

Közvetlen vételű MODIS adatok alkalmazásai Magyarország térségére

**Kern Anikó^{1,*}, Bognár Péter², Pásztor Szilárd³, Timár Gábor⁴, Lichtenberger János⁵,
Ferencz Csaba⁶, Steinbach Péter⁷, Ferencz Orsolya⁸**

- ¹ Tudományos munkatárs, ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék – Űrkutató Csoport; anikoc@nimbus.elte.hu
- ² Tudományos munkatárs, ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék – Űrkutató Csoport; peti@sas.elte.hu
- ³ Tudományos munkatárs, ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék – Űrkutató Csoport; szilard@sas.elte.hu
- ⁴ Tanszékvezető egyetemi docens, ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék; timar@caesar.elte.hu
- ⁵ Kutató professzor, ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék – Űrkutató Csoport; lityi@sas.elte.hu
- ⁶ Egyetemi magántanár, ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék – Űrkutató Csoport; csaba@sas.elte.hu
- ⁷ Tudományos munkatárs, ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék – Űrkutató Csoport; steinb@sas.elte.hu
- ⁸ Tudományos főmunkatárs, ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék – Űrkutató Csoport; orsi@sas.elte.hu

Abstract — The Eötvös Loránd University (ELU) operates a polar orbiting satellite receiving station in Budapest since 2002. This station receives Earth observation data from polar orbiting satellites including MODerate resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) Direct Broadcast (DB) data stream from satellites Terra and Aqua. The received DB MODIS data are processed real-time automatically to obtain several products mainly about the atmosphere, and non real-time investigating various features of the land surface and the atmosphere as well. Processing of the MODIS data is based on freely distributed software packages (created by the Space Science and Engineering Center (SSEC) at the University of Wisconsin Madison) supporting any DB ground station in meteorological and environmental researches. In the present overview we give a short description of the different applications at the ELU using the received MODIS data.

Index Terms: Remote Sensing, Direct Broadcast, MODIS data, Vegetation, Meteorology

Kulcsszavak: Műholdas távérzékelés, Közvetlen adatvétel, MODIS adatok, Vegetáció, Meteorológia

1. Bevezetés

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Űrkutató Csoportja 2002-ben telepítette műholdvevő-állomását Budapesten (Ferencz et al., 2003). Az állomás (1. ábra) jelenleg kvázipoláris és geostacionárius meteorológiai műholdak és a felsőlégkör vizsgálatára létrehozott CHIBIS műhold adatait egyaránt veszi. A meteorológiai műholdak adatainak vétele közül az állomást az amerikai Terra és Aqua műholdak MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) szenzor multispektrális adatainak közvetlen vétele (Direct Broadcast, DB) teszi különlegessé és a térségben egyedülállóvá (Timár et al., 2006), immár lassan 10 éve. Jelen írásunkban a MODIS adatok különböző valós idejű feldolgozását és a hosszabb adatsorokra épülő utólagos alkalmazásait mutatjuk be.



1. ábra. Az ELTE műholdvevő-állomása az Egyetem Északi-tömbjének tetején, Lágymányoson

2. A MODIS szenzor

A NASA EOS űrbázisú földmegfigyelő rendszer első képviselőjét az EOS-AM1/Terra (továbbiakban Terra) műholdat 1999 decemberében állították Föld körüli pályára. Fedélzetén öt, a tudomány akkori fejlettségének megfelelő szenzor (ASTER, CERES, MISR, MODIS és MOPITT) kapott helyet, melyek méréseire és azok pontosságára korábban űrbázisú eszköz esetén még nem volt példa. Ezzel lehetővé vált az óceánok, a szárazföld, a légkör és a bioszféra közötti kapcsolatok vizsgálata, mely kiterjed mind a természetes, mind az antropogén globális klíma- és környezetváltozásra is. A Terra fedélzetén lévő műszerek méréseit kiegészítve került felbocsátásra 2002 májusában az EOS következő műholdja, az EOS-PM1/Aqua (továbbiakban Aqua). Szenzorai (AIRS, AMSU-A, AMSR-E, CERES, MODIS, HSB) többségében különböznek a Terrától, azonban kettő (köztük a MODIS) a Terrán is megtalálható. A Terra és az Aqua műholdak pályája 98,203°-os inklinációjú kvázipoláris napszinkron pályára ~705 km magasan a földfelszín felett. Ebből következően ~98,7 percenként kerülnek meg a Földet, adott térség fölött legalább naponta kétszer áthaladnak, és 16 naponként pontosan ugyanazon a pályán haladnak végig. A Kárpát-medence felett napközben a Terra megközelítőleg 9:25 UTC és 10:10 UTC között, míg az Aqua 11:25 UTC és 12:10 UTC között halad át.

Az amerikai NASA GSFC által létrehozott MODIS egy 36 spektrális mérési csatornával kialakított kétoldali forgótükrös sugármérő műszer, mely méréseit mintegy 2330 km széles területről folyamatosan végzi 0,412 μm és 14,235 μm között (King et al., 1992). Kettő csatorna 250 m $\times$ 250 m, 5 csatorna 500 m $\times$ 500 m, a maradék 29 csatorna pedig 1000 m $\times$ 1000 m horizontális térbeli felbontással rendelkezik a nadírban. Tekintve, hogy a hordozó műholdak X-sávú közvetlen adattovábbító-rendszerrel is rendelkeznek, mely megfelelő vevőberendezés esetén lehetőséget biztosít a MODIS adatok közvetlen vételére is, ezért adott földfelszíni pontban az aktuálisan mért adatok szinte azonnal (real-time) elérhetők. A műszerrel szemben támasztott igények egy nagy sugárási érzékenységű, precíz georegisztrálású és magas kalibrációs pontosságú szenzor létrejöttéhez vezettek, mely számos kihívást keltett életre. Fedélzeti kalibrációs eljárása az egyik legösszetettebb és legszélesebb körű, mely valaha a műholdas távérzékelés történelmében működött.

A szenzor tervezett élettartama 6 év volt, melyet már mind a Terra/MODIS, mind az Aqua/MODIS túlteljesített. Jelenlegi műszaki állapotukat tekintve optimális esetben még legalább 2020-ig üzemképesek lesznek.

3. A vett MODIS adatok valós idejű alkalmazásai

A vevőállomás által vett MODIS adatok feldolgozásának első lépéséül a teljesen nyers, műholdról érkezett mérési adatáramot kell kalibrálni és georeferált fizikai mennyiségekké, radianciákká és földrajzi koordinátákká alakítani. Az előfeldolgozás eredményeként létrejövő ún. 1B szintű MODIS adatok a kiindulási adatai a különböző alkalmazásoknak, melyeket a következőkben részletezünk.

1. A távérzékelési adatok legalapvetőbb vizsgálati módszere a vizuális elemzés, melyhez látványos, ún. valós színezésű képeket készítünk. A 250 méteres horizontális felbontású MODIS képeket az teszi élethűvé, hogy az RGB (Red-Green-Blue) színkeveréshez szükséges három csatorna ténylegesen beleesik a spektrum vörös, zöld és kék tartományába (Gumley et al., 2003). Ráadásul ezeken a képeken a légkör homályosító hatásából a Rayleigh szóródás eltávolításra kerül, mely így még valóságosabb megjelenést kölcsönöz a képeknek. A nagy aeroszol töltöttségű

területek továbbra is láthatók maradnak. Az így készített valós színezésű műholdképekből folyamatosan válogatva létrehoztunk egy, az Interneten elérhető galériát is (<http://nimbus.elte.hu/kutatas/sat/modis.html>), mely 2004 óta mutatja be a legérdekesebb jelenségeket vagy pusztán csak a leglátványosabb műholdképeket Európa térségében. A korábbi évek további nagysikerű felhasználási területe volt, hogy ezekből a valós színezésű műholdképekből 3-4 közismert Internetes hírportálon is (pl. Origo, National Geographic Magyarország, Úrvilág) heti rendszerességgel mutattunk be érdekes és látványos aktuális felvételeket (összesen több mint 700-at), részletes magyarázó szöveg kíséretében. A 2. ábrán ilyen valós színezéssel megjelenített képeken láthatjuk a Balaton térségét 2010 telén és 2011 késő tavaszán.



2. ábra. Balaton télen és késő tavasszal valós színezésű MODIS-képeken (a Terra/MODIS felvételei rendre 2010.11.27-én és 2011.05.06-én készültek)

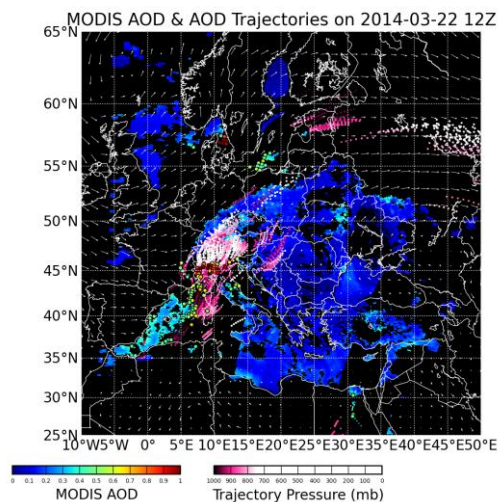
2. A valós színezésű MODIS képek a sokak által jól ismert térinformatikai szoftver, a Google Earth számára is kompatibilis formátumba hozhatók, az ún. KML (Keyhole Markup Language) nyelv segítségével (Gumley és Evan, 2009). Akár egy áthaladást is, de akár adott nap több áthaladásának szintézisét is tanulmányozhatjuk ily módon, ahol az aktuális légköri és felszíni állapotokat szintén 250 méteres horizontális felbontású valós színezésű képeken keresztül szemlélhetjük meg. A teljes Európát lefedő, 250 méteres felbontású georeferált, valós színezésű MODIS kompozitkép naponta elérhető külön a Terra és külön az Aqua műholdak vett MODIS adataira. Ezt szemlélteti a 3. ábra, ahol két egymást követő Aqua áthaladás MODIS adatai együttesen kerültek megjelenítésre a Google Earth szoftverrel.



3. ábra. Aktuális adatok a Google Earth megjelenítésében: Európa Aqua/MODIS adatok alapján 2014.03.13-án

3. A vizuális kiértékelésen túl számszerű meteorológiai információk kinyerésére is mód van. Ennek megfelelően számos, a légkörre vonatkozó származtatott mennyiségeket állítunk elő az ún. IMAPP (International MODIS and AIRS Processing Package) szoftver segítségével (Strabala et al., 2004, 2003; Huang et al., 2004). A származtatott 2-es szintű meteorológiai produktumok a teljesség igénye nélkül az alábbiak: aeroszol optikai mélység több hullámhosszra, összetett felhőmaszk, a felhőtető hőmérséklete és nyomása, a felhőzet effektív emisszivitása és optikai vastagsága, teljes kihullható vízgőz, stabilitási indexek, függőleges légoszlop ózontartalma, hőmérsékleti és nedvességi profilok, vízfelszínek hőmérséklete, stb.

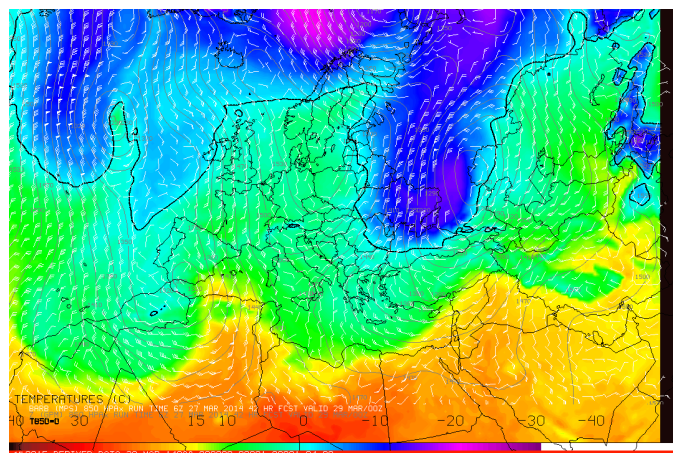
4. Az IDEA-I (Infusing satellite Data into Environmental Applications - International) szoftvercsomag az előállított 2-es szintű meteorológiai produktumok közül az aeroszol optikai mélység mezők alapján azonosítja a nagy aeroszol töltöttségű, vagyis magas aeroszol optikai mélységű területeket, majd ezekből trajektóriákat indít aznap 00 UTC-hez képest a következő 48 órára időben előre óránkénti felbontással ún. trajektória modell segítségével (Huang et al., 2004; Al Saadi et al., 2005). A modell futtatásához szükséges bemenő adatokat a saját származtatású aeroszol mezőkön túl az NCEP GFS (Global Forecast System) modell 0,5°-os horizontális és 6 óránkénti időbeli felbontású előrejelzési adatai szolgálják a futást megelőző nap éjféltől (00 UTC) az azt követő 60 órára. Eredményként az aeroszolok horizontális és vertikális mozgásáról áll elő egy előrejelzés, melynek legegyszerűbb interpretálása az animáció. Az így előálló előrejelzések szemléltetéseként szolgál a 4. ábrán bemutatott 2014.03.21-ei indítású előrejelzés egy képkockája, ahol a nagy aeroszol optikai mélységű légtestek mozgásának egy adott időpontra vonatkoztatott állapotát láthatjuk (sötétciklámen–fehér színskálával megjelenítve a légtest magasságát (mbar-ban kifejezve)). A nagy aeroszol optikai mélységű Pó-síkságról származó szennyezőanyag útja jelen esetben Közép-Európa felé vezet.



4. ábra. MODIS aeroszol optikai mélység előrejelzés 2014.03.22. 12 UTC időpontra 2014.03.21. 00 UTC indítással

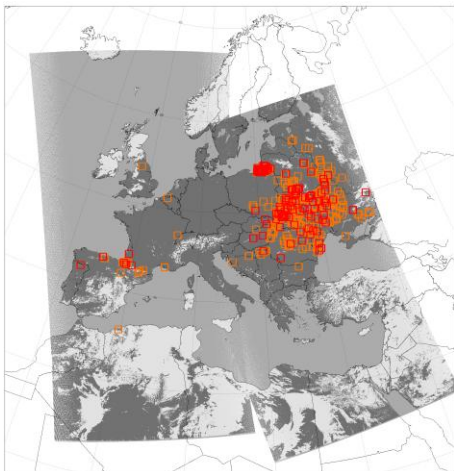
5. Az ELTE állomás által vett adatok valós idejű felhasználásának következő lépcsőfoka az ún. DBCRAS (Direct Broadcast CIMSS (Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin-Madison) Regional Assimilation System) korlátos tartományú időjárási előrejelző modell (Aune et al., 2008). A pseudo-nem-hidrosztatikus modellváltozat kifejezetten MODIS adatok asszimilálására és azok az időjárás előrejelzés minőségére gyakorolt hatásának

vizsgálatára készült. Az előrejelzés 48 km × 48 km horizontális felbontású rácsra, 38 szigma-szinttel, 3 órás időlépcsővel 72 órás időszakra történik 00 UTC és 12 UTC időpontokban. A kezdeti értékeket egy 12 órás spin-up futtatás határozza meg, melyben NOAA NCEP (National Centers for Environmental Prediction) GFS előrejelzési modelleredmények, felszíni megfigyelések, NOAA hó- és jégtakaró mezők, tengerfelszín-hőmérséklet mezők és saját vételi MODIS adatok kerülnek asszimilálásra. A valós idejű 2-es szintű MODIS produktumok közül a modell a teljes kihullható vízgőzt, a felhőtető nyomását és a felhőzet effektív emisszivitás paramétereit használja fel. Az előálló előrejelzési mezők közül például a 850 hPa-os légnyomási szint hőmérsékletének, magasságának és szélvektorainak mezejét mutatjuk be Európa térségére az 5. ábrán 2014.03.30. 00 UTC időpontra 2014.03.27. 06 UTC indítással. Az ábra színskálája a °C fokban kifejezett 850 hPa-os légnyomási szint hőmérsékletének felel meg. Az adaptált modell ún. domain-területének közepén Magyarország értelemszerűen található. Az előrejelzésekből ún. meteogram is elérhető, melyeken az adott földrajzi pontra (jelenleg csak Budapestre) vonatkozó főbb meteorológiai paraméterek előrejelzései láthatók 72 órára 3 óránként időlépcsővel. Oktatási kereteken belül hallgatók dolgoznak jelenleg azon, hogy az előrejelzés webes kereteken belül tetszés szerint lekérhető legyen bármely földrajzi pontra a modell domain-területén belül. A durva felbontású DBCRAS modellbe ágyazva hozták létre a finomabb felbontású NDBCRAS-t (Nested DBCRAS), amelynek horizontális felbontása 16 × 16 km. A modell 48 órára, 3 órás időlépcsővel állítja elő ugyanazokat a meteorológiai elemeket, melyet a kezdeti és határfeltételeket adó DBCRAS is előállít.



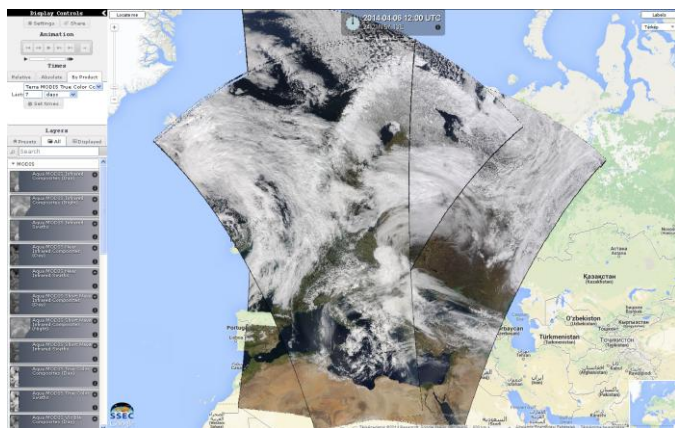
5. ábra. A 850 hPa-os légnyomási szint hőmérsékletének, magasságának és szélvektorainak előrejelzési mezeje Európa térségére 2014.03.30. 00 UTC időpontra 2014.03.27. 06 UTC indítással

6. A MODIS szenzor infravörös adatai alapján valós idejű tűzazonosításra is lehetőség van (Davies et al., 2004; Giglio et al., 2003; Justice et al., 2002), mellyel akár már 100 m²-es tűzforrás is detektálhatóvá válik, amennyiben annak pár km²-es környezete felhőtlen. Saját vételi adatainkra automata rendszerben minden vétel után közvetlenül meghatározzuk a tüzes koordinátákat. Az így azonosított tűzforrások leggyakrabban mezőgazdasági eredetűek (pl. tarlóégetések), vagy pedig nádas- és erdőtüzek. A 3. ábrán bemutatott, két egymást követő, többnyire derült Aqua áthaladás MODIS adatai alapján azonosított tűzforrások láthatók a 6. ábrán, ahol a piros színű négyzetekkel a magas bizonyosságú, míg narancssárgával a közepes bizonyosságú tűzforrásokat jelöltük. A kép alapkötőként megjelenő sötétszürke szín a derült, míg a világosszürke a felhővel vagy hóval fedett területeket jelenti.



6. ábra. MODIS adatok alapján azonosított tűzforrások (piros és narancssárga négyzetek) Európára Aqua/MODIS adatok alapján 2014.03.13-án

7. A saját vételű MODIS adatok legújabb alkalmazása az IMAPP RealEarth WMS (Web Mapping Service for Direct Broadcast), mely hamarosan publikusan is elérhető szoftverré válik (a cikk írásakor még csak béta verziója létezett). A szoftver egy virtuális gépnek felel meg, mely képes a vett valós idejű MODIS adatok különböző csatornáiból készített GeoTIFF képek Google Maps (vagy Google Earth) alapú megjelenítésére. Az alkalmazás keretein belül 7 napig visszamenőleg tekinthetők meg a látható, közeli infravörös, infravörös és vízgőz tartományokban mért adatok, illetve a látható csatornákból készített valós színezésű műholdképek. A GeoTIFF képek legyártása egy, az SSEC kutatói által szintén nemrég publikált másik szoftver (VIIRS and MODIS Reprojection Polar2grid) segítségével történik. A szoftvercsomag saját vételű MODIS adatokra történő automatikus alkalmazása (7. ábra) a <http://regcm.elte.hu:8001/> weboldalon érhető el.



7. ábra. Valós idejű MODIS adatok megjelenítése az IMAPP RealEarth WMS alkalmazással (Terra és Aqua MODIS kompozit 2014.04.06-án)

A vázolt produktumok kiépített rendszerben minden sikeresen rögzített áthaladás után automatikusan keletkeznek és többségük az interneten is elérhető (<http://nimbus.elte.hu/kutatas/sat/>). A különböző produktumokat külön a közvetlen adatvételi (DB) MODIS adatok feldolgozására létrehozott szoftverekkel állítjuk elő, melyek többségét az amerikai Wisconsin-Madison Egyetem tapasztalt kutatói készítették és frissítik folyamatosan. A szoftverek egymás utáni, láncszerű és automatikus alkalmazása már saját fejlesztés eredményeként történik.

4. A MODIS adatok utólagos alkalmazásai

A MODIS adatok utólagos felhasználása az elmúlt években sokrétű volt, mely kiterjedt az egyetemi oktatásban való felhasználásra is. Részletesen megvizsgáltuk szinte mindegyik származtatott meteorológiai produktumot. Behatóbb vizsgálatok a következőkben bemutatásra kerülő területeken történtek. A különböző kutatásokhoz idén ősszel már 10 év hosszúságú saját vételi MODIS adatsor fog a rendelkezésünkre állni.

4.1 AVHRR adatok légköri korrekciója MODIS adatok felhasználásával

Műholdas távérzékeléssel nyert multispektrális adatokból a növényzet állapotára, produktivitására vagy fenológiai ciklusára jellemző információ is kinyerhető. Bár az egyes csatornák mérései önállóan is használhatók bizonyos jellemzők számszerűsítésére, gyakorlati okokból a csatornák adatainak kombinálásával különböző vegetációs indexeket állítanak elő. Ezek közül az egyik legismertebb az ún. NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), mely előállításához két különböző hullámhossz-tartományra vonatkozó reflektancia különbségének normalizálásával történik. A NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) meteorológiai műholdak fedélzetén 1979 óta megtalálható 6 mérési csatornával rendelkező AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) sugármérő esetén az NDVI meghatározásához szükséges két csatorna az 1-es (0,58-0,68 μm) és a 2-es (0,725-1,1 μm). Az ezekben a spektrális tartományokban mért 1 km x 1 km horizontális felbontású reflektanciák alapján tekintélyes hosszúságú NDVI adatsorokat állítottak elő, melyek a hosszabb időskálán bekövetkezett nagyobb térségre vonatkozó, vagy akár globális léptékű változások tanulmányozásához az elérhető egyik legjobb adatforrásnak számítanak. Tekintve, hogy az ELTE vevőállomása a NOAA műholdssorozat AVHRR adatait szintén napi rendszerességgel veszi 2003 óta, ezért joggal merül fel a saját származtatású AVHRR/NDVI értékekre az igény.

Mivel a légkörön áthaladó sugárzás két fő, hullámhosszfüggő fizikai folyamat (gázmolekulák és aeroszol részecskék általi szórás és elnyelés) gyengítésének van kitéve, ezért az NDVI vegetációs indexet optimális esetben a műholdas szenzor által mért, de légköri korrekción átesett adatokból célszerű előállítani. A légköri korrekció tehát magába foglalja a légkör sugármódosító hatásainak a leválasztását. Kivitelezésére számos eljárás létezik, melyek különböző, a légkör állapotára jellemző információt igényelnek. Ezek közül a legmeghatározóbb a teljes kihullható vízgőz, az 550 nm-re vonatkozó aeroszol optikai mélység (AOD, Aerosol Optical Depth) és a vertikálisan integrált ózon értéke. Tekintve, hogy a felsorolt három meteorológiai jellegű mennyiséget a saját vételi MODIS adatokból is elő tudjuk állítani, ezért azokat alaposabb vizsgálatoknak vetettük alá, hogy eldönthessük, alkalmazhatók-e az AVHRR adatok légköri korrekciójához. Ezenél a mennyiségeknél alapvető jelentőségű, hogy az úrbázisú távérzékelés pótolhatatlan lehetőséget kínál azok nagy térbeli felbontású becslésére.

1. A teljes kihullható vízgőz értékét MODIS adatok alapján két egymástól eltérő módszerrel lehet meghatározni, melyek a szenzor különböző (közeli infravörös és infravörös) csatornáinak adataira épülnek. Ezeket az értékeket alaposan összevetettük egymással és a referenciaként szolgáló rádiószondás adatokból illetve numerikus időjárás előrejelző modellek eredményeiből származó vertikálisan integrált vízgőz értékekkel (Kern et al., 2008; Kern, 2011). Ennek eredményeként elmondhatjuk, hogy a MODIS adatokból származtatott integrált vízgőz értékek

pontossága szinte alig marad el az előrejelző modellek eredményeihez képest. A MODIS alapú vízgőz értékek használatát azok finomabb térbeli felbontása indokolja.

A légköri vízgőz fontosságát hangsúlyozza, hogy a légkör összetevői közül ez a legváltozékonyabb, és kulcsfontosságú szerepet játszik számos folyamat előrejelzésében, mint például a konvekció, csapadék- és felhőképződés. Mivel a légköri vízgőz mennyiségénél fogva domináns üvegházgáz, ezért tér- és időbeli eloszlásáról szerzett információk hozzásegítenek a globális energiaháztartás és vízmérleg megértéséhez.

2. A légköri korrekciós eljárások a vízgőz mellett az aeroszol optikai mélységre a legérzékenyebbek, mely adott légoszlop össz-aeroszoltartalmára vonatkozó dimenziótlan fizikai mennyiség. A limitált tér- és időbeli felbontású felszíni AOD megfigyelések miatt a saját származtatású MODIS AOD értékek validálására nem került sor, ehelyett a nemzetközi szakirodalomra támaszkodva elfogadtuk a származtatott mennyiségek pontosságát, és meghatároztuk az AOD éves átlagos mezőit (Kern, 2011). Mindehhez fontos tudni azt is, hogy az AOD első globális, műholdas adatbázisát MODIS adatokból hozták létre. Ennek oka, hogy ez volt az első olyan szenzor, mely az AOD származtatáshoz szükséges spektrális tartományban (így a kék színhez tartozó $0,47\ \mu\text{m}$ -es hullámhossz körül is) több csatornával lett felszerelve.

Az aeroszol optikai mélység jelentőségét kiemeli, hogy a légköri aeroszol részecskék fontos szerepet játszanak a Föld éghajlati rendszerében, a légkör energiaháztartásában, a felhő- és csapadékképzési folyamatokban. Jelentős bizonytalanságot eredményeznek a klímamodellezésben, hiszen a rövid légköri tartózkodási idejű aeroszol részecskék közvetlenül kölcsönhatásba lépnek a Nap sugárzásával, módosítják a felhők mikrofizikáját, és ezáltal befolyásolják a felhők sugárzási tulajdonságait. A légköri aeroszol részecskék éghajlat-módosító hatását talán a "globális elsötétülés" (global dimming) néven ismertté vált jelenség szemlélteti a legjobban.

3. Bár a légköri korrekciós eljárások a vertikálisan integrált ózon mennyiségére kevésbé érzékenyek, validálási eredményeink hozzájárultak a NASA hivatalos, soron következő 6-os szintű összegyűjtöttségű adataira vonatkozó algoritmusok előállításához (Borbás et al., 2011).

Eredményeink alapján a saját vételű MODIS adatok és a belőlük származtatott produktumok tehát kiválóan használhatók a NOAA/AVHRR adatok légköri korrekciójához. Folyamatos vétel esetén minden nap rendelkezésünkre állnak mind Terra/Aqua áthaladásokból származó MODIS, mind a NOAA meteorológiai műholdsorozat áthaladásaiából eredő AVHRR adatok. A két szenzor adatainak együttes használata azért különleges, mert a kevésbé szofisztikált, de hosszabb múltra visszatekintő AVHRR szenzor adatainak légköri korrekcióját az elérhető MODIS adatokból végezzük el, és így állíthatunk elő NDVI vegetációs idősort.

4.2 NDVI adatsorok előállítása MODIS adatok alapján

NDVI vegetációs adatsorok előállítására természetesen az AVHRR sugárzásmérőnél korszerűbb és fejlettebb MODIS szenzor adataiból is lehetőség van. Ennek alapja a szenzor 1-es ($0,62\text{--}0,67\ \mu\text{m}$) és 2-es ($0,841\text{--}0,876\ \mu\text{m}$) csatornáiban mért $250\text{ m} \times 250\text{ m}$ horizontális felbontású reflektancia. Az NDVI származtatás első lépéseként értelemszerűen itt is az adatok légköri korrekcióját kell elvégeznünk, melyhez a DB adatokra létrehozott ún. MOD_PR09 szoftvercsomagot (Gumley, 2007) használjuk. A szoftvercsomag algoritmusai alapjaiban véve megegyezik a NASA hivatalos MOD09 légkörileg korrigált reflektanciák előállítására szolgáló eljárás 5.3.18-as verziójával, csupán a segédadatokra vonatkozó igények egyszerűsödtek. Használatával a MODIS szenzor 1-es és 2-es csatornáiban mért

reflektanciáiból légkörileg korrigált reflektanciákat kapunk. Ily módon előállított, légkörileg korrigált reflektanciákból meghatározott NDVI mezőt láthatunk példaként a 8. ábrán Magyarország térségére a Terra/MODIS 2012.06.16. 09:50 UTC idejű áthaladás adatai alapján. A képen fehér színnel jelöltük a felhőket és a nyílt vízfelületeket, hiszen az NDVI mezők felhasználása értelemszerűen csak a földfelszínre korlátozódik. Ennek megfelelően az ún. felhőmaszk meghatározása elengedhetetlen lépése az NDVI mezők származtatásának.



8. ábra. Légkörileg korrigált NDVI mező Magyarország térségére a Terra/MODIS 2012.06.16. 09:50 UTC adatai alapján.

A saját származtatású mennyiségek legnagyobb előnye azok eredeti időbeli felbontásában rejlik, hiszen a NASA hivatalos produktumai már nem napi felbontásúak, hanem ún. kompozitok, melyek 16 napos időszakok méréseinek optimális kiválasztása alapján állnak elő. Ilyen a NASA ún. MOD13 produktuma is (Huete et al., 1999; 2002), mely légkörileg korrigált MODIS adatokból származtatott vegetációs indexeket (NDVI és EVI (Enhanced Vegetation Index)) foglal magában. A produktum előállításánál alkalmazott optimális kiválasztás egyaránt kiterjed a megfigyelési- és megvilágítási geometriára, a légkör állapotára és a felhőzet mennyiségére. Ez az eljárás a származtatott adatok minőségének szintjét emeli, azonban elveszti a lehetőségét annak, hogy a 16 napnál rövidebb időskálán bekövetkező változásokot (pl. egy hóhullám hatását) kellő időbeli finomsággal detektálni és jellemezni lehessen.

Az ELTE vevőállomása 2014-re már 9 teljes év MODIS adatát rögzítette, ezáltal lehetőség nyílik a hosszabb időszakra vonatkozó vegetációs vizsgálatokra, így például arra, hogy több év NDVI menetét tanulmányozhassuk. Érdekes kép tárul elénk, ha az éves meneteket Magyarország teljes területére határozzuk meg. Ezt szemlélteti a 9. ábra, ahol Magyarországra vonatkozó felhőmentes MODIS adatok átlagolásával előállított NDVI éves meneteket láthatunk. Az ábrán egyaránt feltüntetésre került (1) a légköri korrekció nélküli nyers reflektanciákból meghatározott NDVI értéke, (2) a légköri korrekción átesett reflektanciákból származtatott NDVI (külön Terra és külön Aqua MODIS adatokra), és (3) referenciaként a NASA MOD13 adataiból számolt átlagos NDVI értéke. Az átlagolásba a felhős képpontokon kívül nem számoltuk bele sem a hóval borított területeket, sem a nyílt vízfelületeket.

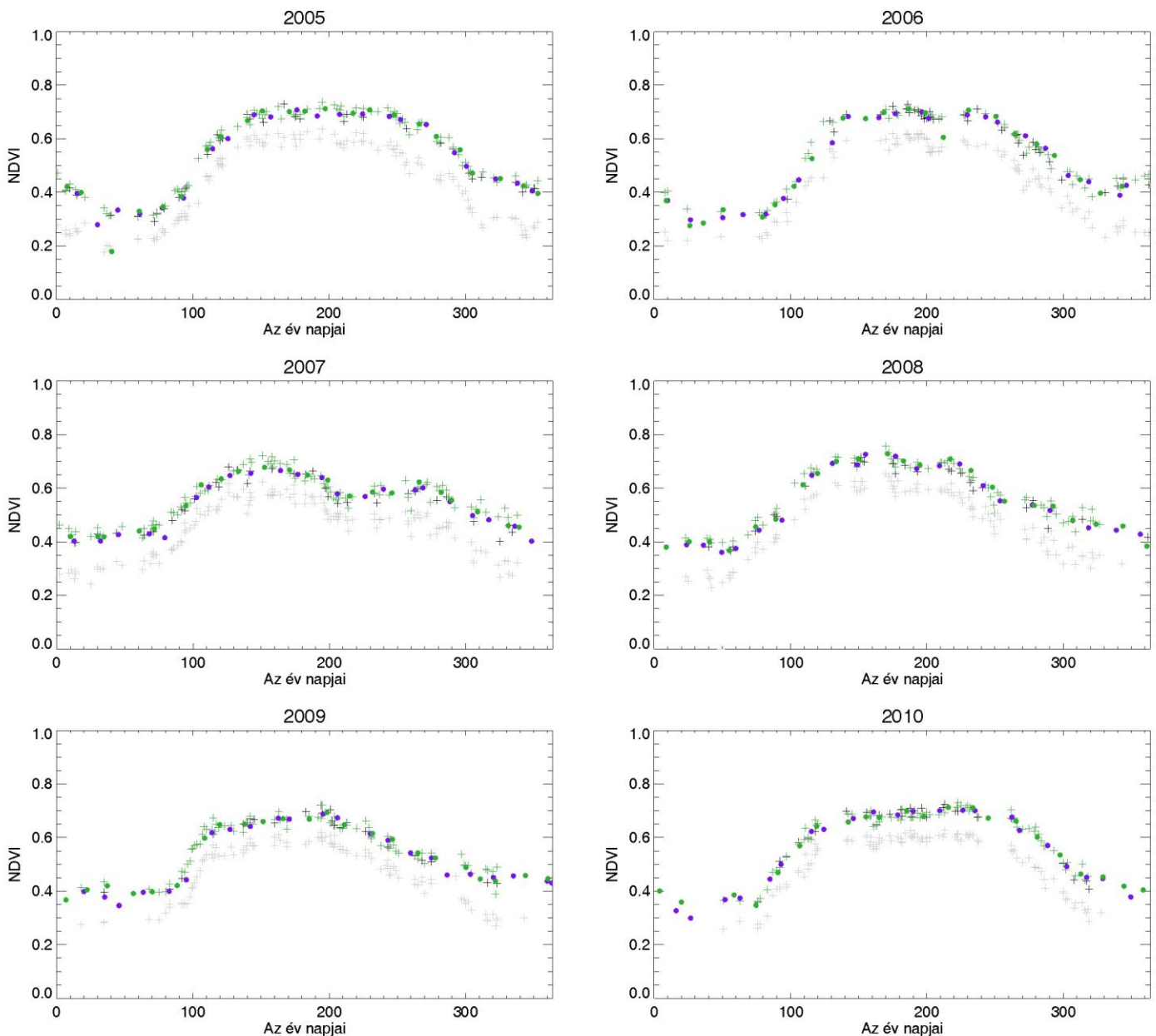
A nyers és a légkörileg korrigált reflektanciák együttes ábrázolásával a légköri korrekció hatása egyértelmű, hisz a két adatsor közötti különbség számottevő. Az alkalmazott légköri korrekciót igazolja az is, hogy a saját vételű és légkörileg korrigált adatokból előállított NDVI éves menete jóval közelebb áll vagy akár teljesen meg is egyezik a NASA MOD13 NDVI éves menetével. Joggal merülhet fel a kérdés: mi okozza az NDVI értékek jól látható szórását? A válasz több tényezős, hisz a

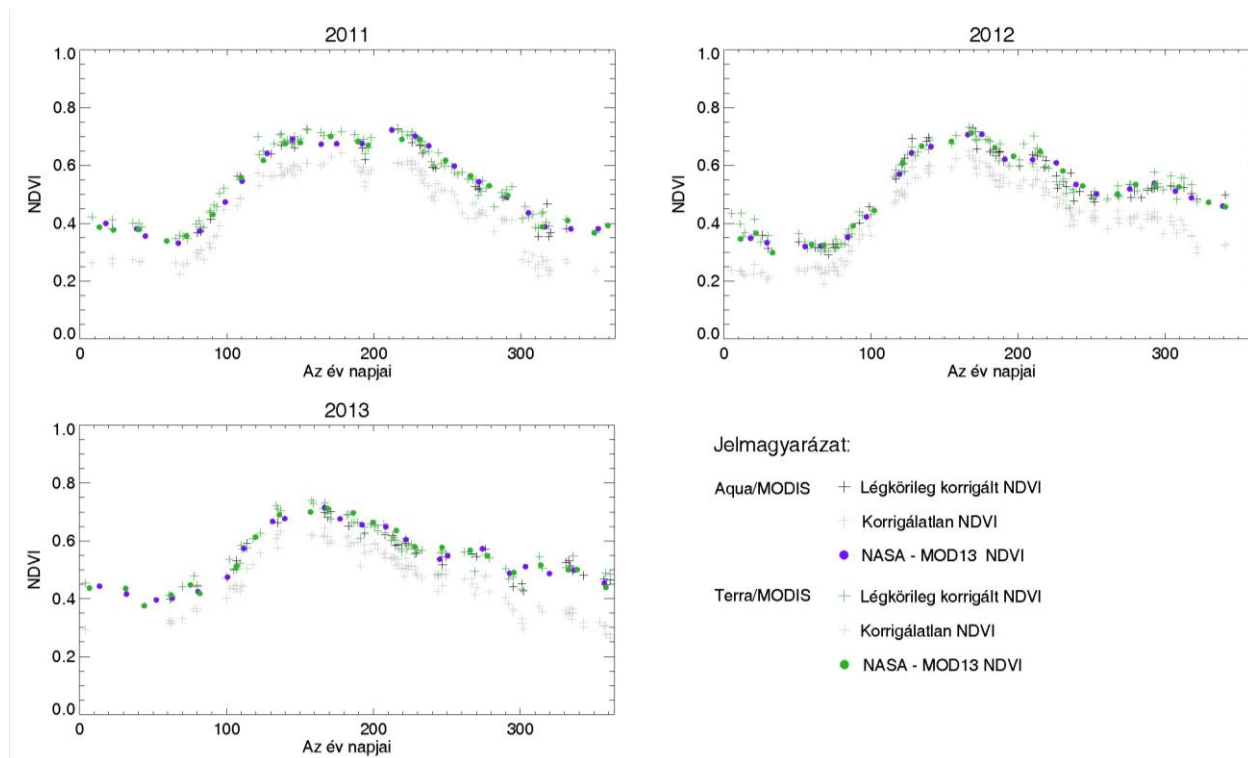
származtatott értékek pontosságát éppúgy meghatározza a felhőszűrés pontatlansága, mint a megfigyelési- és megvilágítási geometriai helyzetek váltakozása, vagy az átlagoláshoz felhasznált felhőszűrt adatok eltérő mennyisége (hisz a felhőzet mennyisége és elhelyezkedése mindig más és más), vagy akár a légköri korrekció pontatlansága. A 9. ábrán bemutatott NDVI menetek azonban már eleve olyan értékekből állnak elő, ahol nem vettük figyelembe sem a 40 foknál nagyobb zenitszögű, sem a 25%-nál kisebb adatlefedettséget biztosító áthaladásokat.

Ennek ellenére az éves menetek határozottan elkülönülnek egymástól és jól tükrözik az adott évre jellemző, a növényzetet leginkább befolyásoló meteorológiai tényezőket és jelenségeket.

Ilyen például a 2007-es júliusi hőhullám illetve a 2012-es nyári hőhullámok hatása, vagy az aszályos 2011-es és 2012-es év eltérő menetei, például az azt megelőző 2010-es csapadékos évhez képest, vagy a 2013-as száraz nyár hatásának megjelenése.

A bemutatott éves menetek meghatározására egyelőre a felszíntípus figyelembevétele nélkül került sor, melynek megfelelően az átlagolásban mindig más arányban szerepelnek a különböző felszíntípusok (erdők, gyepek, mezőgazdasági területek és az egyéb, például lakott/ipari területek). További terveink között szerepel azonban, hogy az egyes felszíntípusokat külön vizsgáljuk.





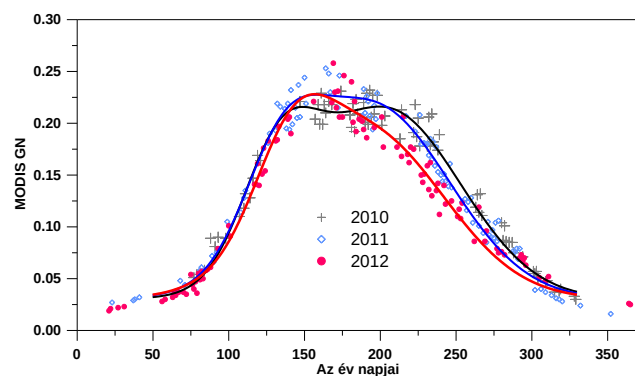
8. ábra. Magyarország éves átlagos NDVI menetei MODIS adatok alapján a 2005-2013 közötti évekre, ahol a szürke + jel az eredeti reflektancia adatok alapján, míg a kék és zöld + jel a légköri korrekción átesett reflektancia adatok alapján meghatározott NDVI értékeket jelöli. A NASA MOD13 NDVI adataiból meghatározott átlagos NDVI értékeket kék és zöld körökkel jelöltük.

4.3 Termésbecslés MODIS adatok alapján

Mivel a MODIS adatok egy adott területről napi rendszerességgel szolgáltatnak információt, ezért kiválóan alkalmasak a növényzet állapotának monitorozására, a bekövetkezett változások detektálására. Ezekhez a megfigyelésekhez a mért reflektancia adatokból vegetációs indexeket állítunk elő, és ezek időbeli alakulását elemezve lehet következtetéseket levonni a növényzet állapotára. A vegetációs indexek közül a legelterjedtebb a korábban már említett NDVI, mely mellett egy másik igen egyszerű indexet, a Greenness (GN) vegetációs indexet is használunk. A GN nem más, mint a MODIS 2-es és 1-es csatornáján mért reflektanciaértékek különbsége.

A GN menetek időbeli lefutása jó indikátora például annak, hogy a növényzet hogyan reagál a nagyobb aszályok idején. Ahhoz, hogy az aszályos és a normál évek közti különbségeket jól nyomon tudjuk követni, érdemes az egyes mért pontokra valamilyen matematikai görbét illeszteni. Ez lehet akár egy egyszerű futóablakos átlagolás, ám a hosszabb felhős időszakok, amikor esetleg több napon keresztül nem rendelkezünk értékelhető adattal, jelentősen befolyásolják ezt a görbét. Ráadásul célszerű inkább olyan függvényt kalkulálnunk, ami a későbbi, kvantitatív számításokat is lehetővé teszi. Olyan matematikai görbét érdemes keresni, ami egyrészt jól nyomon követi a GN értékek növényzet fejlődéséből adódó változásait, másrészt viszont megfelelően kevés becsülendő paraméterrel rendelkezik.

A tapasztalataink azt mutatták, hogy a kettős-Gauss-görbe megfelel a fenti kritériumoknak (Hamar et al., 1995). Ennek segítségével jól nyomon követhető például a 2012-es nagy nyár végi aszály okozta hatás. Ha megvizsgáljuk a 2010-2012 közti időszakot (10. ábra), akkor jól látható, hogy a 2012-es évben a nyár végi GN értékek drasztikusan lecsökkennek, összehasonlítva a korábbi évek adataival.



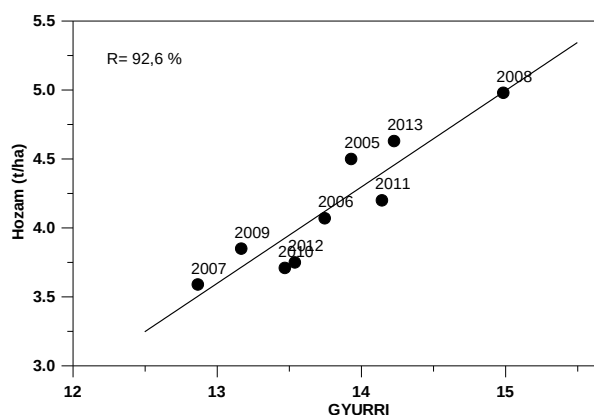
10. ábra. A 2010-2012 közti magyarországi GN értékek a rájuk illesztett kettős-Gauss-görbével (2010: fekete, 2011: kék, 2012: piros).

A mért MODIS adatok nemcsak kvalitatív megfigyelésre, hanem kvantitatív számításokra is, például az egyes szántóföldi haszonnövények terméshozamának becslésére is használhatók. A termésbecslési számításokhoz általában ismerni kell azt, hogy az adott növényt az adott évben pontosan hol termelik. Azonban kutatásaink során azt találtuk,

hogyan lehetséges a megfelelően pontos termésbecslés a vetésterületek elhelyezkedésének ismerete nélkül is. Ennek oka az, hogy egy adott évben a hasonló vegetációs ciklussal rendelkező szántóföldi növények általában hasonló módon fejlődnek. Nemigen fordul elő az, hogy például a kukorica az átlagosnál jóval nagyobb, míg a cukorrépa az átlagosnál jóval kisebb hozamot produkál ugyanabban az évben. Ezen elv alapján dolgoztuk ki az ún. robusztus termésbecslési eljárásunkat (Ferencz et al., 2004), mellyel akár már a betakarítást megelőzően megfelelően pontos hozamelőrejelzés adható (Bognár et al., 2011).

A hozambecslési számításokban először a mezőgazdasági területek felett mért napi GN értékekre a fent említett kettős-Gauss-görbét illesztjük, majd vesszük ennek a görbének két adott nap közti integrálját. E két nap értéke természetesen függ a vizsgálandó növénytől. Ezt az integrál értéket GYURRI-nak (General Yield Unified Robust Reference Index) neveztük el, és ez már közvetlenül kapcsolatba hozható az adott növény terméshozamával.

Legutóbbi kutatásunkban az őszi búza 2005-2013 közötti GYURRI értékeit vetettük össze a terméshozamokkal (11. ábra).



11. ábra. A robusztus termésbecslési eljárás eredményei 2005-2013 között őszi búza esetén. A "Hozam" a Központi Statisztikai Hivatal által közzétett hozamadatokat jelenti.

Az egyes évek GYURRI-hozam pontjaira illesztett egyenes paramétereinek segítségével számolható az adott GYURRI értékhez tartozó becsült hozam, melyek összevethetők a Központi Statisztikai Hivatal (KSH) által közzétett hivatalos hozamadatokkal. Az így módon számolt eredményeket számszerűsítve mutatja az 1. táblázat.

A kapott eredményekben a legnagyobb eltérés 0,24 t/ha, és 6,3%. A becsült és KSH adatok átlagos abszolút eltérése 0,15 t/ha illetve 3,7%. Ez egyrészt azt mutatja, hogy a robusztus termésbecslési eljárás alkalmas nagyterületű hozambecslésre búza esetén, másrészt viszont a módszer további finomítása szükséges annak érdekében, hogy lehetőleg minden évben sikerüljön a becslés pontosságát 5% alá szorítani. Ennek egyik lehetséges útja lehet egy pontos légköri korrekciós eljárás alkalmazása, vagy éppen a negyedóránként rendelkezésre álló METEOSAT adatok integrálása az adatrendszerbe.

Év	Becsült hozam (t/ha)	KSH hozam (t/ha)	Eltérés (t/ha)	Eltérés (%)
2005	4.26	4,50	-0,24	-5,3
2006	4.13	4,07	+0,06	+1,5
2007	3.52	3,59	-0,07	-2,1
2008	5,00	4,98	+0,02	+0,4
2009	3,72	3,85	-0,13	-3,2
2010	3,94	3,71	+0,23	+6,1
2011	4,41	4,20	+0,21	+5,0
2012	3,99	3,75	+0,24	+6,3
2013	4,47	4,63	-0,16	-3,5

1. táblázat. A 2005-2013-as pontokra illesztett egyenes alapján számított becsült hozamadatokat, és ezek eltérése a KSH hivatalos hozamadataitól.

5. Összefoglalás

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem műholddevő állomása 2004 óta biztosít valós idejű multispektrális MODIS adatokat a Kárpát-medence térségéről. Az adatok felhasználása sokrétű, az immár közel 10 évnyi adatsor komplex vizsgálatokat tesz lehetővé, mely Kutatócsoportunkban leginkább a vegetáció monitorozására és a mezőgazdasági növények termésbecslésére terjed ki. A vett adatokra épülő valós idejű (többnyire meteorológiai jellegű) alkalmazások az elmúlt években folyamatosan bővültek, kihasználva a valós idejű adatok jelentőségét. A bemutatott és részletesen leírt alkalmazásokon kívül a MODIS képeket még használhatjuk légszennyezés, természeti katasztrófák (pl. árvíz, belvíz, erdőtüzek) vizsgálatára vagy akár kártevők elterjedésének megfigyelésére is, melyekre egy-egy esettanulmányon keresztül az elmúlt 10 évben már sor került. Tekintve, hogy a két MODIS szenzor várhatóan még legalább 6 évig üzemképes marad, a folyamatosan bővülő adatsor széleskörű alkalmazására további lehetőségek nyílnak.

Köszönetnyilvánítás

Kiemelt köszönet jár a technikai és szakmai segítségükért Kovács Richárdnak, Barcza Zoltánnak, és a Wisconsin-Madison Egyetem kutatói közül Kathleen I. Strabalanak és Liam E. Gumleynak. Segítségük nélkül a MODIS adatok bemutatott feldolgozása és sokszínű alkalmazása nem valósulhatott volna meg. Kutatásainkat a Magyar Űrkutatási Iroda és a Nemzeti Fejlesztési Ügynökség támogatta (URKUT_10-1-2011-0027).

Irodalomjegyzék

Al-Saadi J.A. et al. (2005): Improving National Air Quality Forecasts with Satellite Aerosol Observations, BAMS, DOI:10.1175/BAMS-86-9-1249.

Aune B., Strabala K.I., Lindstrom S., Huang A. (2008): The Direct Broadcast Version of the CIMSS Regional Assimilation System for Global Users, International EOS/NPP Direct Readout Meeting 2008, March 31-April 4, 2008, Bangkok, Thailand. (http://dbmeeting.sci.gsfc.nasa.gov/files2008/DBCRAS_DB2008.ppt)

Bognár P., Ferencz Cs., Pásztor Sz., Molnár G., Timár G., Hamar D., Lichtenberger J., Székely B., Steinbach P., Ferencz O.E. (2011): Yield forecasting for wheat and corn in Hungary by satellite remote sensing. International Journal of Remote Sensing, vol. 32, no. 17, 4759-4767.

Borbás E.É., Seemann S.W., Kern A., Moy L., Li J., Gumley L., Menzel W.P. (2011): MODIS Atmospheric Profile retrieval - Algorithm Theoretical Basis Document, Collection-6, Vers. 7. (Internet elérhetőség: http://modis-atmos.gsfc.nasa.gov/_docs/MOD07_atbd_v7_April2011.pdf)

Davies D., Kumar S., Desclotres J. (2004): Global fire monitoring using MODIS near-real-time satellite data, GIM International, Vol. 18(4), 41-43.

Ferencz Cs., Lichtenberger J., Bognár P., Molnár G., Steinbach P., Timár G. (2003): Satellite receiving station at the Eötvös Loránd University, in Hungary, Geodézia és Kartográfia 55(9): 30-33.

Ferencz Cs., Bognár P., Lichtenberger J., Hamar D., Tarcsai Gy., Timár G., Molnár G., Pásztor Sz., Steinbach P., Székely B., Ferencz O.E., Ferencz-Árkos I. (2004): Crop yield estimation by satellite remote sensing. International Journal of Remote Sensing, vol. 25, no. 20, 4113-4149.

Giglio L., Desclotres J., Justice C.O., Kaufman Y.J. (2003): An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS, Remote Sensing of Environment, Vol. 87, 273-282.

Gumley E.L., Desclotres J., Schmaltz J. (2003): Creating Reprojected True Color MODIS Images: A Tutorial. (ftp.ssec.wisc.edu/pub/IMAPP/MODIS/TrueColor/MODIS_True_Color.pdf)

Gumley E.L. (2011): MODIS Land Surface Reflectance (MOD_PR09) for Direct Broadcast. (Internetes elérhetőség: <ftp://ftp.ssec.wisc.edu/pub/IMAPP/MODIS/hidden/mod09/README.txt>)

Gumley E.L., Evan A. (2009): Direct Broadcast Google Earth. (http://cimss.ssec.wisc.edu/imapp/dbge_v1.2.shtml)

Hamar D., Ferencz Cs., Lichtenberger J., Tarcsai Gy., Ferencz-Árkos I. (1995): A kukorica és búza termésátlagának meghatározása műholdas adatokból az Alföldön. Növénytermelés, 44, no. 2, 147-160.

Huang H.-L., Gumley L.E., Strabala K.I., Li J., Weisz E., Rink T., Baggett K.C., Davies J.E., Smith W.L., Dodge J.C. (2004): International MODIS and AIRS processing package (IMAPP): A direct broadcast software package for the NASA Earth Observing System, Bull. Amer. Meteor. Soc., 85, 159-161.

Huete A., Justice C., Leeuwen W.V. (1999): MODIS Vegetation Index - MOD13. Algorithm Theoretical Basis Document. (Internet elérhetőség: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod13.pdf)

Huete A., Didan K., Miura T., Rodriguez E.P., Gao X., Ferreira L.G. (2002): Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. Remote Sens. Environ., 83, 195-213.

Justice C.O., Giglio L., Korontzi S., Owens J., Morisette J.T., Roy D., Desclotres J., Alleaume S., Petitcolin F., Kaufman Y. (2002): The MODIS fire products, Remote Sensing of Environment, Vol. 83, 244-262.

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, 41/11, 1933-1945. doi:10.1016/j.asr.2007.06.04.

Kern A. (2011): NDVI vegetációs index előállítás a távérzékelés AVHRR és MODIS adatok alapján. Doktori értekezés. Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Földtudományi Doktori Iskola. Témavezető: Dr. Bartholy Judit. 148 o.

King M.D., Kaufman Y.J., Menzel W.P., Tanré D. (1992): Remote sensing of cloud, aerosol, and water vapor properties from the Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS), IEEE Transactions On Geoscience And Remote Sensing, 30, 1-27.

Strabala K.I., Gumley L.E., Rink T., Huang H.-L., Dengel R. (2003): MODIS/AIRS instrument direct broadcast products and applications, AMS 12th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, 13 p.

Strabala K.I., Gumley L.E., Rink T., Huang H.-L., Davies J., Weisz E., Baggett K., Friedman S., Manning E., Nguyen Q.D. (2004): The international MODIS/AIRS processing package (IMAPP): Terra and Aqua direct broadcast processing and applications, AMS 13th Conference on Satellite Meteorology and Oceanography, Norfolk, VA, 20-23 September 2004 (preprints). American Meteorological Society, Boston, MA, 2004, Paper P1.17. Call Number: Reprint # 3783.

Timár G., Ferencz Cs., Lichtenberger J., Kern A., Molnár G., Székely B., Pásztor Sz. (2006): MODIS-adatvétele az ELTE műholdvevő állomásán. Geodézia és Kartográfia, 58. 11-14. ISSN 0016-7118.