit.

A függőleges légoszlop vízgőztartamát becslő produktum (TPW, PGE06) mm-ben határozza meg az egységnyi alapterületre vonatkozó, vertikálisan integrált vízgőz mennyiségét. A függőleges légoszlop 3 rétegének vízgőztartalmára vonatkozó produktum (LPW, PGE07) nyomási szintek által kijelölt három légréteg összes kihullható vízgőz tartalmát becsli. A legalacsonyabb réteg az 1013-840 hPa nyomási szintek közötti, közelítőleg a nappali planetáris határrétegre (BL, Boundary Layer) jellemző réteg. A középső réteg 840-437 hPa-ig terjed (ML, Middle Layer), míg a felső

réteg a 437 hPa feletti tartományt foglalja magában (HL, High Layer). A fent leírt kétfajta származtatott mennyiséget egymástól függetlenül, statisztikai módszerek alapján számítja a program (lásd később), ezért az utóbb említett produktum (PGE07) keretében megadnak egy mérőszámot, mely azt vizsgálja, hogy a rétegek vízgőzmennyiségének összege mennyire adja vissza a teljes légoszlop vízgőzmennyiségét.

A statisztikai módszereken kívül a 2010-ben kiadott, továbbfejlesztett szoftvercsomag segítségével lehetőség van fizikai módszerek alapján származtatni a levegő integrált vízgőztartalmát (EUMETSAT, 2010a). A PGE13 fizikai módszerekkel becsli mind a teljes légoszlop, mind a fent említett három légréteg kihullható vízgőztartalmát. E produktum kiemelt jelentőségű, hiszen 2009-ben még nem volt elérhető ez a – várakozásaink szerint – pontosabb vízgőztartalom becslési módszer, így keveset tudunk a produktum minőségéről és gyakorlati használhatóságáról.

3.3. A vizsgált paraméterek származtatásának módszerei

Az NWC SAF a PGE06 és PGE07 származtatásához egy Neural Network elnevezésű, statisztikai alapokon nyugvó módszert használ. Az algoritmus fejlesztése során a légkör vízgőztartalma és a műhold által mért radianciák bizonyos kombinációja között függvénykapcsolatot állítottak fel rádiószondás mérési eredmények illetve ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts, Európai Középtávú Időjárás Előrejelző Központ, <http://www.ecmwf.int>) analízis mezők felhasználásával. Miután ez megtörtént, a műhold által mért radianciák alapján az előre meghatározott függvény becsli a levegő vízgőztartalmát (tehát a múltbeli adatokra vonatkozó statisztikai kapcsolat alapján következtet a jelenlegi vízgőzmennyiségre). Mivel az MSG műholdak számos hullámhossz tartományon végeznek méréseket, melyekből hét csatorna érzékeny a vízgőz mennyiségére különböző vertikális rétegekben (2. ábra), ezért ún. súlyfüggvények használatával lehetőség nyílik vertikális vízgőzprofil becslésére is. A súlyfüggvények az egyes hullámhossztartományok vertikális elnyelődési profiljai (Gelybó, 2006; EUMETSAT, 2010b).

A PGE13 inverz módszerrel (tangens lineáris módszer), fizikai alapon becsli a vertikálisan integrált vízgőztartalmát. Az inverz módszerek lényege, hogy valamilyen modell segítségével becslünk olyan adatokat, amire valójában mérési adataink is

rendelkezésre állnak, és e két információ felhasználásával következtetünk vissza a modell bizonyos tulajdonságaira, paramétereire. A modelleredmények előállításához felhasználjuk előzetes tudásunkat a vizsgált, pontosításra szoruló paraméterre vonatkozóan (ez a *background*, azaz háttérmező). Az inverz módszer során a mért és a modellezett értékek eltérését próbáljuk csökkenteni úgy, hogy a modell bizonyos paramétereit változtatjuk. A minimumhelyhez tartozó paraméter megadja a módszer alapján becsült értéket (ez az inverz módszer eredménye).

A PGE13 esetén a származtatási eljárás lefuttat egy sugárzás átviteli modellt (RTTOV, Radiative Transfer for the Television Infrared Observation Satellite (TIROS) Operational Vertical Sounder; Saunders et al., 1999), melyben a földfelszín kisugárzása, valamint az időjárás előrejelző modell által számított mezők értékei szerepelnek paraméterekként (ez a *background*, a teljes vertikálisan integrált vízgőztartalomra vonatkozóan). Ezzel a modell becsli a műhold által mért radianciát, mely a felszínről indulva a sugárzás átviteli modellnek megfelelően módosul. Mivel ugyanerre az értékre SEVIRI mérések is rendelkezésre állnak, a program kiszámítja a modellezett és a mért fényességi hőmérsékletek eltérését, majd annak érdekében, hogy ezt az eltérést minimalizálja, a sugárzás átviteli modellben változtatásokat eszközöl a vízgőzprofilra illetően (vagyis módosítja a profilt). Az eljárás addig próbálkozik újabb és újabb beállításokkal, míg a különbség optimális (a legkevesebb) lesz. Az így előállított vízgőzprofil lesz a legvalószínűbb helyes paraméter. Így a PGE13 vízgőztartalom becslései valójában egy-egy iterációs eljárás következtében jönnek létre (EUMETSAT, 2010c).

A fent leírtakon túl számos korrekcióra szükség van. Például a műhold által mért radiancia vagy fényességi hőmérséklet (IR csatornák esetén) nagyban függ a napmagasságtól, ezért első lépésben normalizálják az adatokat 45°-os napmagasságra.

3.4. A származtatáshoz használt adatok

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Természettudományi Kar Lágymányoson elhelyezkedő Északi tömbjének tetején található METEOSAT műholdvevő antennának köszönhetően az általunk felhasznált műholdas adatok sajátvételek. Az adatok archiválását a Geofizikai és Űrtudományi Tanszékén működő Űrkutató csoport végzi, így segítségükkel hozzájuthattunk a 2009-es év során eltárolt műholdas adatokhoz.

A továbbiakban áttekintjük, hogy milyen bemenő adatok szükségesek a vizsgálatainkban szereplő három produktum származtatásához. A 2. táblázatban látható, hogy az egyes produktumok esetén milyen hullámhosszú SEVIRI mérések létfontosságúak. A mérési adatokra negyedóránként van szükség minden produktum esetén, melyek kb. 3×3 km-es horizontális felbontásúak nadírban.

Minden PGE esetén szükség van a műhold zenitszögére, melyet a szoftver egy beépített függvény segítségével számít ki. Ez a szög attól függ, hogy milyen térbeli tartományt vizsgálunk. A szoftverben különálló konfigurációs fájlokban definiálhatjuk a vizsgált tartományt. A szoftver alapértelmezett kivágatait módosíthatjuk, ha a megfelelő konfigurációs fájlban megadjuk a terület középpontjának földrajzi koordinátáit, valamint a terület horizontális kiterjedését: a rácspontok sorainak és oszlopainak számával (a teljes Földre vonatkozó kivágat 3712×3712 rácspontot tartalmaz). Továbbá szükség van a domborzatot, valamint a szárazföldeket és tengereket tartalmazó mezőkre, melyek szintén megtalálhatóak a telepített szoftverben.

2. táblázat: Az általunk felhasznált produktumok előállításához szükséges SEVIRI csatornák.

| SEVIRI CSATORNA | HULLÁMHOSSZ TARTOMÁNY (μm) | PGE (Product Generation Element) | | | |
|--------------------|---|----------------------------------|---------|---------|----------|
| | | 01, CMa | 06, TPW | 07, LPW | 13, SPhR |
| HRVIS | 0,50-0,90 | ✓ | | | |
| VIS0.6 | 0,56-0,71 | ✓ | | | |
| VIS0.8 | 0,74-0,88 | ✓ | | | |
| NIR1.6 | 1,50-0,78 | ✓ | | | |
| IR3.9 | 3,48-4,36 | ✓ | | | |
| WV6.2 | 5,35-7,15 | | ✓ | ✓ | ✓ |
| WV7.3 | 6,85-7,85 | | ✓ | ✓ | ✓ |
| IR8.7 | 8,30-9,10 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| IR9.7 | 9,38-9,94 | | ✓ | ✓ | |
| IR10.8 | 9,80-11,80 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| IR12.0 | 11,00-13,00 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |
| IR13.4 | 12,40-14,40 | ✓ | ✓ | ✓ | ✓ |

A fizikai módszereken alapuló produktum esetén további bemeneti adatra van szükség, ugyanis ez az utólag kifejlesztett módszer már képes figyelembe venni a numerikus időjárás előrejelző modelladatokból származó a priori információt (lásd feljebb). Így a PGE13 legfontosabb bemenő adatai a SEVIRI mérésekből származó fényességi hőmérsékletek, valamint az előrejelzési mezőket tartalmazó GRIB (Gridded Binary fájlformátum, WMO szabvány a meteorológiai adatok közzétételére) fájlok.

A PGE13 előállításához napi négy darab (00+06 UTC, 00+12 UTC, 12+06 UTC, 12+12 UTC) előrejelzési állományra van szükség, valamint ügyelni kell arra, hogy az adott nap éjféli időpontjára rendelkezésre álljon az azt megelőző nap éjféltre vonatkozó előrejelzése (az előző nap indított 12+12 UTC előrejelzés). A futtatásainkhoz ECMWF előrejelzési mezőket használtunk fel. A GRIB állományokhoz az Országos Meteorológiai Szolgálat segítségével jutunk hozzá. Az ECMWF MARS (Meteorological Archive and Retrieval System, Meteorológiai archiváló és adatvisszanyerő rendszer) adatbázisból lekért adatok horizontális felbontása $0,5 \times 0,5^\circ$ -os, azaz kb. 50×50 km-es. A szoftver térben és időben interpolálja az előrejelzési mezőket, hiszen ezek felbontása jóval kisebb, mint a rendelkezésre álló SEVIRI méréseké.

Ha a felsorolt háttér adatok rendelkezésünkre állnak, elindíthatjuk a PGE-k futtatását, a PGE01-gyel, azaz a felhőmaszk meghatározásával kezdve.

3.5. Származtatott produktumok

A szoftver futtatása után HDF5 (Hierarchical Data Format, 5-ös verzió, Hierarchikus adatformátum, <http://www.hdfgroup.org>) formátumú fájlokhoz jutunk 15 perces időbeli felbontásban. A HDF formátum előnye, hogy számítógépes rendszertől független, önleíró adatformátum, ahol az adat és a metaadat (az adatot jellemző plusz információ) együtt van jelen kompakt formában.

A fájlok produktumtól függő tartalommal bírnak. Az 3. ábrán egy általános fájlszerkezetet láthatunk. A fájl neve tartalmazza a felhasznált MSG adat típusát (MSG1, MSG2), a produktum betűjelét (melyet az ábrán a három P betű szimbolizál), a dátumot és az időpontot, valamint az általunk konfigurált régió nevét.

Egy-egy fájl több származtatott paramétert is tartalmaz, melyek megjelenítéséhez színpalettákat is javasol a szoftver. A paraméter mezőkön kívül a

kivágatra vonatkozó információkhoz is hozzájuthatunk, melyek felhasználásával lehetőség van a térség földrajzi azonosítására (geolokációjára). Az adatok megjelenítése és elemzése céljából a geolokáció számítására saját programot készítettünk az EUMETSAT által kiadott útmutató alapján (EUMETSAT, 1999).



3. ábra: Egy kimenő HDF adatfájl általános szerkezete (EUMETSAT, 2010d).

A továbbiakban bemutatom a három alkalmazott produktum kimenő adatait. A függőleges légoszlop teljes vízgőztartalmára (TPW, PGE06) vonatkozó HDF5 fájlok tartalmazzák a légköri integrált vízgőzmezőt, melyben 0-255 terjedő skálán találhatunk értékeket (vagyis egy bájtos integerként tárolódik az adat). A 0 és 7 közötti értékek a zenit szöget és a szükséges hullámhossz csatornák meglétét jelző számok. A 8 és 127 közötti értékek a felhőmentes területeken származtatott vízgőztartalomra utalnak, de számábrázolási korlátok miatt értelemszerűen szükség van egy lineáris átalakításra ahhoz, hogy mm-ben kapjuk meg a kihullható vízgőz mennyiségét. A 128-255 terjedő értékek borult területekre vonatkoznak és a mért radiancia értékekre utalnak. Ezen az egy mezőn kívül még további három tartozik a TPW produktumához, melyek közül kettő a felhőzetre vonatkozik. Az egyik két értéket vehet fel: 0, ha adott pixel felhőmentes területnek, és 1, ha felhővel borított területnek vehető. A másik, felhőzetre vonatkozó mező részletesebben írja le a borultság mértékét egy adott pixelen, és 0-3-ig vehet fel értéket. A 0 értékhez az 1/8-os, az 1-hez 1/8-1/4 közötti, a 2-höz 1/4-1/2 közötti borultság tartozik, míg a 3 érték olyan pixelekre vonatkozik, ahol a rácsnégyzet több mint fele borult területet reprezentál. A negyedik mező a különböző csatornák radiancia értékeinek a hibáit próbálják kiszűrni, értékei szintén négy értéket vehetnek fel.

A függőleges légoszlop 3 rétegének vízgőztartalmát becslő produktum (LPW, PGE07) kimenő fájljai tartalmazzák az előzőekben leírt négy mezőt, azzal a kiegészítéssel, hogy míg a TPW esetén egy mező írta le a kihullható vízgőz értékeit, az LPW esetén ez értelemszerűen három mezőre bővül, ahol mindegyik paraméter egy-egy réteggel kapcsolatban közöl információt. Mindezekén túl még egy mező található az LPW produktumban, mely kapcsolatot teremt a teljes kihullható vízgőz mennyiség becslésével. Az 1. egyenlet alapján minden rácspontra megadja a TWP és az LPW három rétegének kapcsolatát, ahol a LPW_BL, LPW_ML és LPW_HL rendre a határréteg, a középső réteg és a magas réteg vízgőztartalmát jelentik.

$$Quality = \left| \frac{TPW - (LPW_BL + LPW_ML + LPW_HL)}{LPW_BL + LPW_ML + LPW_HL} \right| \cdot 100 \quad (1)$$

A minőség jelző szám (*Quality*) szintén négy értéket vehet fel. 0, ha jó (0-20%), 1, ha közepes (20-40%) és 2, ha alacsony a minőség (> 40%), azaz ha a három réteg összege és a teljes kihullható vízgőztartalom túlzottan eltér egymástól. A 3 érték minden egyéb hiba esetére van fenntartva (pl. ha nem létezik a fájl) (EUMETSAT, 2010e).

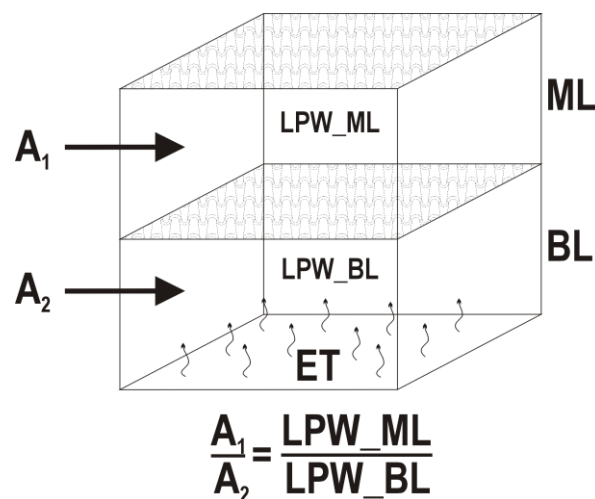
A fizikai módszereket alkalmazó produktum a vízgőztartalmak mellett néhány meteorológiai index származtatását is tartalmazza, melyekkel jelen dolgozatban nem foglalkozunk. Az SPhR (PGE13) vízgőztartalmak paraméterire ugyanazok vonatkoznak, mint a fent említett 4 esetben (TPW, BL, ML, HL) (EUMETSAT, 2010f).

3.6. Az evapotranszpiráció becslésére alkalmazott módszerek

A származtatott vízgőzmezők vizsgálata mellett más, vízgőzforgalommal kapcsolatos paraméterek becslésére is sor kerülhet. A geostacionárius műholdak egyik előnye, hogy mérési adataik alapján könnyen vizsgálható a származtatott produktumok napi menete. A felszín közeli légréteg vízgőztartalmára jellemző napi menetek ismeretében lehetőségünk nyílik a talaj-növény rendszer evapotranszpirációjának becslésére. Célunk megvizsgálni azt a kérdést, hogy becsülhető-e műholdas technikával kellő pontossággal a felszín függőleges irányú vízgőzárama (látens hőáram). Ennek jelentősége – a légköri vízgőztartalom származtatásához hasonlóan – abban rejlik, hogy egy nehezen mérhető, igen változékony paraméterre vonatkozóan nagy időbeli és térbeli

felbontással adhatunk becslést. Nagyobb területek evapotranszpirációjának ismerete elengedhetetlen a hidrológiai ciklus valamint a felszíni energiaáramok alaposabb tanulmányozásához, illetve a felszín közeli energiamérleg számszerűsítéséhez (Jung et al., 2010).

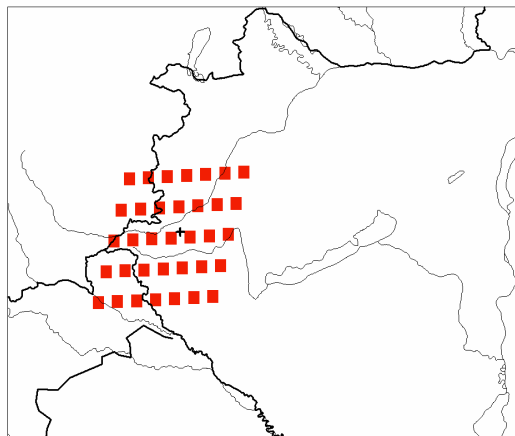
Egy adott terület felett írjuk le a légköri folyamatokat egy egyszerű box-modell segítségével (4. ábra). A box-modell két rétege közötti határoló felületről tegyük fel, hogy nem átjárható (ez valójában a határréteg (BL) teteje, tehát a feltételezés bizonyos fokig megalapozott). A felszín közeli rétegben a vízgőztartalom változásában alapvetően két hatás játszhat szerepet. Egyrészt az evapotranszpiráció (ET), másrészt a nedvesség adott területre történő áramlása, azaz a nedvesség advekciónak (A_2). Feltételezésünk szerint a határréteg tetején elhelyezkedő inverzió záróréteggént viselkedik, ezért a magasabb légrétegek vízgőztartalmának változása modellünkben kizárólag az advekciónak köszönhető (A_1). Továbbá feltételezzük, hogy az advekciónak hatására a két rétegben egyszerre lép fel változás a kihullható vízgőztartalomban, és a változás mértéke arányos a rétegekben már jelen lévő vízgőztartalom arányával (ezt a hipotetikus kapcsolatot írja le a 4. ábra alatt található képlet). Így ha a felszín közeli vízgőztartalom változásáról eltávolítjuk a középső légrétegből meghatározott nedvesség advekciónak hatását, feltételezésünk szerint pontosabb becslést kaphatunk az evapotranszpirációra. Tovább csökkenthetjük az advekciónak hatását, ha eleve olyan napokat választottunk ki, melyek alatt anticiklonális időjárási helyzet uralkodott a vizsgált területen.



4. ábra: A felhasznált egyszerű box-modell sematikus felépítése. Feltételezésünk szerint a középső (ML) és a felszín közeli (BL) réteg vízgőztartalma (LPW_BL, LPW_ML) kizárólag az advekciónak (A_1 , A_2) és az evapotranszpiráció (ET) hatására változhat meg.

Annak érdekében, hogy a becült értékeket összevethessük mérési eredményekkel (azaz validáljuk a modellt), a célterületet a Vas megyében található Hegyhátsál környezetében jelöltük ki, ahol egy 117 m magas felműszerezett TV adótorony segítségével 1994 óta végeznek üvegházhatású gázokkal és egyéb meteorológiai paraméterekkel kapcsolatos méréseket (Haszpra et al., 2005). Itt az ET mérése egy ún. „eddy kovariancia” (EK) mérés technikával történik (Baldocchi et al., 2003). Az EK egy korszerű, széles körben alkalmazott mikrometeorológiai mérési technika, amely a függőleges szélesség és egy adott skalár mennyiség (esetünkben a vízgőztartalom) nagy pontosságú, igen finom időbeli felbontású mérésén alapul. Mivel a fenti mennyiségeket másodpercenként 4-20-szor kell megmérni, ezért fontos, hogy rövid válaszidejű műszerekkel dolgozzunk, különben hiába mérünk gyakrabban, a műszer tehetetlensége miatt nem tudjuk mérni a rövid idő alatt fellépő változásokat. Az EK módszer során a mért mennyiségek kovarianciájának kiszámítása után, számos korrekció alkalmazásával kapunk képet a felszín evapotranszpirációjáról. Fontos megjegyezni, hogy a tapasztalatok szerint az EK módszer megközelítőleg 10-30 %-kal alulbecsli az ET valós áramát (Franssen et al., 2010).

A vizsgálatunk során először megkerestük a legközelebb eső rácspontot a SAF által származtatott vízgőztartalom mezőben, és kijelöltünk körülötte egy 7×5-es téglalapot, amely kb. egy 63×45 km-es területet reprezentál (5. ábra).



5. ábra : A hegyhátsáli mérőállomás (kereszttel jelölve) valamint a műhold adatokból származtatott vízgőzmező azon 35 rácspontjának földrajzi elhelyezkedése, melyeket figyelembe vettük az evapotranszspiráció becslése során

Ezek után átlagoltuk a 35 rácspontra vonatkozó vízgőztartalom értékek napi meneteit a felszín közeli és a középső rétegben azokban az időlépcsőkben, ahol a rácsponti értékek legalább fele felhőmentes volt. A két idősor között meghatároztuk a korrelációs együttható négyzetét, továbbá a negyedórás értékekből órás átlagokat képeztünk abban az esetben, ha egy órában legfeljebb csak két időpont volt borult. Így kaptunk egy napi menetet a vízgőztartalom órás változásaira a vizsgált két rétegben, amely egyelőre még mind a felszíni hozzájárulás, mind a nedvesség advekciónak hatását hordozza.

Ezt követően kétféle módszer alapján becsültük az evapotranszpiráció mértékét. Az első, legegyszerűbb feltételezés alapján elhanyagoltuk az advekciót, azaz a felszín közeli légréteg vízgőztartalom változásaiban csak az ET hatását vettük figyelembe. Így a vízgőztartalom órás átlagainak különbségét véve – a (2) képletnek megfelelően, ahol az LPW_BL az adott óra átlagos vízgőztartalmát jelenti a felszín közeli légrétegben – a felszíni hozzájárulást, tehát az órás evapotranszpirációt kaptuk:

$$ET = \frac{\partial}{\partial t} LPW_BL \quad (2)$$

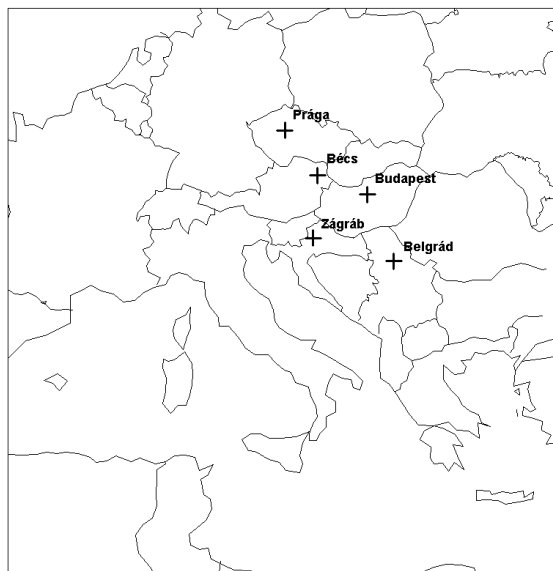
A másik módszer során eltávolítottuk a felszín közeli légréteg vízgőztartalom adatsoráról a középső réteg trendjét, ami a hipotézisünk alapján az advekciónak hatását írja le. Ezt az eljárást a (3) képlet alapján végeztük el, ahol az LPW_BL és LPW_ML értékek az előbbieknél megfelelően az adott órára vonatkozó átlagos vízgőztartalmat, míg a felülvonással jelölt mennyiségek a napi átlagos értéket jelentik. A különbség képzése után egy trendmentesített adatsort kapunk, ahol az órás változásokat tekintve megkapjuk a származtatott ET értékeket. Ez, a továbbiakban ET* nevezett mennyiség feltételezhetően realisabb becslést ad a felszíni hozzájárulásra:

$$ET^* = \frac{\partial}{\partial t} \left(LPW_BL - \frac{LPW_ML}{LPW_ML} \cdot LPW_BL \right) \quad (3)$$

Az evapotranszpiráció becslésére kapott eredményeinket a fent leírt kétféle származtatási módszer vonatkozásában a 4.4. alfejezetben mutatjuk be.

3.7. Rádiószonda adatok

Mivel az eddigiekben leírt produktumok származtatott értékeket szolgáltatnak, ezért elsődleges feladatunk a légrétegekre becsült vízgőztartalom összevetése valamilyen rendelkezésre álló mérési adattal. Munkánk során rádiószondás felszállások adatait hasonlítjuk össze a származtatott paraméterek értékeivel. Az amerikai wyomingi egyetem honlapján számos európai rádiószondás felszállás mérési adata is elérhető publikusan (Kern et al., 2008; UWYO weboldal, 2010). Öt európai városra vonatkozóan töltöttük le a 00 és 12 UTC-kor indított rádiószondás felszállás adatait a 2009-es év viszonylag felhőmentesnek ítélt napjaira (6. ábra). A városokat úgy választottuk ki, hogy illeszkedjenek az NWV SAF 2010 szoftverben az általunk definiált kivágat méretéhez. A Budapestre, Bécsre, Prágára, Zágrábra és Belgrádra letöltött profilok már tartalmazzák a vízgőz keverési arányát, mint származtatott mennyiséget. Az adatok egységesítése érdekében munkánk során a rádiószondák által közvetlenül mért relatív nedvesség és hőmérséklet adatok felhasználásával újrászámoltuk minden mérési szintre a vízgőz keverési arány mennyiségét. Ezek után 50 méterenként lineárisan interpoláltuk a vízgőz keverési arányt és más meteorológiai elemeket a markáns pontok közt, majd képeztük egyrészt a teljes légréteg kihullható vízgőztartalmát, másrészt az NWC SAF által meghatározott nyomási szintek közötti rétegek vízgőztartalmát. Így egy olyan adatsort kaptunk, melyet már könnyedén összehasonlíthatunk a szoftver által előállított produktumokkal, ha azok közül a megfelelő időpontot és a megfelelő város körüli területet tekintjük.



6. ábra: A validációhoz felhasznált rádiószondás mérések földrajzi elhelyezkedése.

4. Eredmények

Ebben a fejezetben rátérünk az eredmények bemutatására, néhány kiemelt példán keresztül. Először az általunk vizsgált SAF produktumok minőségét vizsgáljuk a rádiószonda adatokkal történő összevetéssel (validáció), majd a produktumok jellegzetességeit tekintjük át, elemezzük a vízgőztartalom napi menetit az egyes légrétegekben, végül kísérletet teszünk a felszíni evapotranszpiráció becslésére kizárólag műholdas adatok segítségével. A vizsgálatokat a 2009-es év olyan napjaira végeztük el, amelyek a Kárpát-medence környezetében közel felhőmentesek voltak. A 3. táblázatban látható 37 időpontra elemeztük a PGE01-et, PGE06-ot, PGE07-et és a PGE13-at, azaz a vízgőztartalommal kapcsolatos, illetve azok származtatásához szükséges produktumokat. A közel felhőmentes napokat vizuálisan, statikus műholdképek, illetve műholdképekből összeállított animációk alapján választottuk ki.

3. táblázat: A vizsgálatban szereplő napok, melyek közel felhőmentesnek tekinthetők Magyarország környezetében.

| | Dátumok | | Dátumok |
|----|------------|----|------------|
| 1 | 2009.01.11 | 20 | 2009.06.29 |
| 2 | 2009.01.12 | 21 | 2009.06.30 |
| 3 | 2009.04.03 | 22 | 2009.07.05 |
| 4 | 2009.04.04 | 23 | 2009.07.06 |
| 5 | 2009.04.11 | 24 | 2009.07.09 |
| 6 | 2009.04.12 | 25 | 2009.07.10 |
| 7 | 2009.04.13 | 26 | 2009.07.14 |
| 8 | 2009.04.16 | 27 | 2009.07.15 |
| 9 | 2009.04.25 | 28 | 2009.07.17 |
| 10 | 2009.04.29 | 29 | 2009.07.20 |
| 11 | 2009.05.17 | 30 | 2009.07.22 |
| 12 | 2009.05.18 | 31 | 2009.07.23 |
| 13 | 2009.05.25 | 32 | 2009.07.24 |
| 14 | 2009.05.26 | 33 | 2009.07.26 |
| 15 | 2009.06.09 | 34 | 2009.07.27 |
| 16 | 2009.06.14 | 35 | 2009.07.28 |
| 17 | 2009.06.15 | 36 | 2009.07.30 |
| 18 | 2009.06.18 | 37 | 2009.09.22 |
| 19 | 2009.06.19 | | |

Az általunk beállított kivágat középpontja az é. sz. 43°, k. h. 13° földrajzi koordinátákkal megadott pont. A célterület a középpont körül elhelyezkedő 600×400 rácspontból álló terület, ahol az egyek képpontok felbontása megközelítőleg 3×3 km.

A kihullható vízgőztartalommal kapcsolatos elemzéseinkhez területi átlagokat képeztünk 5×5 pixeles egységekből. Ily módon térben simított mezőket állítottunk elő, mely már nem 600×400, hanem 120×80 rácspontból áll. A területi átlagok számításához figyelembe vettük a felhőzet jelenlétét is. A simítás elődleges célja a mérési zaj csökkentése volt, ami tapasztalataink szerint elsősorban a PGE06 és a PGE07 esetén okoz problémát. Ez a simítási eljárás bevett módszernek számít az NWC SAF kereti között, és a szoftver is támogatja az alkalmazását.

4.1. Validáció

A validáció során 5 meteorológiai állomás (4. ábra) rádiószondás mérési adatait hasonlítottuk össze a produktumok által becsült vízgőzmennyiségekkel a 3.6. alfejezetben leírtak szerint. Statisztikai mérőszámokkal vizsgáltuk a két adatsor kapcsolatát (Kern et al., 2008), valamint pontdiagramon ábrázoltuk az egyes rétegekre vonatkozó rádiószonda méréseket és a becsült produktumokat.

Habár a rádiószondák felbocsátása pontszerű, a légkörben való emelkedésük során általában fellép kisebb–nagyobb mértékű (magassági szelektól függő) sodródás. Ezért a produktumok által becsült, valamint már simított mezőkben kiválasztottuk a rádiószondás felszállás földrajzi koordinátáihoz legközelebb eső pixelt, és e körül egy 5×5-ös környezet átlagos vízgőztartalmát adtuk meg, és ezt hasonlítottuk össze a rádiószonda méréseiből kapott értékekkel.

Mielőtt az összehasonlítást elvégezzük fontos megemlíteni, hogy a rádiószondás mérések sem tekinthetők hibamentesnek, vagyis a közvetlenül mért illetve műholdas mérésekből származtatott adatok összehasonlítása során nem tekinthető abszolút referenciának a rádiószondás adat. A rádiószonda mérések pontosságával kapcsolatban számos tudományos vizsgálat született. Ezek alapján viszonylag közismert, hogy a magasabb légrétegekben történő nappali mérések során több rádiószonda típus esetén (pl. az Országos Meteorológiai Szolgálatnál is használt Vaisala RS92 esetén is) fellép egy ún. szárazodási folyamat. Ez azt jelenti, hogy a rádiószonda magasabb légrétegekben kevesebb vízgőztartalmat (pontosabban kisebb relatív nedvességet) mér,

mint amennyi a valóságban jelen lehet. Mindez a fokozott elektromágneses sugárzásnak köszönhető, aminek a szonda nappal ki van téve nagy magasságban (Vömel et al., 2007). A numerikus időjárás előrejelző modellek esetén korrekciókat végeznek e hatás kiküszöbölése érdekében (Miloshevich et al., 2009). A nyers rádiószondás adatok közzététele során azonban általában nem alkalmaznak korrekciókat, mivel nincs egységes módszer az adatok korrigálására. A fentiek figyelembe vételével elvégezhetjük a validációt, de a déli adatok értelmezésekor szem előtt kell tartanunk, hogy a szakirodalom alapján a rádiószonda alapú teljes kihullható vízgőztartalom akár 6-11%-kal is kevesebb lehet, mint a valóságban (Kern et al., 2008). Az alulbecslés mértéke függ attól, hogy melyik földrajzi szélességen, az év mely szakában végezzük a vizsgálatokat. A 11%-os átlagos alulbecslést a trópusi övezetben, nyári időszakban mérték (Vömel et al., 2007), míg az Amerikai Egyesült Államok belső területein összel átlagosan 6-8%-os alulbecslést mutattak ki (Miloshevich et al., 2006).

A validációhoz a 00 és a 12 UTC időpontokban végzett rádiószondás felszállások méréseit használjuk fel, így lehetőség nyílik arra, hogy megfigyeljük ezt a jelenséget. A 4. táblázatban mutatjuk be a statisztikai vizsgálatok eredményeit a teljes légszlop, valamint a vizsgált három légréteg vízgőztartalmára vonatkozóan. Az első oszlopban mindig a statisztikai módszert alkalmazó (PGE06, PGE07), míg a második oszlopban a fizikai módszeren alapuló becslésekkel történő összevetés látható. Mind az öt vizsgált város esetén leolvasható a BIAS, azaz a szisztematikus hiba, ami a két adatsor átlagának különbsége; az RMSE, azaz az átlagos négyzetes hiba négyzetgyöke; valamint a R^2 , azaz a lineáris korrelációs együttható négyzete. A BIAS esetén a produktum adatsorainak átlagaiból vontuk le a rádiószonda mérési adatsorainak átlagait, tehát ha a szisztematikus hiba pozitív, akkor a produktum felülbecsli a rádiószonda mérését. Láthatjuk, hogy a BIAS nagysága és előjele az egyes városokban eltérő a két módszer esetén, de összességében megállapítható, hogy a PGE13 legnagyobb mértékben a középső réteg vízgőztartalmát becsli felül, míg a határrétegben csak kis mértékben becsli alul. Az RMSE-t tekintve egységes képet láthatunk. A teljes kihullható vízgőztartalom becslése esetén a fizikai módszert alkalmazó produktum hibája minden városban csak töredéke a statisztikai módszert használó produktum hibájához képest. A középső és a legalsó réteg esetén is mindig kisebb az RMSE, a statisztikai módszerhez képest, csak a magas rétegben nagyobb. A magas rétegek mérőszámainak megítélésakor figyelembe kell venni, hogy a magasban már nagyon kevés a levegő vízgőztartalma, így a relatív hibák viszonylag nagyoknak adódnak. Az adatsorok korrelációja szintén azt

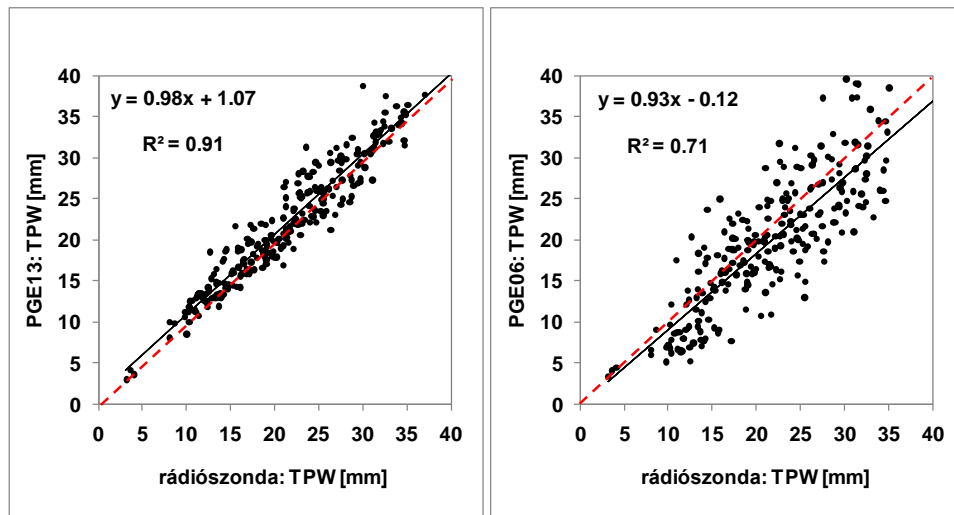
mutatja, hogy a fizikai módszer sokkal pontosabban reprodukálja a rádiószonda méréseit, mint a statisztikai módszer. Láthatjuk, hogy ha minden rendelkezésre álló adatot összevetünk a teljes vízgőztartalomra vonatkozóan, a PGE13 és a rádiószonda korrelációjának négyzete 0,91, ami a PGE07 esetén csak 0,71.

4. táblázat: A rádiószonda alapú mérési és a produktumok származtatott adatsorai között fennálló kapcsolat statisztikai mérőszámai a vizsgált 5 város esetén.

| | TPW | | LPW_BL | | LPW_ML | | LPW_HL | |
|----------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|-------|
| | PGE06 | PGE13 | PGE07 | PGE13 | PGE07 | PGE13 | PGE07 | PGE13 |
| Bécs | | | | | | | | |
| BIAS | -2.731 | 0.148 | -1.303 | -0.747 | -1.377 | 0.453 | -0.042 | 0.435 |
| RMSE | 4.437 | 2.113 | 2.609 | 1.759 | 2.399 | 1.982 | 0.129 | 0.602 |
| R² | 0.820 | 0.930 | 0.730 | 0.870 | 0.770 | 0.880 | 0.800 | 0.840 |
| Belgrád | | | | | | | | |
| BIAS | 0.769 | 3.034 | 0.466 | 0.725 | 0.129 | 1.705 | 0.110 | 0.584 |
| RMSE | 4.693 | 3.061 | 2.227 | 1.161 | 2.862 | 2.138 | 0.148 | 0.617 |
| R² | 0.570 | 0.870 | 0.530 | 0.840 | 0.530 | 0.810 | 0.690 | 0.700 |
| Budapest | | | | | | | | |
| BIAS | -1.237 | 0.671 | -1.027 | -0.887 | -0.277 | 1.108 | -0.034 | 0.453 |
| RMSE | 4.703 | 2.200 | 2.597 | 1.918 | 2.515 | 1.826 | 0.137 | 0.619 |
| R² | 0.720 | 0.910 | 0.670 | 0.860 | 0.670 | 0.890 | 0.720 | 0.720 |
| Prága | | | | | | | | |
| BIAS | -4.207 | -0.607 | -1.858 | -0.871 | -2.465 | -0.120 | -0.075 | 0.397 |
| RMSE | 5.070 | 1.838 | 2.702 | 1.056 | 3.013 | 1.697 | 0.206 | 0.644 |
| R² | 0.740 | 0.960 | 0.560 | 0.930 | 0.710 | 0.920 | 0.590 | 0.630 |
| Zágráb | | | | | | | | |
| BIAS | -1.537 | -0.059 | -1.351 | -1.290 | -0.750 | 0.654 | 0.113 | 0.551 |
| RMSE | 4.721 | 1.854 | 3.232 | 2.446 | 2.450 | 1.887 | 0.159 | 0.616 |
| R² | 0.670 | 0.920 | 0.530 | 0.780 | 0.620 | 0.830 | 0.820 | 0.840 |
| Összesített | | | | | | | | |
| BIAS | -1.652 | 0.712 | -0.910 | -0.542 | -0.910 | 0.762 | 0.014 | 0.484 |
| RMSE | 4.718 | 2.301 | 2.671 | 1.744 | 2.653 | 1.922 | 0.156 | 0.619 |
| R² | 0.710 | 0.910 | 0.610 | 0.820 | 0.660 | 0.870 | 0.670 | 0.710 |

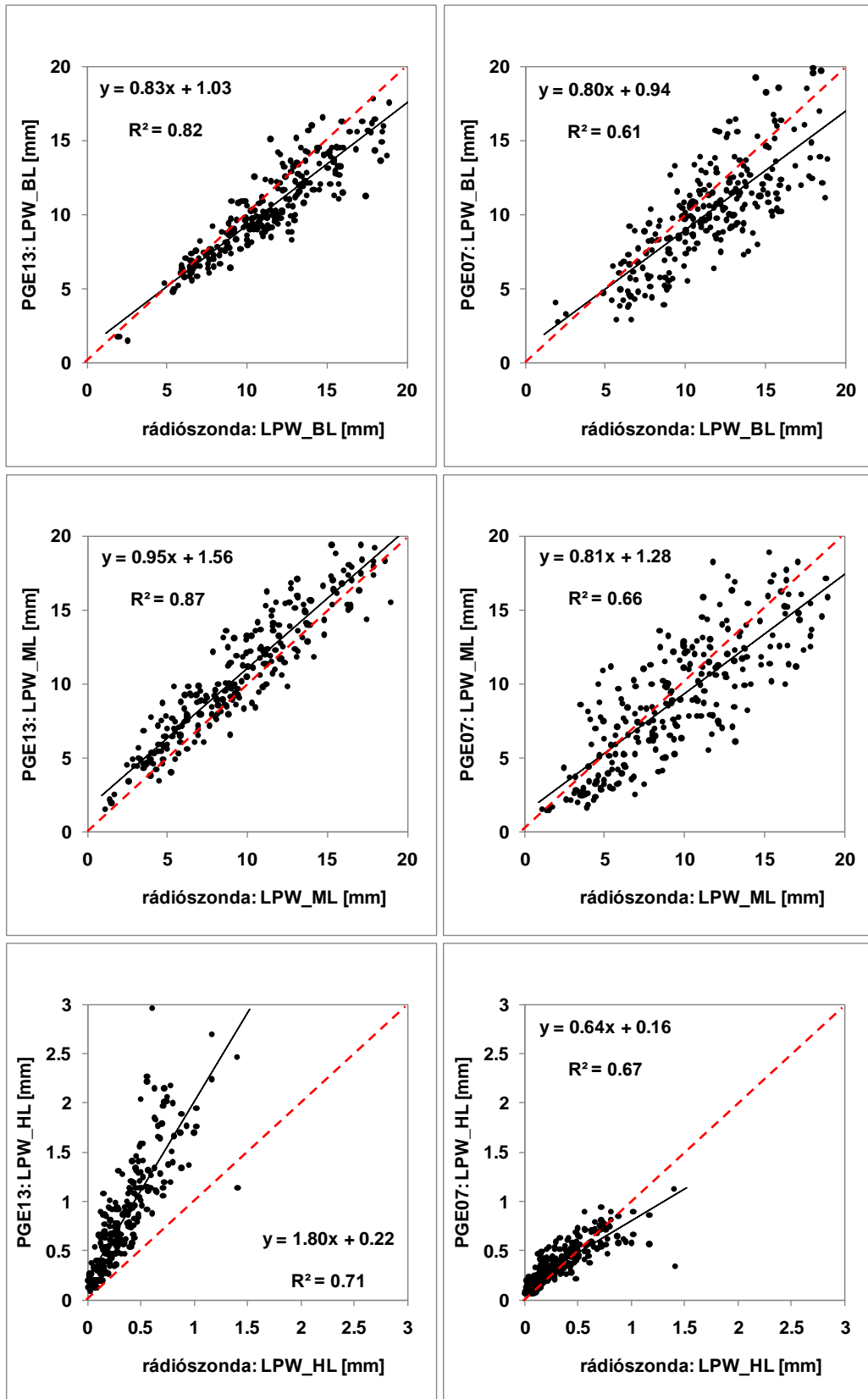
Az 7. ábrán a teljes légköri vízgőztartalomra (TPW) vonatkozó pontdiagramokat láthatunk a két módszerre külön-külön. Piros szaggatott vonallal jelöltük az 1 meredekségű egyenest, mely az ábrázolt két adatsor tökéletes illeszkedését reprezentálná. A fekete vonal az adatokra illesztett lineáris trendvonal, melynek

egyenletét szintét feltüntettük (az R^2 ez esetben is a lineáris korrelációs együttható négyzetét jelenti). Szembetűnő, hogy a PGE13 (bal oldali diagram) jobban illeszkedik a rádiószondás mérésekhez, mint a PGE06 (jobb oldali diagram). A trend meredeksége a PGE13 esetén közelebb áll az 1 értékhez, mint a PGE06 esetén. A korrelációs együtthatók összhangban vannak a pontok szóródásával.



7. ábra: Teljes légköri vízgőztartalom a rádiószonda mérése és a produktumok becslése alapján a vizsgált 37 nap és 5 állomás esetén. Bal oldalon a fizikai módszeren alapuló (PGE13), jobb oldalon a statisztikai módszert alkalmazó (PGE06) produktum látható.

Ezek után vizsgáljuk meg, hogy az eltérés, ami a teljes vízgőztartalom esetén jelentkezik, hogyan oszlik meg az egyes légrétegek között. A 8. ábrán légrétegenként szétbontva szerepel a produktumok rádiószonda mérésekkel való összehasonlítását. Elsőként a határréteg (BL: 1013-840 hPa), alatta a középső réteg (ML: 840-437 hPa) végül a magas réteg (HL: 437 hPa felett) látható. A diagramok alapján végigkövethetjük, hogy a felszíntől távolodva hogyan csökken a vízgőz mennyisége a légkörben – mindez az ábrákon úgy jelenik meg, hogy egyre közelebb húzódik a pontfelhő az origóhoz. A legmagasabb rétegben (HL) szinte elenyésző a vízgőztartalom (a HL-t bemutató ábrák skálája 0-3 mm-ig terjed, míg a másik két réteg esetén 0-20 mm-ig). A PGE13 által becsült adatsorok mind a két alsó réteg esetén pontosabban illeszkednek a rádiószondás mérésekhez, mint a statisztikai módszert alkalmazó produktumok eredményei. A korreláció négyzete a BL-ben 0,82, az ML-ben 0,87 a PGE13 esetén, míg a PGE07 esetén rendre 0,61 és 0,66. A magas rétegben is nagyobb a PGE13 korrelációja a mérési adatokkal, de szembetűnő, hogy szisztematikusan felülbecsli a rádiószonda által mért vízgőztartalmakat. Azonban vegyük figyelembe, hogy az abszolút eltérések a magas rétegben kb. 0,5 mm nagyságrendűek.

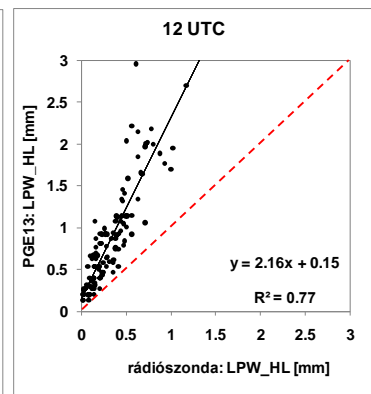
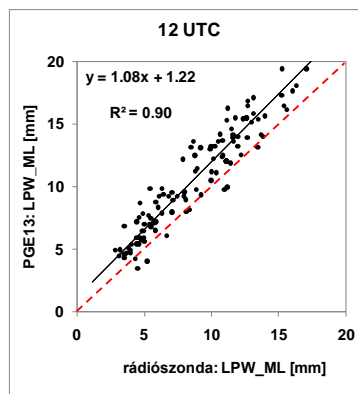
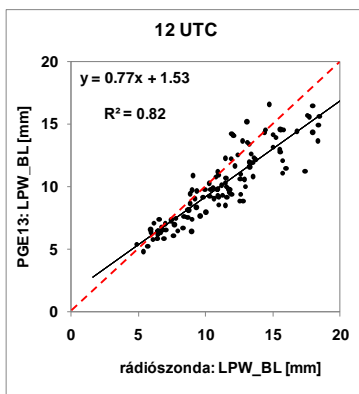
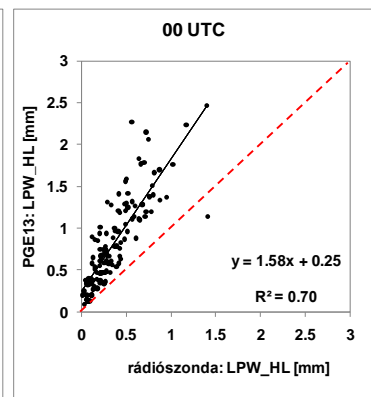
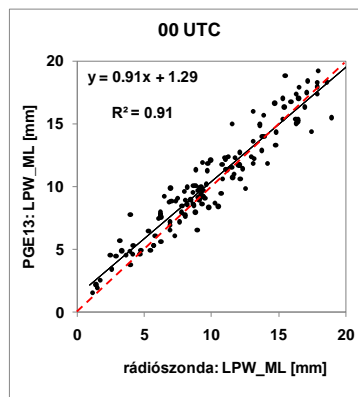
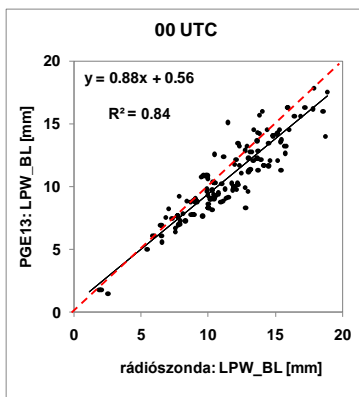
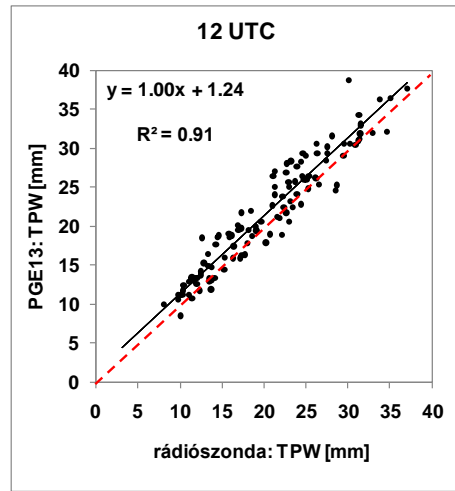
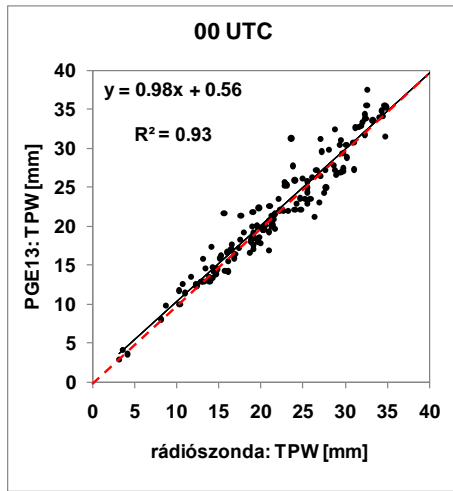


8. ábra: Légtörzi vízgőztartalom a rádiószonda mérése és a produktumok becslése alapján a három rétegben (BL, ML, HL) a vizsgált 37 nap és 5 állomás esetén. Bal oldalon a fizikai módszeren alapuló (PGE13), jobb oldalon a statisztikai módszert alkalmazó (PGE07) produktum látható.

A 9. ábra külön az éjféli és külön a déli időpontokra vonatkozóan mutatja be a PGE13 valamint a rádiószonda kapcsolatát. Megfigyelhetjük, hogy a TPW esetén délben a rádiószonda által mért vízgőztartalmak kisebbek, mint a PGE13 becslései, miközben éjfélkor szinte teljesen illeszkednek egymáshoz. Ha a többi réteget esetén is összehasonlítjuk a két időpontot, akkor a középső és magas rétegben is megfigyelhető ez az eltolódás. Az ML-ben a trendvonal feljebb tolódása, a HL-ben a trendvonal dőlési szögének megnövekedése jelzi azt, hogy délben a rádiószonda szisztematikusan kevesebb vízgőztartalmat mér.

Mindez összhangban van az elvárásainkkal, vagyis a nappali rádiószonda mérések nagy magasságokban fellépő szárazodásával kapcsolatos korábbi vizsgálatok eredményeivel. Fontos kiemelni, hogy a vizsgálataink alapján nem vonható le következtetés a rádiószonda mérési hibáival kapcsolatban, hiszen ehhez további független (*in situ*) mérési adatsorra lenne szükség. Csupán az állítható, hogy a fizikai elven alapuló származtatási módszer megfelel a rádiószonda mérési pontosságáról ismert korábbi kutatási eredményeknek, és ez alapján feltételezhetjük, hogy a PGE13 éjjel és nappal is egyaránt szisztematikus hibától mentesen becsli a kihullható vízgőztartalmat.

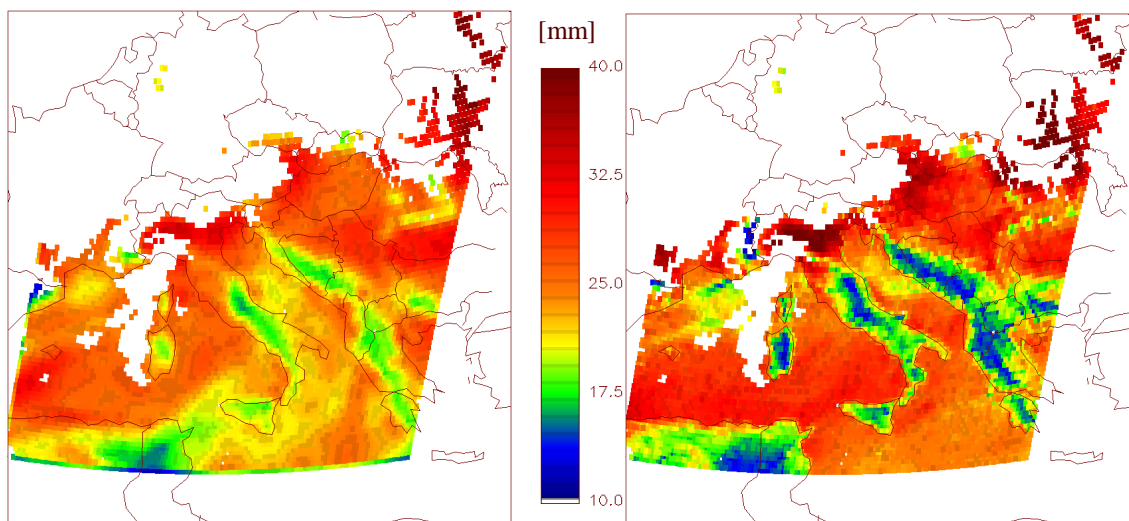
A fentieket összefoglalva megállapíthatjuk, hogy a PGE13 lényegesen pontosabban becsli a különböző légrétegek kihullható vízgőztartalmát, mint az NWC SAF programcsomagban korábban bevezetett, statisztikai alapú produktumok (PGE06 és PGE07). Az éjféli illetve a déli adatok összevetése alapján valószínűsíthető, hogy a PGE13 relatíve torzításmentesen írja le mind az éjszakai, mind a nappali adatokat. Amennyiben a kihullható vízgőz adatokat numerikus időjárás előrejelző modellbe szeretnénk asszimilálni, a PGE 13 mindenképp előnyt kell, hogy élvezzen a korábbi produktumokkal szemben. Ugyanez igaz a kihullható vízgőz napi menetének jellemzésére is, amire az alábbiakban kerül sor.



9. ábra: Légköri vízgőztartalom a rádiószonda mérése és a PGE13 becslése alapján a három rétegben (BL, ML, HL) valamint a teljes légoszlopban külön a déli és a külön az éjjeli időpontokra vonatkozóan.

4.2. Térbeli eloszlások

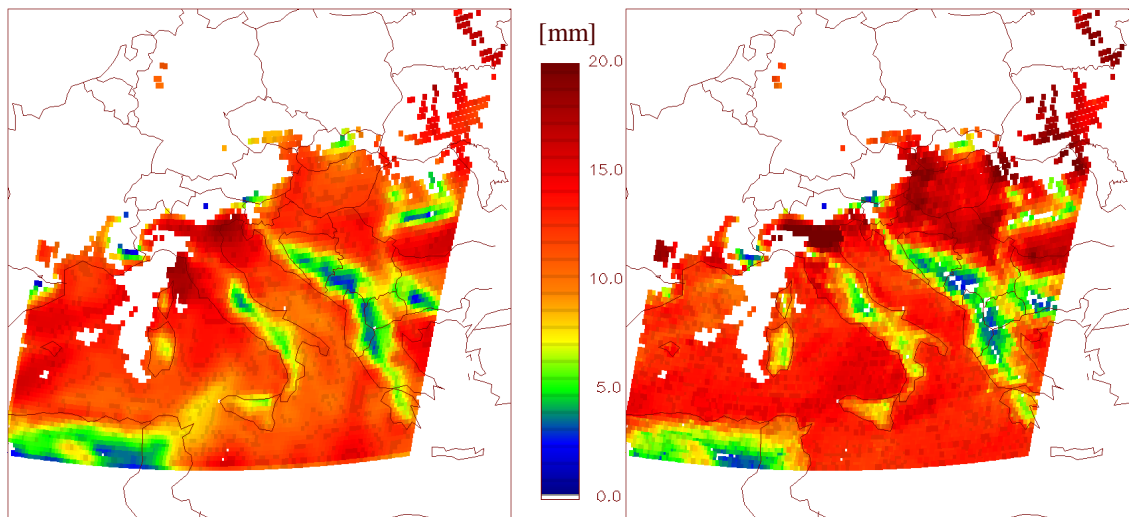
Az alábbiakban a kihullható vízgőz térbeli szerkezetét bemutató mezőket mutatunk be 2009. július 24.-ére vonatkozóan. Ez a nap jól tükrözi a produktumok tipikus térbeli viselkedését, valamint nagy területen felhőmentes időjárási helyzet volt jellemző. Az adott napra vonatkozó 96 térképből (negyedóraként egy) a déli időpontot választottuk ki. A 10-13. ábrákon páronként szerepel a teljes légköri vízgőztartalom, valamint a három réteg vízgőztartalmának becslése a két különböző módszer szerint a térképek között található skálának megfelelően. Bal oldalt a fizikai módszer alapján, jobb oldalt a statisztikai módszer alapján származtatott mezők láthatóak.



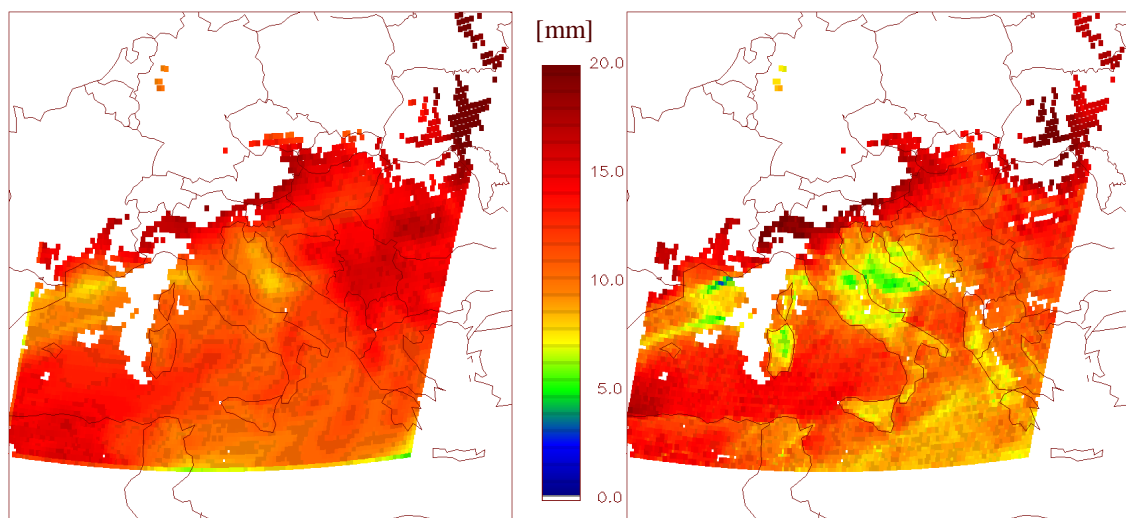
10. ábra: Függőleges légoszlop teljes vízgőztartalmának becslése fizikai (balra) és statisztikai (jobbra) módszer alkalmazásával. 2009.07.24. 12 UTC.

Észrevehető, hogy a statisztikai módszer alapján becsült légköri víztartalom eloszlása nagyon szorosan követi a szárazföldek elhelyezkedését. Ez a teljes légoszlop vízgőztartalmát ábrázoló térképen a legszembetűnőbb (10. ábra), de nem csak a határrétegben, hanem a középső rétegben is megfigyelhetjük (11-13. ábrák), ahol a felszín közvetlen hatása már nem érvényesülhet (hiszen a légréteg a határréteg fölött helyezkedik el). A fizikai módszer alapján becsült vízgőztartalom is nyilvánvalóan követi valamennyire a szárazföldek körvonalait (elsősorban a topográfia miatt), de közel sem olyan szorosan, mint a statisztikai becslés. Ez is alátámasztja azt a megállapítást, hogy a PGE13 realisabb értékeket becsül, hiszen a valóságban a légköri vízgőztartalom nem követheti ennyire pontosan a partvonalakat, többek között helyi cirkulációs okok miatt.

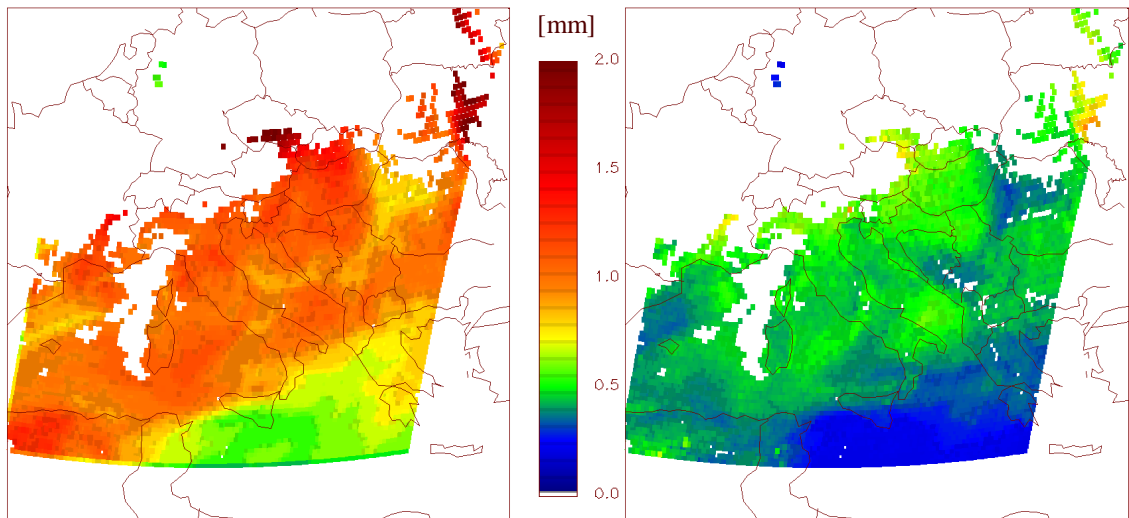
Azt is megfigyelhetjük, hogy a statisztikai becslésen alapuló adatok szélsőségesebb értékeket vesznek fel, mint a fizikai módszeren alapuló becslések. Szárazabb és nedvesebb területeket egyaránt láthatunk a jobb oldali térképeken a bal oldalon lévő, fizikai módszert alkalmazó mezőkkel összevetve. Ha a 3 réteget együtt tekintjük az is megállapítható hogy a statisztikai módszer szerint felfelé haladva hamarabb kiszárad a légkör, azaz a teljes légoszlop vízgőztartalmának nagyobb hányadát becsli a határrétegbe, mint a PGE13. A középső és a magas rétegbe kevesebb vízgőztartalmat becsül, mint a fizikai módszer.



11. ábra: A határréteg (BL: 1013-840 hPa) teljes vízgőztartalmának becslése fizikai (balra) és statisztikai (jobbra) módszer alkalmazásával. 2009.07.24. 12 UTC.



12. ábra: A középső réteg (ML: 840-437 hPa) teljes vízgőztartalmának becslése fizikai (balra) és statisztikai (jobbra) módszer alkalmazásával. 2009.07.24. 12 UTC.



13. ábra: A magas réteg (HL: 437 hPa felett) teljes vízgőztartalmának becslése fizikai (balra) és statisztikai (jobbra) módszer alkalmazásával. 2009.07.24. 12 UTC.

4.3. Napi menetek

Ebben a fejezetben a vertikálisan integrált légköri vízgőztartalom napi meneteit mutatjuk be különböző légrétegekben valamint a teljes légoszlopra vonatkozóan. Az elemzés során összehasonlítjuk a fizikai és a statisztikai származtatási módszereken alapuló eredményeket.

A korábbi fejezetekben láthattuk, hogy a fizikai módszer (PGE13) több szempontból is realisabb értékeket becsül, mint a statisztikai módszer (PGE06 ill. PGE07). A kihullható vízgőztartalom térbeli változékonyságát tapasztalataink szerint a fizikai módszer becsli jobban. Rádiószondás felszállásokkal történő validáció alapján, pontbeli adatokkal való összevetés eredményeképpen is azt tapasztaltuk, hogy a fizikai módszer pontosabbnak tekinthető. A kihullható vízgőztartalom időbeli változásának vizsgálata egy újabb szempont alapján nyújthat támpontot az adatok értékeléséhez. A kihullható vízgőz mennyiségének időbeli alakulása az időjárás előrejelzése szempontjából is fontos, hiszen a korszerű adatasszimilációs eljárások révén segítheti az időjárás számszerű előrejelzését. Amennyiben az adatok pontatlanul írják le a vízgőzmező időbeli változását, ez ugyanúgy hibát okozhat az előrejelzésben, mint ha a térbeli változékonyság becslésében hibázunk.

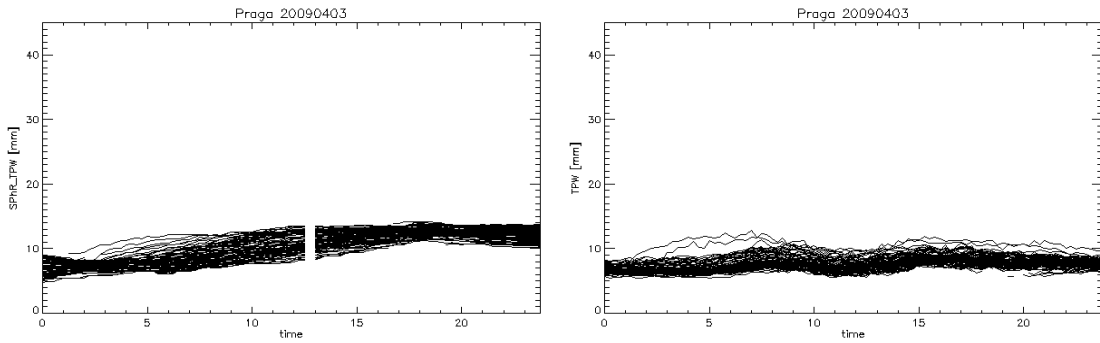
Derült terület felett a vertikálisan integrált vízgőztartalom adott pontban nem csupán az evapotranszspiráció, hanem a horizontális nedvesség advekciónak hatására is változhat. Emiatt olyan napokat keresünk a Kárpát-medence térségében közel derült napok közül, amikor az advekciónak hatása feltehetően nem volt túlzottan jelentős. A közel advekcióna mentes szituációkat szubjektív módon szűrtük ki. Olyan napokat kerestünk, ahol az egymás közelében elhelyezkedő pixelek napi menetei viszonylag kevés időpontban metszik egymást, azaz az egyes pixeleken a vízgőztartalom változása közel azonos. Ha sok metszéspont látható a napi menetekben az azt jelenti, hogy az egymás közelében elhelyezkedő pontokban a nedvességtartalom nagyrészt eltérő ütemben vagy mértékben változik, ami nedvesség advekcióna utalhat.

Az esettanulmányok közül hármat mutatunk be. A napi meneteket azon városok bővebb környezetéből ábrázoltuk, melyekre rendelkezésünkre álltak a rádiószondás felszállások adatai. Az átlagolt 120×80 pixelből álló mezőben megkerestük a városhoz legközelebbi pixelt, és annak 9×9 rácspotból álló környezetéből ábrázoltuk a vízgőz napi meneteit. Ez azt jelenti, hogy egy ábrán kb. 135×135 km-es területről származó napi meneteket láthatunk. A napi menetek szakadása általában a felhőzet megjelenését

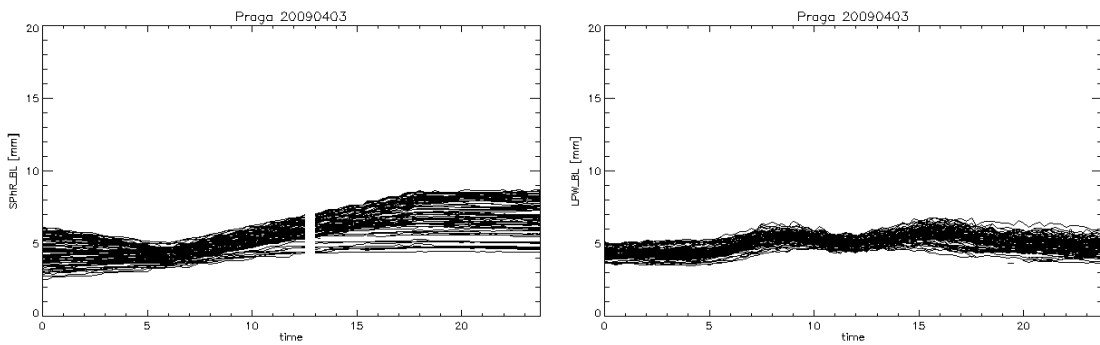
mutatja, kivéve a PGE13 esetén, ahol a nap folyamán néhány esetben az eredmény (HDF) fájl hibás volt, ami szintén szakadásként jelenik meg a napi menetekben, de ezek egyértelműen elkülöníthetőek a felhőzet okozta szakadásoktól (mivel ez esetben minden vonal ugyanott szakad).

A 14/a-d ábrákon 2009. április 3.-ára vonatkozóan Prága környezetére ábrázoltuk a napi meneteket. Baloldalon mindegyik esetben a fizikai módszer, jobb oldalon pedig a statisztikai módszer által becsült menetek szerepelnek. A 14./a ábra bal oldali diagramján látható, hogy a hajnali átlagosan 6-8 mm víztartalom napfelkelte után a nap folyamán 10-12 mm-re növekszik. Ha megvizsgáljuk az egyes rétegek vízgőztartalom meneteit (14./b-d ábrák, bal oldali képek) láthatjuk, hogy legalacsonyabb réteg (BL) vízgőztartalma rajzolja ki leginkább a nappali besugárzás időtartalmát. Mivel ez a réteg közvetlen kapcsolatban áll a felszínnel, azért a besugárzás hatására meginduló evapotranszspiráció, azaz a vízgőz légkörbe jutása itt mutatkozik meg legerősebben. Napfelkelte után a nap folyamán egyenletesen nő a vízgőztartalom egészen a naplementéig, miután közel állandóvá válik. A középső rétegben (ML) szintén nő a nap folyamán a vízgőztartalom (14./c ábra). Ennek egyik oka lehet a vízgőz felkeveredése a felszín közeli rétegből, de a határréteg tetején jelenlévő inverzió miatt valószínűsíthető, hogy inkább az advekciónak játszott szerepe. Általában a legmagasabb réteg (HL) vízgőztartalma nem változik jelentősen (14./d ábra), vagy ha mégis, akkor az az áramlási viszonyoknak köszönhető, hiszen az evapotranszspiráció hatása ilyen magasságban már elhanyagolható. Ha a statisztikai módszer napi meneteit tekintjük (jobb oldali képek), akkor láthatjuk, hogy a teljes kihullható víztartalomnak valamint a határréteg víztartalmának napi menetei nagyban eltérnek a fizikai módszeren alapuló napi menetektől. A nap közepén jelentkező vízgőztartalom csökkenés nem magyarázható fizikai folyamatokkal (pl. az evapotranszspiráció napi menetével). Ez az értelmezhetetlen csökkenés szinte minden esetben jelentkezik, mint ahogy az alábbiakban közölt napi menetek mindegyikében felfedezhető (14. ábra, jobb oldali képek).

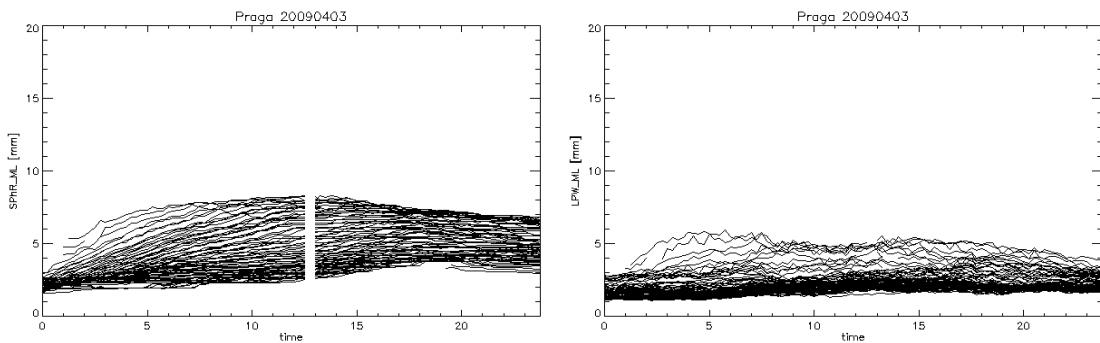
Megállapíthatjuk továbbá, hogy a statisztikai alapon becsült napi menetek sokkal zajosabbak, mint a fizikai módszer napi menetei. Fizikailag nem értelmezhető, hogy a vízgőztartalom 2-4 mm-t változzon negyedóránként. Némi zaj a PGE13 esetén is jelen van, de ennek mértéke jóval kisebb, és az elvárásoknak jobban megfelel.



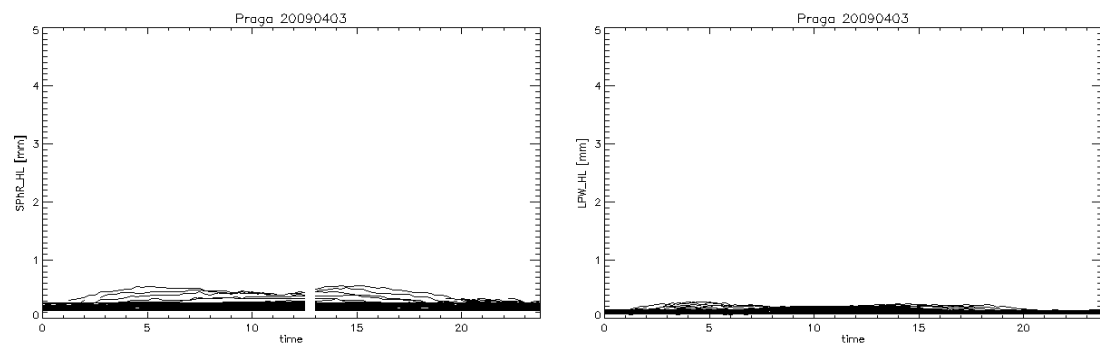
14./a ábra: A fizikai és a statisztikai módszerrel becsült TPW napi menete Prága környezetében 2009.04.03.-án. A vízszintes tengelyen az órák szerepelnek.



14./b ábra: A fizikai és a statisztikai módszerrel becsült LPW napi menete Prága környezetében 2009.04.03.-án a határrétegben (BL). A vízszintes tengelyen az órák szerepelnek.



14./c ábra: A fizikai és a statisztikai módszerrel becsült LPW napi menete Prága környezetében 2009.04.03.-án a középső rétegben (ML). A vízszintes tengelyen az órák szerepelnek.



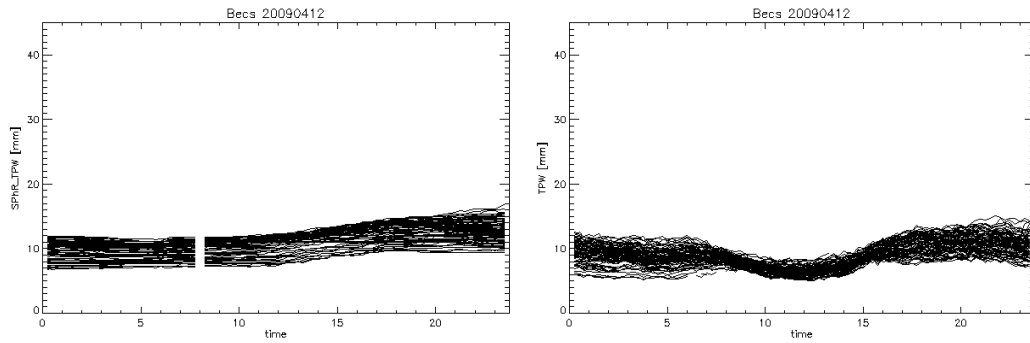
14./d ábra: A fizikai és a statisztikai módszerrel becsült LPW napi menete Prága környezetében 2009.04.03.-án a magas rétegben (HL). A vízszintes tengelyen az órák szerepelnek.

2009. április 12. esetén az előbbieken leírtakhoz hasonlóan mutatjuk be a vízgőztartalmat, ez esetben a Bécs (15./a-d ábrák) és Zágráb (16./a-d ábrák) körüli területeket kiemelve. Az ábrák tanulsága szerint a teljes kihullható vízgőz mennyisége mindkét városban növekszik a nap folyamán. Bécs esetén a vizsgált területen kevésbé volt homogén a légköri vízgőztartalom, azaz a napi meneteket jellemző görbék szórása nagyobb, de nagyjából párhuzamosak egymással, nem metszik egymást. Ez a jelenség az Alpok közelségével magyarázható, hiszen hegyvidéki területen a vizsgált légréteg vékonyabb, így kevesebb vízgőzt tartalmazhat. A határréteg vízgőztartalmának a menete is tükrözi az evapotranszspiráció hatását: szinte ugyanolyan mértékben növekszik minden rácspontban a vízgőztartalom a besugárzás hatására (14./b ábra). A közepes réteg vízgőztartalma is növekszik kissé a nap folyamán, de az éjszaka látható nagyobb értékek már valószínűleg nedvesség advekciónak hatására jönnek létre, mely az alsóbb légrétegekben nem jelentkezik (14./c ábra). A teljes kihullható vízgőztartalom menetén leginkább a határréteg vízgőztartalmában jelen lévő napi menet hatása látszik. A magasabb légrétegekben az evapotranszspiráció helyett az aktuális áramlás hatásai, mint például a nedvesség konvergencia jelentkezik, melynek nincs határozott napi menete. Zágráb környékén a felszín közeli rétegben kissé lecsökken a vízgőztartalom a déli órákban, de a középső rétegben egész nap lassan növekszik. Estére már megjelenik némi felhőzet is a vizsgált területen, ugyanis néhány görbe megszakad (16. ábrák).

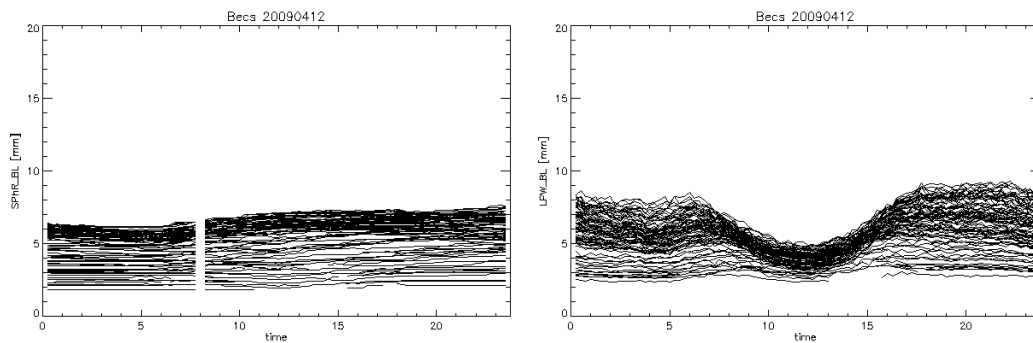
Ha a jobb oldali képeket tekintjük, e két esetben is láthatjuk, hogy a statisztikai módszer alapján a TPW és LPW sokkal zajosabb, és napközben dél körül lecsökken. A legnagyobb becsült visszaesés a felszín közeli réteg vízgőztartalmában mutatkozik meg: akár a hajnali vagy esti órákban becsült érték felét is kaphatjuk délben!

Nyáron a meleg levegő miatt a légkör nagyobb mennyiségű vízgőzt tud befogadni, mint a hűvösebb, téli levegő. Az összes esettanulmányt tekintve megállapítható, hogy ez az éves menet a produktumokban is ennek megfelelően jelenik meg.

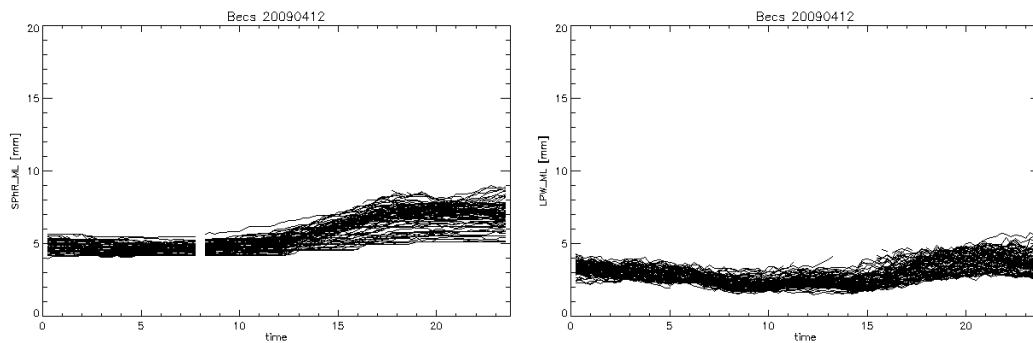
Ha a fizikai és a statisztikai módszerrel becsült vízgőztartalmak napi meneteit viszonyítjuk egymáshoz, észrevehetjük, hogy a középső rétegben valamint a teljes légoszlopra vonatkozóan általában egész nap (utóbbi főként kb. 10-15 óra között) a statisztikai módszer kevesebb vízgőztartalmat származtat. Továbbá a felszín közeli rétegben átlagosan némiképp magasabb vízgőztartalmat, de a fizikai módszertől teljesen eltérő, a hidrológiai folyamatokkal nem magyarázható napi meneteket becsül.



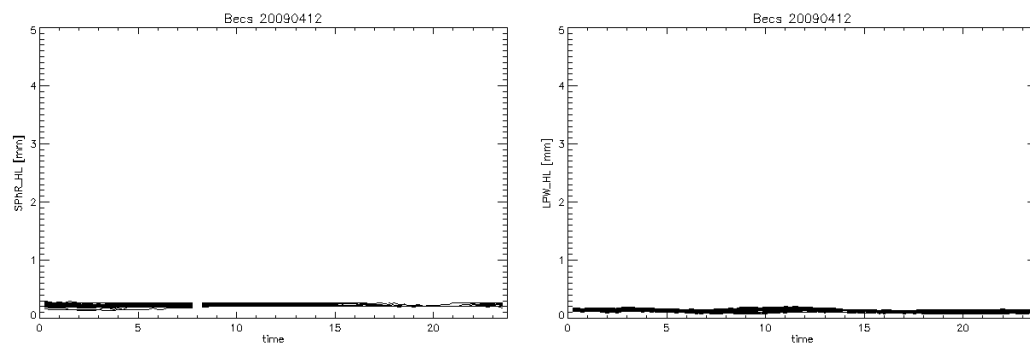
15./a ábra: A fizikai és a statisztikai módszerrel becsült TPW napi menete Bécs környezetében 2009.04.12.-én. A vízszintes tengelyen az órák szerepelnek.



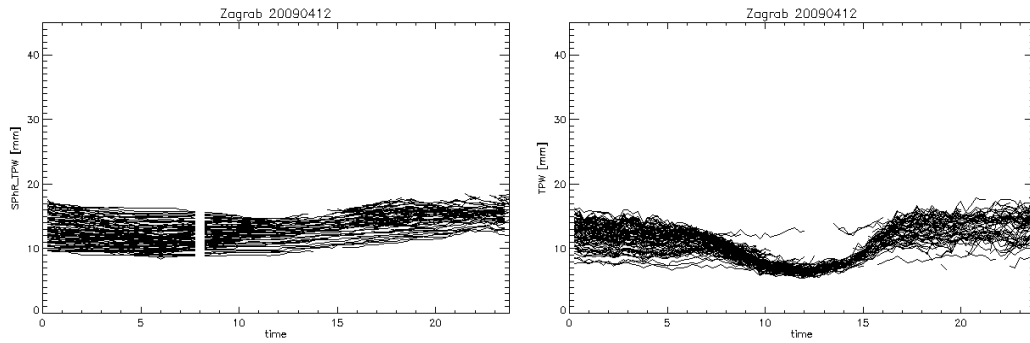
15./b ábra: A fizikai és a statisztikai módszerrel becsült LPW napi menete Bécs környezetében 2009.04.12.-én a határretegben (BL). A vízszintes tengelyen az órák szerepelnek.



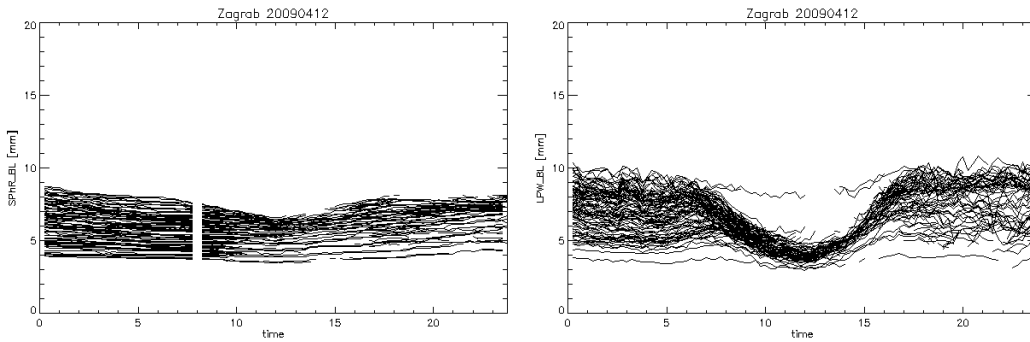
15./c ábra: A fizikai és a statisztikai módszerrel becsült LPW napi menete Bécs környezetében 2009.04.12.-én a középső rétegben (ML). A vízszintes tengelyen az órák szerepelnek.



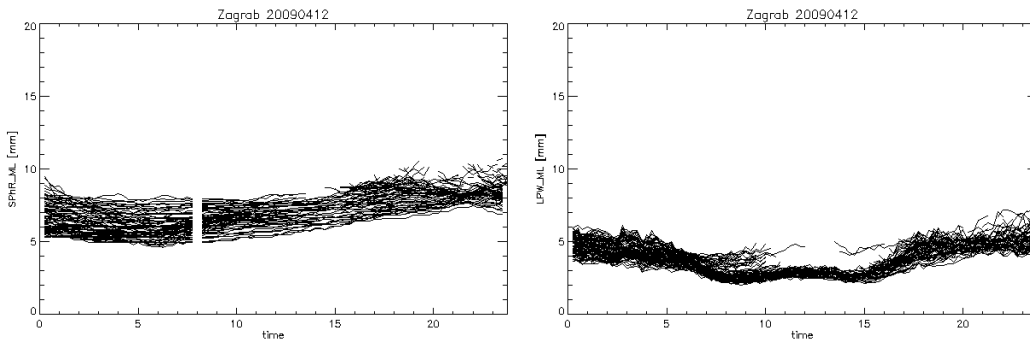
15./d ábra: A fizikai és a statisztikai módszerrel becsült LPW napi menete Bécs környezetében 2009.04.12.-én a magas rétegben (HL). A vízszintes tengelyen az órák szerepelnek.



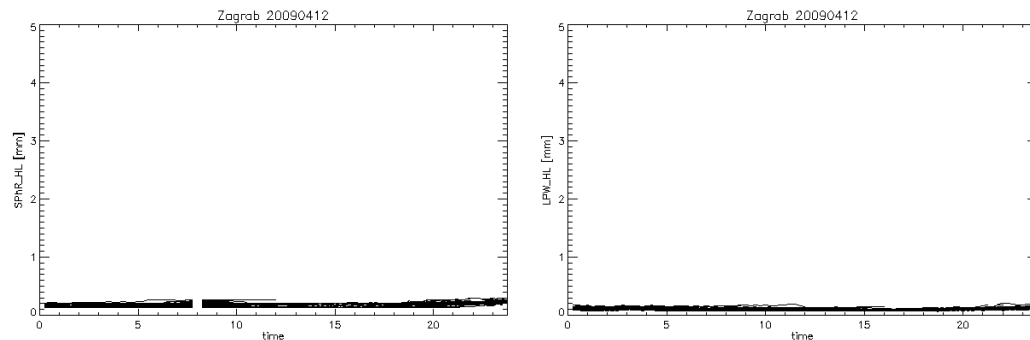
16./a ábra: A fizikai és a statisztikai módszerrel becsült TPW napi menete Zágráb környezetében 2009.04.12.-én. A vízszintes tengelyen az órák szerepelnek.



16./b ábra: A fizikai és a statisztikai módszerrel becsült LPW napi menete Zágráb környezetében 2009.04.12.-én a határretegben (BL). A vízszintes tengelyen az órák szerepelnek.



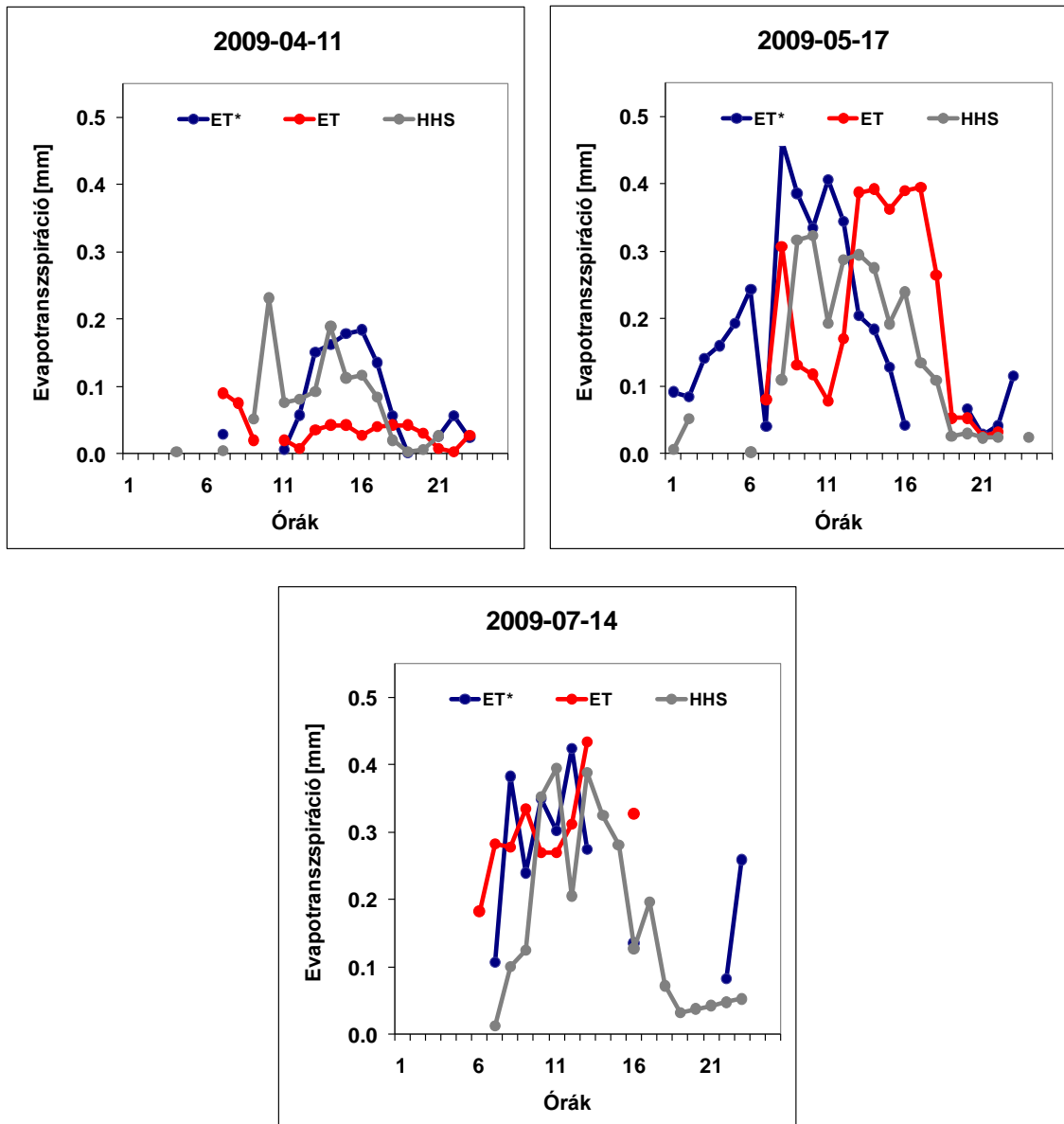
16./c ábra: A fizikai és a statisztikai módszerrel becsült LPW napi menete Zágráb környezetében 2009.04.12.-én a középső rétegben (ML). A vízszintes tengelyen az órák szerepelnek.



16./d ábra: A fizikai és a statisztikai módszerrel becsült LPW napi menete Zágráb környezetében 2009.04.12.-én a magas rétegben (HL). A vízszintes tengelyen az órák szerepelnek.

4.4. Evapotranszpiráció becslése

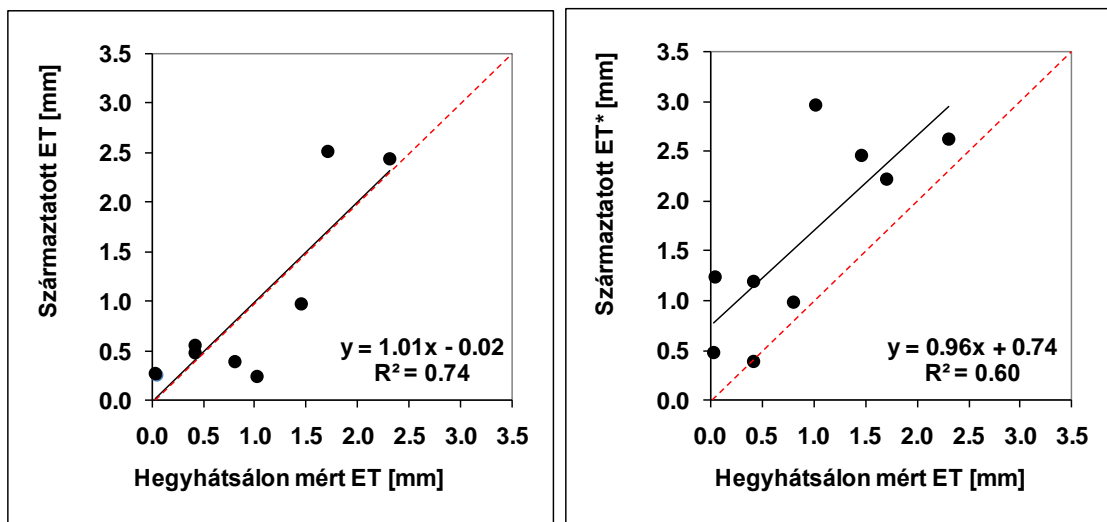
Hegyhátsál környezetében összesen 30 napra becstünk az evapotranszpirációt a 3.7. alfejezetben bemutatott módszerek alapján. Ezek közül a 17. ábrán három napra láthatjuk az általunk származtatott ET értékeket (ET, ET*) a Hegyhátsáli mérésekkel (HHS) együtt.



17. ábra: A becst evapotranszpiráció az egyszerűbb (amikor advekción mentesnek tekintettük a felszín közeli réteget, ET), és a trendmentesített esetben (ET*), összehasonlítva a hegyhátsáli „eddy kovariancia” mérésekkel (HHS)

A vonalak szakadását a felhőtakaró jelenléte okozza, továbbá értelemszerűen nem vettük figyelembe a negatív ET értékeket, azaz amikor az adott óra vízgőztartalma több, mint a következőé. Megállapíthatjuk, hogy az általunk használt viszonylag egyszerű módszerekkel is nagyságrendileg jó becslést kaphatunk a felszíni hozzájárulásra. Továbbá április 11. és május 17. vonatkozásában láthatjuk, hogy a trendmentesített vízgőztartalom adatsorból kapott ET^* pontosabb becslést ad, mint az egyszerűbb módszerrel meghatározott ET.

A 18. ábrán a becült és mért ET idősorok további összehasonlítását láthatjuk. Az összehasonlításhoz egy-egy napon belül képeztük azoknak az óras ET értékeknek az összegét, ahol mind a három esetben – kétféle becült ET és mérés – rendelkezésre álltak adatok. A borultság és a negatív ET értékek miatt különböző napokon eltérő számú értéket összegeztünk. Ezek után a két származtatási eljárás eredményét külön-külön ábrázoltuk a mérési értékekkel összevetve (18. ábra). A diagramokon egy pont egy adott nap evapotranszpiráció részösszegéhez tartozó becült és mért értéket hasonlítja össze.



18. ábra: Az evapotranszpirációra alkalmazott kétféle származtatási módszer összevetése hegyhátsáli mért adatokkal (bal oldalon: ET, jobb oldalon: ET^*).

Az előbbieknél megfelelően a magasabb értékek nem feltétlenül jelentik azt, hogy adott napon nagyobb volt a evapotranszpiráció, lehet hogy csupán arról van szó, hogy adott napon több óras léptékű ET érték állt rendelkezésre, melyeknek az összegét képezhettük. Mindazonáltal lehetőség nyílik a becült és mért értékek közötti kapcsolatot ábrázolni, hiszen egy pont ugyanannyi mért és ugyanannyi becült ET összegét reprezentálja. A vizsgált napok közül 9 esetén volt legalább 3 óra egy nap

folyamán amikor rendelkezésre álltak az ET értékek, így elvégezhető volt a fenti elemzés.

A kapott eredmények (18. ábra) diszkutálása előtt ki kell térni a referencia adatsor, azaz a hegyhátsági mérések pontosságára. A felszíni energia mérleg vertikális irányba történő zárásával foglalkozó szakirodalom alapján azt láthatjuk, hogy az EK módszerrel mért szenzibilis és látens hőáram összege általában kevesebb, mint a beérkező nettó sugárzás és a talaj hőáram különbsége (Twine et al., 2000). Különböző mérőállomások adatai szerint a szenzibilis és a látens hőáram alulbecslése kb. 10-30%-os lehet (Franssen et al., 2010). Ezek alapján az általunk referenciának használt EK módszer alapján mért evapotranszpiráció adatokban fellépő alulbecslést is figyelembe kell venni. Tehát a 18. ábrán a bal oldalon látható advekcióna mentes felszín közeli réteget feltételező módszer hiába illeszkedik jobban az EK mérések eredményeihez, valószínűleg a valóságot mégis a trendmentesített vízgőz adatsorból származtatott ET* (jobb oldali ábra) áll közelebb. Eredményeink szerint a trendmentesített műholdas adatokból származtatott evapotranszpiráció az EK méréseket kb. 60%-al becsli túl. Amennyiben ezt az értéket hosszabb időszor adatai is megerősítik, akkor joggal feltételezhetnénk, hogy az EK mérés során a látens és szenzibilis hőáram alulbecslése nem azonos mértékű: a látens hőáram esetén ez az alulbecslés esetleg nagyobb (vesd össze a Franssen et al., 2010 tanulmány fent említett eredményeivel). Abban az esetben, ha ez az állítás igaznak bizonyul, úgy alapvetően új információt tudunk szolgáltatni az EK mérések pontosságára vonatkozóan. Természetesen korai lenne kijelenteni, hogy ez a 60% eltérés reprezentatív a teljes mérési időszakra Hegyhátsálon.

Összességében láthatjuk, hogy a műholdas adatokból származtatott vízgőzmezők változásai alapján nagyságrendileg jó becslést kaphatunk az evapotranszpirációra. Számos bizonytalanság mellett, az általunk elvégzett ET becslés során a lehető legegyszerűbb számítási módszerekkel a mérésekkel konzisztens eredményre jutottunk. Ezek alapján a műholdas technikák felhasználásával eddig még kevésbé kutatott, nagy kiterjedésű területek ET-ját becsülhetjük. Mindez felhasználható például a felszíni áramok kiszámításához, a hidrológiai ciklusban (akár az elmúlt évtizedben) fellépő változások detektálására, továbbá a mezőgazdasági folyamatokban betöltött szerepe sem elhanyagolható, különösképpen az ET területi és szezonális változékonyságának tekintetében.

Összefoglalás

Munkánk során az EUMETSAT Nowcasting Munkacsoportja által kifejlesztett NWC SAF v2010 szoftvert adaptáltuk az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén. A programcsomag segítségével SEVIRI műholdas mérések alapján származtattuk a légkör vertikálisan integrált vízgőztartalmát három légrétegben, valamint a teljes légoszlopban. A vízgőztartalmat statisztikai illetve fizikai módszerekkel származtattuk, melyek pontosságát rádiószondás mérési adatokkal vizsgáltuk, szem előtt tartva a rádiószondás mérések pontatlanságát. Ezek után különböző légrétegekben elemeztük a vízgőztartalom területi eloszlását, valamint napi meneteit. Vizsgálatainkat egy európai kivágatra, a 2009-es év közel derült napjaira végeztük el. Munkánk eredményeképpen az alábbi fontosabb következtetésekre jutottunk:

- A rádiószondás felszállások méréseivel történő összevetés alapján elmondható, hogy a fizikai módszert alkalmazó, 2010-től hozzáférhető új produktum (PGE13) lényegesen jobb eredményt ad, mint a statisztikai módszert használó produktumok (PGE06 ill. PGE07).
- A PGE13 eredményei konzisztensek a rádiószonda szárazodásával, mely a nappali órákban történő felszállások esetén következik be, valószínűleg a magasabb szinteken fellépő napsugárzás hatására. Ezek alapján a fizikai módszert alkalmazó produktum alkalmasak lehetnek a napi menetek reális leírására.
- A PGE06 és a PGE07 esetén az éjjeli és a nappali hibák eltérőek, ezért a napi meneteket tekintve fenntartásokkal kell kezelni az adatokat.
- A térbeli változékonyságot vizsgálva láthattuk, hogy a PGE13 reálisabb, térbeli szakadásoktól mentes adatsort származtat, míg a statisztikai módszert alkalmazó produktumok a szárazföldek körvonalai mentén éles vízgőztartalom változást becsülnek.
- Az egyes rétegek, valamint a teljes vertikális légoszlop vízgőztartalmának napi menete változékonny képet mutat. Tükrözi az evapotranszpiráció hatását, illetve a határréteg vízgőzmérlegét, de a magasabb légrétegekben zajló folyamatokkal kapcsolatos információt is rejt.

- A napi menetek alapján lehetőség nyílik a felszíni vízgőz hozzájárulás (evapotranszspiráció) becslésére. Hegyhátsál környezetében kétféle módszerrel becsültük az óras ET értékeket, melyeket összevetettük az ott végzett „eddy kovariancia” (EK) mérésekkel. Mindkét módszerrel nagyságrendileg megfelelő értékeket kaptunk, azonban az EK módszer mérési hibáját figyelembe véve az a módszer adott jobb becslést, ahol a középső réteg trendjét (advekcio hatását) eltávolítottuk a felszín közeli réteg vízgőztartalmának idősorából.

A továbbiakban szeretnénk kiterjeszteni a vertikálisan integrált vízgőztartalom származtatását a teljes 2009-es évre, így lehetővé válhat a vízgőztartalom év során fellépő változékonyságának vizsgálata. Számos további terület alapján vizsgáljuk a napi meneteket, lehetőleg olyan térségeket választva, melyek hasonló domborzati sajátosságokkal bírnak (pl. Alföld). Időjárás előrejelző modell eredmények alapján szeretnénk meghatározni a légkör egyes rétegeiben fellépő advekción, amivel lehetőség nyílik a napi menetek további értelmezésére.

Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom az ELTE TTK Geofizikai és Űrtudományi Tanszékén működő Űrkutató csoportnak, kiemelten Pásztor Szilárdnak, aki elérhetővé tette számunkra a sajátvételű archív MSG adatokat. Köszönjük az AeMET-nek, hogy engedélyezte az általuk kifejlesztett szoftver használatát.

Szeretném megköszönni az Országos Meteorológiai Szolgálatnak a támogatását, kiemelten Ihász Istvánnak, hogy az ECMWF MARS adatbázisából lekérte a 2009-re vonatkozó numerikus időjárás előrejelzési mezőket és lehetővé tette, hogy azokhoz mihamarabb hozzáférjünk. Valamint köszönöm témavezetőimnek, Barcza Zoltánnak, Kern Anikónak és Pongrácz Ritának a kitartó lelkesedésüket és folyamatos támogatásukat.

A diplomamunka az Európai Unió támogatásával és az Európai Szociális Alap társfinanszírozásával jöhetett létre, a támogatási szerződés száma TÁMOP 4.2.1./B-09/1/KMR-2010-0003.

Irodalomjegyzék

- Baldocchi, D. D. (2003): Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 9, 479-492.
- Barcza, Z., Kern, A., Haszpra, L., Kljun, N. (2009): Spatial representativeness of tall tower eddy covariance measurements using remote sensing and footprint analysis. *Agricultural and Forest Meteorology*, 149, 795-807. doi:10.1016/j.agrformet.2008.10.021
- Böloni, G. (2003): Meteorológiai adatasszimiláció. 29. Meteorológiai Tudományos Napok kiadványa, 41-56. (<http://www.met.hu/pages/kfo/BoloniG200309.pdf>)
- Dessler, A. E., Davis, S. M. (2010): Trends in tropospheric humidity from reanalysis systems. *Journal of Geophysical Research*, 115, D19127, doi:10.1029/2010JD014192.
- Earth Observing System (EOS), weboldal (2010): <http://eosps0.gsfc.nasa.gov>. Hozzáférés: 2010. november.
- EUMETSAT Satellite Application Facility to Nowcasting and Very Short Range Forecasting (2010a): Software User Manual for the SAFNWC/MSG Application: Software Part. Code: SAF/NWC/CDOP/INM/SW/SUM/2, Issue 4, Rev. 0.
- EUMETSAT Satellite Application Facility to Nowcasting and Very Short Range Forecasting (2010b): Algorithm Theoretical Basis Document for „Clear Air Products”. Code: SAF/NWC/CDOP/INM/SCI/ATBD/06, Issue 2, Rev. 0.2.
- EUMETSAT Satellite Application Facility to Nowcasting and Very Short Range Forecasting (2010c): Algorithm Theoretical Basis Document for PGE13 „SEVIRI Physical Retrieval Product”(SPhR). Code: SAF/NWC/CDOP/INM/SCI/ATBD/13, Issue 1, Rev. 0.
- EUMETSAT Satellite Application Facility to Nowcasting and Very Short Range Forecasting (2010d): SAFNWC/MSG Output Products Format Definition. Code: SAF/NWC/CDOP/INM/SW/ICD/3, Issue 4, Rev. 0.
- EUMETSAT Satellite Application Facility to Nowcasting and Very Short Range Forecasting (2010e): Product User Manual for „Clear Air Products”. Code: SAF/NWC/CDOP/INM/SCI/PUM/06, Issue 2, Rev. 0.2.

- EUMETSAT Satellite Application Facility to Nowcasting and Very Short Range Forecasting (2010f): Product User Manual for PGE13 „SEVIRI Physical Retrieval Product” (SPhR v1.0). Code: SAF/NWC/CDOP/INM/SCI/PUM/06, Issue 2, Rev. 0.2.
- EUMETSAT Coordinantion Group for Meteorological Satellites (CGMS) (1999): LRIT/HRIT Global Specification. Doc. No.: CGMS 03 Issue 2.6
- EUMETSAT, weboldal (2010a): <http://www.eumetsat.int/Home/Main/AboutEUMETSAT/WhoWeAre/MemberandCooperatingStates/index.htm>.
Hozzáférés: 2010. november.
- EUMETSAT, weboldal (2010b): http://www.eumetsat.int/Home/Main/Satellites/SatelliteProgrammesOverview/SP_20100427120100427?l=en. Hozzáférés: 2010. november.
- European Space Agency (ESA), weboldal (2010): <http://www.esa.int/esaCP/index.html>.
Hozzáférés: 2010. november.
- Franssen, H. J. H, Stöckli, R., Lehner, I., Rotenberg, E., Seneviratne, S. I. (2010): Energy balance closure of eddy-covariance data: A multisite analysis for European FLUXNET stations. *Agricultural and Forest Meteorology*, 150, 1553-1567.
- Gelybó, Gy. (2006): A légkör vertikális szondázása a NOAA műholdak ATOVS mérései alapján. Diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék 93 pp.
- 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
- Jung, M., Reichstein, M., Ciais, P., Seneviratne, S. I., Sheffield, J., Goulden, M. L., Bonan, G., Cescatti, A., Chen, J., de Jeu, R., Dolman, A. J., Eugster, W., Gerten, D., Gianelle, D., Gobron, N., Heinke, J., Kimball, J., Law, B. E., Montagnani, L., Mu, Q., Mueller, B., Oleson, K., Papale, D., Richardson, A. D., Rouspard, O., Running, S., Tomelleri, E., Viovy, N., Weber, U., Williams, C., Wood, E., Zaehle, S., Zhang (2010): Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*. 467, 951-954. doi:10.1038/nature09396
- Kern, A., Bartholy, J., Borbás, E. É., Barcza, Z., Pongrácz, R., Ferencz, Cs. (2008): Estimation of vertically integrated water vapor in Hungary using MODIS imagery. *Advances in Space Research*, 41, 1933-1945. doi:10.1016/j.asr.2007.06.048.

- Miloshevich, L. M., Whiteman, D. N., Vömel, H., Lesht, B. M., Schmidlin F. J. (2006): Absolute accuracy of water vapor measurements from six operational radiosonde types launched during AWEX and implications for AIRS validation. *Journal of Geophysical Research*, 111, D09S10, doi:10.1029/2005JD006083.
- Miloshevich, L. M., Vömel, H., Whiteman, D. N., Leblanc, T. (2009): Accuracy assessment and correction of Vaisala RS92 radiosonde water vapor measurements. *Journal of Geophysical Research*, 114, D11305, doi:10.1029/2008JD011565.
- Montmerle, T., Rabier, F., Fischer, C. (2007): Relative impact of polar-orbiting and geostationary satellite radiances in the Aladin/France numerical weather prediction system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 133, 655–671. doi:10.1002/qj.34.
- NWC SAF weboldal (2010): <http://www.nwcsaf.org>. Hozzáférés: 2010. november.
- Putsay M., Kocsis Zs. (2009): Az EUMETSAT által műholdadatokból származtatott légköri és felszíni paraméterek. Az Országos Meteorológiai Szolgálat kiadványa, 63 pp. http://www.met.hu/doc/EUMETSAT_produkum_ismerteto.pdf. Hozzáférés: 2010. november
- Saunders, R. W., Matricardi, M., Brunel, P. (1999): An Improved Fast Radiative Transfer Model for Assimilation of Satellite Radiance Observations. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 125, 1407-1425. doi:10.1256/smsqj.55614.
- Schmidt, G. A., Ruedy, R. A., Miller, R. L., Lacis, A. A. (2010): Attribution of the present-day total greenhouse effect. *Journal of Geophysical Research*, 115, D20106, doi:10.1029/2010JD014287.
- Twine, T. E., Kustas, W. P., Norman, J. M., Cook, D. R., Houser, P. R., Meyers, T. P., Prueger, J. H. Starks, P.J., Wesely, M. L. (2000): Correcting eddy-covariance flux underestimates over a grassland. *Agricultural and Forest Meteorology*, 103, 279-300.
- University of Wyoming (UWYO), weboldal (2010): <http://weather.uwyo.edu/upperair>. Hozzáférés: 2010. november.
- Vömel, H., Selkirk, H., Miloshevich, L., Valverde-Canossa, J., Valdés, J., Kyrö, E., Kivi, R., Stolz, W., Peng, G., Diaz, J. A. (2007): Radiation dry bias of the Vaisala RS92 humidity sensor. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 24, 953-963.

Zsugyel, M. (2009): Hidrológiai célú műholdas csapadékbecslések verifikálása felszíni csapadékmérő adatok alapján Magyarország területére. Diplomamunka, ELTE Meteorológiai Tanszék, 64 pp.