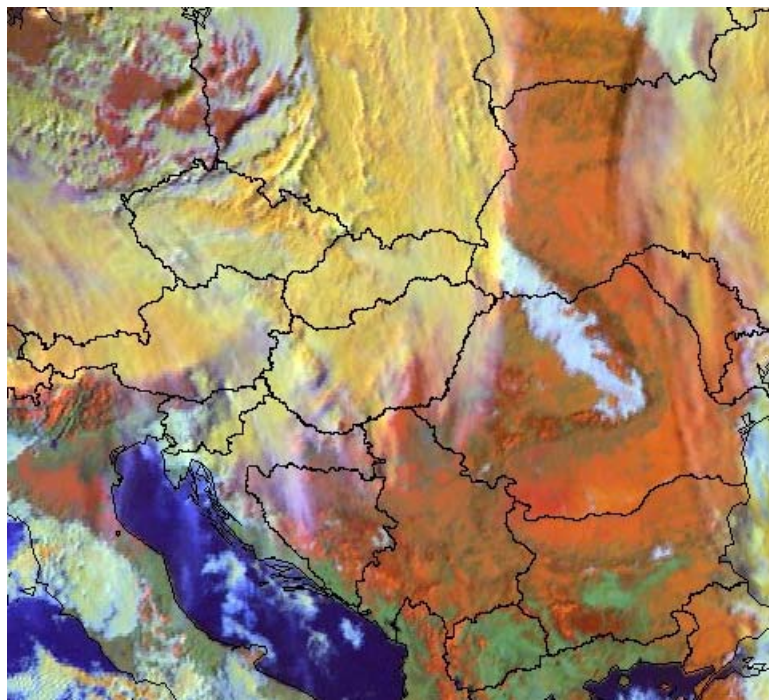


35. Meteorológiai Tudományos Napok

MŰHOLDMETEOROLÓGIA



ISBN 978-963-9931-09-3

2009

Tartalomjegyzék

<i>Tartalomjegyzék</i>	2
<i>Bevezető gondolatok</i>	3
<i>Tánczer Tibor</i>	3
<i>A műholdmeteorológia jelene és jövője</i>	5
<i>Putsay Mária</i>	5
<i>MODIS adatok vétele és feldolgozása az ELTE-n</i>	9
<i>Kern Anikó, Bartholy Judit, Ferencz Csaba</i>	9
<i>Az időjárás előrejelzési tevékenység támogatása műholdas információkkal</i>	13
<i>Gróbné Szenyán Ildikó, Putsay Mária és Kocsis Zsófia</i>	13
<i>Zivatarok megfigyelése műholdadatok segítségével WV képek elemzése</i> <i>potenciális örvényességi mezőkkel</i>	17
<i>Simon André és Putsay Mária</i>	17
<i>Műholdképek használata a hazai szinoptikus gyakorlatban</i>	22
<i>Kolláth Kornél</i>	22
<i>A műholdak szerepe a numerikus időjárás-előrejelzésben</i>	27
<i>Randriamampianina Roger</i>	27
<i>Műholdas adatok használata az OMSZ rövidtávú numerikus előrejelző rendszerében</i>	31
<i>Böloni Gergely</i>	31
<i>Az infravörös földfelszíni emisszivitás hatása a műholdas és a numerikus modell</i> <i>alkalmazásokra</i>	35
<i>Borbás Éva, B. Ruston, S.W. Seemann, R. Knuteson, R. Saunders, and A. Huang</i> ..	35
<i>Műholdakról történő levegőkémiai mérések</i>	36
<i>Kocsis Zsófia</i>	36
<i>A műholdadatok felhasználási lehetőségei a hazai levegőkémiai kutatásokban</i>	40
<i>Baranka Györgyi</i>	40
<i>Háromdimenziós jelenségek a műholdas felhő megfigyelésekben</i>	44
<i>Várnai Tamás</i>	44
<i>Tűzdetektálás műholdas megfigyelésekből</i>	48
<i>Csiszár Iván</i>	48
<i>A földfelszín és a növényzet megfigyelése műholdakról</i>	52
<i>Fassang Ágnes, Kocsis Zsófia, Kern Anikó, Barcza Zoltán, Bartholy Judit,</i> <i>Pongrácz Rita</i>	52
<i>A városi hősziget vizsgálata MODIS és ASTER mérések felhasználásával</i>	53
<i>Dezső Zsuzsanna, Bartholy Judit, Pongrácz Rita</i>	53
<i>Városi hőszigeteki mező modellezése légi felszínhőmérsékleti mérések alapján</i>	57
<i>Unger János, Gál Tamás, Rakonczai János, Mucsi László, Szatmári József,</i> <i>Tobak Zalán, Boudewijn van Leeuwen, Fiala Károly</i>	57
<i>Műholdadatok alkalmazása a hidrológiában és az éghajlatkutatásban</i>	61
<i>Lábó Eszter</i>	61

Bevezető gondolatok

Tánczer Tibor

1029 Budapest, Gyöngyvér utca 11., e-mail: tanagi@t-online.hu

Összefoglaló – Az idei tudományos napok témája műholdmeteorológia, a meteorológiának fiatal területe. Már csak néhány hónap választ el az első meteorológiai műhold a TIROS 1 felbocsátásának 50. évfordulójától. Így ezt az ülésszakot e jubileum megünneplésének tekinthetjük. Bizonyára világszerte megemlékeznek e jeles eseményről. Ezek sorában minden bizonnyal első e hazai rendezvény. Az előadás vázlatos áttekintése a műholdak fél évszázados történetének és a hazai műholdmeteorológiai tevékenységnek.

A meteorológiai műholdak megjelenése, megfigyelései és fejlődésének főbb állomásai

A meteorológiai műhold megjelenése a szenzáció erejével hatott a meteorológus társadalomra. Először vált lehetővé, hogy a meteorológus az időjárást, pontosabban az azt kísérő felhőrendszereket területi folytonosságában, globális méretekben lássa. A műholdfelvételeken megelevenedtek a ciklonok, az időjárási frontok, a jetek felhőrendszerei, amelyekről korábban a szórványos földi észlelésekről csak hozzávetőleges elképzeléseink lehettek. A műhold fedélzetére telepített sugárásmérő műszerekkel a Föld-légkör rendszer sugárzási mérlegének minden eddiginél pontosabb meghatározása vált lehetségessé. Megvalósult a légkör műholdas függőleges szondázása. Óriási vívmány volt ez, különösen, ha arra gondolunk, hogy a tenger borította területekről, de sokszor a szárazföldről is csak nagyon hézagos ismeretekkel rendelkeztünk.

Alig telt el néhány esztendő, s megjelentek a geostacionárius meteorológiai műholdak, melyek most már a megfigyelések területi folytonossága mellett azok időbeli folytonosságát is biztosították. Nem egészen két évtizeddel a TIROS 1 felbocsátása után, az első globális légkörkutató program (GARP) idejére öt geostacionárius és két kvázipoláris műhoddal az egész földi felhőtakaró, és ezen keresztül az időjárás, a meteorológusok állandó ellenőrzése alá került, és ez az állapot azóta is fennáll.

A műholdak, élve a Föld-légkör rendszer elektromágneses spektruma által felkínált lehetőségekkel, az információk olyan széles skáláját sugározzák a földre jó felbontással, digitális formában, hogy azok ma már a meteorológiának szinte minden területén felhasználást nyernek. Bizonyítja ezt a kétnapos előadássorozat.

A meteorológiai műholdak első három évtizedéről részletes leírás található Tánczer (1988) munkájában.

A hazai műholdmeteorológiai tevékenység fejlődése

Két évvel a TIROS 1 fellövése után már volt a témának hazai referense. 1966 végén bocsátották fel kvázipoláris pályára az első operatív műholdsorozatot az ESSA-t. A sorozat páros számú tagjai a felvételeket azonnal kisugározták, így megnyílt a lehetőség azok közvetlen vételére. 1967 nyarán a Műszaki Egyetem Úrkutatói Csoportjának már sikerült vennie a műholdról érkező felhőképeket. Néhány hónap múlva elkészült

saját fejlesztésű vevőállomásunk, amely a pestszentlőrinci Aerológiai Observatóriumban nyert elhelyezést. Az ESSA holdak vétele mellett már bekapcsolódhattunk az Amazonas torkolata fölé fellőtt, tőlünk mindössze 7 fokos magassági szögben látszó ATS-3 geostacionárius műhold kísérleti vételi programjába is. 1968-tól kezdve már szolgáltatászerűen folyt a vétel. Két évtized alatt mintegy 30 ezer felvételt vettünk le és archiváltunk. A képek bevonultak az előrejelző szolgálatokba, és idővel megjelentek a TV-ben a nagyközönség tájékoztatására.

A műhold- és számítástechnikában bekövetkezett fejlődéssel sikerült többé-kevésbé lépést tartanunk. Egy már használaton kívüli CII számítógép üzemképessé tételével az analóg felvételeket digitalizálva lehetővé vált a felhőzet magasabb fokú vizsgálata, felhőfajta megállapítása, felhőtető hőmérsékletének kijelzése, a METEOSAT műhold egymás utáni felvételeiből a felhőzeti mező időbeni változását megjelenítő ún. hurrokfilmek szerkesztése. Hatalmas előrelépést jelentett, amikor a 80-as évek végén a Műszaki Egyetem által konstruált digitális vevővel és a hozzá kapcsolódó BASF számítógép segítségével már hozzájuthattunk az eredeti digitális információkhoz. A műholdadatok meghatározó tényezővé váltak az időjárás előrejelzésében. Jelentős eredmények születtek a műholdadatokra épülő kutatások terén. Néhány évtized alatt több száz dolgozat jelent meg e témában, számos tanulmány külföldi kiadványban.

A vétel- és feldolgozás-technikában közreműködő szakembereink áldozatos munkájának köszönhetően megnyílt a lehetőség a műhold-információk széleskörű felhasználásának, mind operatív vonalon, mind a kutatásban. Így a rendszerváltozás után technikai vonatkozásban és elméleti felkészültség terén is minden adottságunk megvolt ahhoz, hogy csatlakozzunk a Meteorológiai Műholdak Hasznosításának Európai Szervezetéhez, az EUMETSAT-hoz. Miután a magyar állam a szükséges anyagiakat biztosította, 1999-ben társult, majd a közelmúltban teljes jogú tagjává váltunk a szervezetnek. Ezzel új távlatok nyíltak meg a kutatóink előtt, bekapcsolódhatnak a nemzetközi együttműködés keretében folyó legszínvonalasabb műholdmeteorológiai kutatásokba. Az előadások során e kutatásokról is áttekintést kapunk.

A hazai műholdmeteorológia történetéről bővebben *Mezősi* (1970) és *Tánczer* (1995) munkájában olvashatunk.

Irodalomjegyzék

Mezősi M., 1970: Meteorológiai mesterséges holdak felhőképeinek vétele. In: Fejezetek a magyar meteorológia történetéből. *OMSZ, Budapest.*

Tánczer T., 1988: Műholdmeteorológia. *Akadémiai Kiadó, Budapest.*

Tánczer T., 1995: Műholdmeteorológia. In: Fejezetek a magyar meteorológia történetéből. *OMSZ, Budapest.*

A műholdmeteorológia jelene és jövője

Putsay Mária

Országos Meteorológiai Szolgálat, Előrejelzési és Éghajlati Főosztály
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1, e-mail: putsay.m@met.hu

Összefoglaló – A cikk az európai műholdas tevékenységek ismertetésére koncentrál, ezen belül is az operatív meteorológiai műholdak adatainak jellegére, felhasználási területeire. Ismerteti az EUMETSAT főbb műholdcsaládjait, összehasonlítva a mérések elveit, jellegét. Ismerteti az EUMETSAT következő generációs műholdcsaládjainak terveit. Mind a geo-, mind a napszinkron műholdak meg fognak újulni. A harmadik generációs METEOSAT (MTG) fellövését 2016-re tervezik. Az MTG ikerműholdakon a továbbfejlesztett leképező berendezés mellett villámszámláló, (hőmérséklet és nedvesség profilok mellett szél profil meghatározására is alkalmas) infravörös szondázó, és a levegő kémiai összetevőit (rövidhullámon) mérő berendezés is helyet fog kapni. Az európai operatív poláris műholdcsalád (EPS/MetOp) utódját, a Post-EPS műholdcsaládot is tervezik már. Még a jövő titka, hogy a tervezett 19 műszerből az anyagi lehetőségek hány berendezés megvalósítását teszik majd lehetővé. A műszerek túlnyomó többsége szondázó berendezés lesz. Néhány műszer nemcsak sugárzásintenzitást, hanem polarizációt is fog mérni. A poláris műholdon számos olyan mérést fognak végezni, amit geostacionárius pályáról nem, vagy csak jóval pontatlanabban lehet mérni.

EUMETSAT és Magyarország

Az EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites) egy európai szervezet, amely megtervezi, felépítteti, fenntartja, működteti a meteorológiai műholdak európai rendszerét, és a nyert információkat az időjárás, az éghajlat és a környezet folyamatos megfigyelése céljára hasznosítja.

A felhasználók megkapják az (aktuális és archív) nyers adatokat. Az EUMETSAT több nemzetközi munkacsoportot (SAF, Satellite Application Facility) is szervezett, azzal a céllal, hogy a nyers adatokból légköri jellemzőket, mennyiségeket (produktumokat) származtassanak. A felhasználók vagy a produktumokat kapják meg, vagy az előállító szoftvereket. Magyarország az EUMETSAT szervezet tagállama. Az OMSZ a fejlesztő munkában is részt vesz és felhasználó is.

Jelenlegi műholdakról dióhéjban

Az EUMETSAT jelenleg három műholdcsaládot működtet: a geostacionárius, második generációs METEOSAT műholdcsaládot; a napszinkron MetOp műholdat és az alacsony pályájú Jason műholdat.

A geostacionárius (geoszinkron) műholdak igen közkedveltek meteorológiai célokra, mert - állandóan ugyanazon egyenlítői pont felett tartózkodva - időben gyakori képeket készítenek a féltekéről. A felhőalakzatok változásai jól nyomon követhetők segítségükkel. A területi felbontásuk (és/vagy a csatornák spektrumszélessége) viszont relatíve kicsi (nagy), hisz messze keringenek a Földtől. A nagy távolság miatt bizonyos fajta méréseket nem lehet geoszinkron pályáról végezni.

A második generációs **METEOSAT** műholdon a SEVIRI (Spinning Enhanced Visible and InfraRed Imager) operatív leképező műszer 15 percenként, 12 csatornában

készíti a képeket, 1-3 km-es horizontális felbontásban. A még nagyobb időbeli felbontás érdekében a tartalék műhold (az Atlanti-Európa térségről) 5 percenként készít képeket. Az adatokból sokféle származtatott mennyiség, légköri jellemző számolható (pl. felszínhőmérséklet, felhőfajta, instabilitási index stb.), amelyek igen hasznosak önmagukban is vagy numerikus programok bemenő adataiként is. A vizuális kiértékelésre az EUMETSAT különböző célokra optimalizált, kompozit képeket (több csatorna együttes megjelenítése) fejlesztett ki. Ezek nagyon hasznosak az előrejelzők munkájában.

A **MetOp** Európa első napszinkron műholdja. 1 leképező, 6 (infravörös és mikrohullámú tartományú) szondázó és 1 aktív mikrohullámú műszerrel végzi a légkör megfigyelését.

A napszinkron műholdak időben sokkal ritkábban végeznek méréseket egy-egy adott területről, mint a geoszinkron műholdak, de sokkal közelebből. Napszinkron pályáról olyan méréseket is lehet végezni, amelyeket geoszinkron pályáról nem lehet, illetve eddigi technikai színvonalon nem lehetett. Ilyen például a légköri szondázás. Ennek során igen keskeny spektrumtartományokban kell mérni. Ezen mérésekből légköri profilokat, hőmérséklet és nedvesség függőleges eloszlását, illetve légköri nyomgázok profiját vagy függőlegesen integrált össz mennyiségét lehet számítani. Napszinkron pályáról mérhető a Föld által kibocsájtott mikrohullámú sugárzás is, illetve aktív mérések is végezhetőek.

Példaként megemlítünk három műszert. A AISI (Infrared Atmospheric Sounding Interferometer) műszer egy igen fejlett, pontos szondázó műszer. Gyakorlatilag folyamatos spektrumot mér az infravörös tartományban. Az ASCAT (Advanced Scatterometer) egy mikrohullámú tartományban mérő aktív műszer. Segítségével az óceánok felszínén szélvektorok származtathatóak a felhőkön keresztül is. Szárazföld felett pedig a talaj felső 'hártájának' nedvesség-tartalmát lehet megmérni vele. A GOME (Global Ozone Monitoring Experiment) műszert a légkör kémiai összetevőinek mérésére fejlesztették ki, pl. a függőleges légoszlop ózon és nitrogén-dioxid tartalmát lehet megmérni vele, valamint aeroszol tartalomra jellemző indexet. A műszer visszavert napsugárzási spektrumokat mér.

A **Jason** műszereit a jégmentes óceánok megfigyelésre fejlesztettek ki. A 'Altimeter' nevű aktív radar műszer pontos és folyamatos adatokat szolgáltat a tengerszint magasságáról: hullámok magassága; szélesebség; tengeráramlások helye, iránya, sebessége; tengerfelszíni anomáliák; hosszú távon a tengerszint emelkedése, stb.

A következő generációs EUMETSAT műholdak: MTG, Post-EPS

A harmadik generációs METEOSAT (**MTG**) műholdak 'duál műholdak' lesznek: az MTG-I 'leképező' műholdon 2 képkészítő, míg az MTG-S 'szondázó' műholdon 2 szondázó berendezések kap majd helyet. Az első MTG-I és -S műholdak várható felbocsátása 2016-ben és 2019-ban lesz. A műszerek tervezését befejezték, már építik a műszereket.

A **FCI** (Flexible Combined Imager) készíti majd a képeket, kétféle üzemmódban fog működni. A teljes földkoronról 10 percenként készít majd képet 16 sávban: a 8 rövidhullámú sávban 1 km-es felbontásban, míg a 8 hosszuhullámú sávban 2 km-es felbontásban. 'Rapid Scan' üzemmódban pedig Európáról 2.5 percenként készít majd

képeket, ráadásul 2 rövidhullámú és 2 hosszúhullámú sávban kétszeres területi felbontásban (0.5 és 1 km). Mint láthatjuk, megnő a képek időbeli és horizontális felbontása. Ezáltal egyre jobban lehet majd követni a gyors és kis méretű folyamatokat, pl. a zivatarok fejlődését. A rövidhullámú tartományban újabb sávokat is terveznek. Természetes színű kompozit képeket lehet majd készíteni. Lehetővé válik a földközeli rétegek vízgőztartalmának számítása, változásainak nyomon követése (nedvesség advekción). A felhőtető mikrofizikáját hatszor jobb horizontális felbontásban vizsgálhatjuk majd. Az aeroszolok felhőképződésre gyakorolt hatását is pontosabban vizsgálhatjuk majd. Kiseb méretű tüzeket, ködfoltokat lehet majd felismerni.

A **LI** (lightning Imager) egy optikai villámdetektáló berendezés, melynek időfelbontása folyamatos lesz. A felhő-felhő és a felhő-föld villámokat nem tudja majd egymástól megkülönböztetni, de mind a két fajta villámot detektálja majd.

Az **IRS** (infravörös szondázó) berendezés, folyamatos spektrumot mér az infravörös tartományban. A műszer fő célja szél, hőmérséklet és nedvesség profilok előállítása. Derült területen teljes profilt lehet majd előállítani, míg borult területen csak a felhők felett. Időbeli felbontás 30-60 perc lesz. A profilok tervezett horizontális és vertikális felbontását illetve pontosságát az 1 táblázat tartalmazza. Egyes nyomgázok (pl. O₃, CO) mennyisége is számolható lesz az IRS adatokból.

Az **MTG** lesz az első geoszinkron műhold, amelyre szondázó berendezést is tesznek, méghozzá egy fejlett, modern berendezést, a MetOp-on levő AISA műszerhez hasonló. A geoszinkron pályáról történő szondázás lehetővé teszi a profilok időben gyakori előállítását. Az IRS profilokat a numerikus időjárás előrejelzésben (NWP), a nowcasting-ban és a levegőkémiában is használni fogják. Adatokat szolgáltat majd a regionális és nagyfelbontású, km-es skálájú, nem-hidrosztatikus (zivatar) NWP modellek részére. Támogatja a nowcasting-ot és rövidtávú előrejelzést (három-dimenziós szél, hőmérséklet és nedvesség mezőkkel, illetve az ezekből származtatott egyéb információkkal, pl. nedvességi konvergencia, konvektív instabilitás), ezáltal segítve a riasztásokat is, pl. zivatarkezdés helye és intenzitása. Segíteni fogja a levegőminőség megfigyelését és előrejelzését is: direkt módon a troposzférikus CO és O₃ mérésekkel (határreteg felett), valamint indirekt módon is, ugyanis a levegőminőség előrejelzésének pontossága nagymértékben függ a lokális mezoskálájú meteorológiai jelenségek előrejelzésének pontosságától.

Az **UVN** (Ultraibolya látható és közeli infravörös tartományú szondázó) célja: légköri aeroszolok, nyomgázok mennyiségének, profiljának meghatározása. Az adatok felhasználása elsősorban a levegőkémiai numerikus modellekben történik majd.

	Horizontális felbontás	Vertikális felbontás	Pontosság
Hőmérsékleti profil	4-6 km	1 km	1 K
Nedvesség profil	4 km	1-2 km	5-10%
Szél profil	30-60 km	1 km	~2m/sec

1. táblázat. Az IRS műszer adataiból származtatott profilok és jellemzőik

Az európai operatív poláris műholdak (EPS/MetOp) utódja, a **Post-EPS** műholdcsalád lesz. A Post-EPS műholdakat 2018-ban és 2020-ban fogják fellőni. Az amerikai NOAA műholdak utódjaival alkotnak majd közös rendszert.

Jelenleg a műszerezettség tervezése folyik. Előzetesen összegyűjtötték a felhasználók igényeit, elképzeléseit arról, hogy milyen típusú műszereket tartanak fontos-

nak a Post-EPS-re. Majd elkészítették az ún. ‘hiány analízist’, abból a célból, hogy összegyűjtsék, mely fontosnak tartott mérésekből nincs elegendő. Ezután az EUMETSAT felállította a felhasználók által megálmodott műszerek prioritás listáját, melynél a fő alkalmazási területek kaptak egy-egy fontossági számot, ezen kívül figyelembe vették a hiány analízis eredményeit is, és azt is, hogy a korábbi mérések folyamatosságát biztosítani tudják majd.

Numerikus időjárás előrejelzés	4
Nowcasting	2
Éghajlat megfigyelés	2
Levegőkémia	1
Óceonográfia	1
Hidrológia	1
EPS mérések folytonossága	1

2. táblázat. Az alkalmazási területek ‘fontossági’ számai

A poláris műholdaknál a numerikus előrejelzés felhasználási terület a legfontosabb, míg a geostacionárius műholdaknál a nowcasting. Ennek oka az, hogy a geoszinkron műholdak nagy előnye az időbeli folytonosság, míg a napszinkron pályán keringő műholdak fő célja a különböző szondázások, amelyek a légköri profilokat szolgáltatják: hőmérsékleti, nedvesség, szél, nyomgázok. Ez utóbbiakra a numerikus modelleknek van nagy szükségük.

Megjegyezzük, hogy egyre inkább bevonódnak az eddig kutató-fejlesztő műszerek az operatív kategóriába. Az operatív műholdakon is egyre több aktív műszer kap majd helyet. (Passzív távérzékelési műszer az, amelyik természetes eredetű sugárzást mér, pl. napsugárzást, ill. a Föld hőmérsékleti sugárzását. Az aktív műszer maga bocsájtja ki azt az impulzust, amelynek a visszaverődését méri, pl. radar, lidar.) Az aktív műszerek drágábbak, nehezebbek és sérülékenyebbek, viszont számos esetben jobb, pontosabb mérési eredményt szolgáltatnak.

A műszerek neveit, mérési elveiket és fő felhasználási területeiket helyhiány miatt nem részletezzük. A 19 megálmodott műszerből talán 10-12 kerül megvalósításra: infravörös és mikrohullámú, valamint rádió okklúziós szondázó berendezések; látható és infravörös tartományú leképező berendezés; olyan leképező berendezés, amely több irányból, több sávban polarizációt és intenzitást is mér; mikrohullámú leképező berendezések; a levegő kémiai összetételét mérő ultraibolya, látható és infravörös tartományú spektrométerek; scatterométer.

Irodalomjegyzék

Presentations on the EUMETSAT 6th MTG Mission Team Meeting

http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites/Future_Satellites/Meteosat_Third_Generation/MTG_MMT_6

Presentations on the EUMETSAT 3rd MTG Mission Team Meeting

http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites/Future_Satellites/Meteosat_Third_Generation/MTG_UCW_3

Presentation on the EUMETSAT 2nd Post-EPS User Consultation Workshop

http://www.eumetsat.int/Home/Main/What_We_Do/Satellites/Future_Satellites/Post-EPS/PEPS_UCW_2

MODIS adatok vétele és feldolgozása az ELTE-n

Kern Anikó^{1,2}, Bartholy Judit^{1,2}, Ferencz Csaba³

¹ Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz-Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A, e-mail: anikoc@nimbus.elte.hu, bari@ludens.elte.hu

² Magyar Tudományos Akadémia, Alkalmazkodás a Klímaváltozáshoz Kutatócsoport
1118 Budapest, Villányi út 29-43.

³ Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz-Földtudományi Intézet, Geofizikai Tanszék
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A, e-mail: csaba@sas.elte.hu

Összefoglalás – A műholdak által mért és szolgáltatott adatok jelentősége egyre nő a légköri és a felszíni megfigyelések rendszerében. Az amerikai NASA (National Aeronautics and Space Administration) által létrehozott MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) szenzor egy 36 mérési csatornával kialakított kétoldalú forgótükros sugárzásmérő műszer. Méréseit 0,412 μm és 14,235 μm között végzi, melyek horizontális felbontása 250, 500 illetve 1000 méter. Két kvázipoláris napszinkronpályájú EOS (Earth Observing System) műhold fedélzetén került elhelyezésre: a Terrán (1999) és az Aquán (2002). 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 közelítően 2330 km széles megfigyelési sáv segítségével a két műholdon elhelyezett szenzorok együttesen naponta majdnem teljes globális lefedettséget biztosítanak. Számos alapvető, hivatalos MODIS produktum kerül folyamatosan előállításra a NASA-nál, melyek jól dokumentáltak, validáltak, és szigorú minőségellenőrzésen esnek át. A hordozó műholdak közvetlen adattovábbító-rendszerrel is rendelkeznek, mely megfelelő vevőberendezés esetén lehetőséget biztosít a MODIS adatok közvetlen vételére is. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem műholdvevő-állomása 2004 óta MODIS adatokat is vesz, melyek feldolgozását az Űrkutató Csoport és a Meteorológiai Tanszék végzi. Az előállított környezetfizikai produktumok előnye a hivatalos produktumokhoz képest, hogy azonnal elérhetők és jobb időbeli felbontással rendelkeznek. A hivatalos produktumok és az általunk számított paraméterek együttes feldolgozásával, elemzésével átfogóbb képet kaphatunk a környezetünket, s a régió éghajlatát érintő változásokról.

Bevezetés

A Terra és Aqua műholdakon lévő MODIS (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) szenzorok immár 10 éve végzik folyamatosan finom felbontású multispektrális méréseiket, mely a kvázipoláris műholdak operatív élettartamához képest tekintélyes kornak számít. A műszerrel szemben támasztott igények egy nagy sugárzási érzékenységgű, precíz georegisztrálású és magas kalibrációs pontosságú szenzor létrejöttéhez vezettek, mely alapvetően meghatározza a származtatható környezetfizikai mennyiségek minőségét (King *et al.*, 2002). A szenzort tervező csapat korábbi műholdak tapasztalatait is figyelembe véve építette ki az elméleti alapot a nagyszámú, tudományos célokra használható produktumok származtatására (Savtchenko *et al.*, 2004). Harmadik MODIS szenzor felbocsátására ugyan már nem fog sor kerülni, de a meglévő két szenzor előreláthatóan még több évig üzemképes marad.

Az ELTE vevőállomás és az adatok feldolgozása

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem (ELTE) Űrkutató Csoportja által 2002-ben telepített műholdvevő állomás (Ferencz *et al.*, 2003, Bognár *et al.*, 2005) 2004-ben

jelentős fejlesztésen esett át, melynek következtében az új, 3,2 méter átmérőjű antennával az amerikai Terra és Aqua műholdak finomfelbontású, multispektrális MODIS adatainak közvetlen ún. DB (Direct Broadcast) vételére is lehetőség nyílt (Kern *et al.*, 2005; Timár *et al.*, 2006). Ezzel a vevőállomás a térségben egyedivé vált.

A vevőállomás által vett MODIS adatok alapján az ún. 2. szintig lehet előállítani a produktumokat. Első lépésként a teljesen nyers, műholdról érkezett mérési adatáramot kell kalibrált és georeferált fizikai mennyiségekké, radianciákká és földrajzi koordinátákká alakítani. Az előfeldolgozáson átesett 1-es szintű MODIS adatokból állítjuk elő a légkörre vonatkozó származtatott mennyiségeket (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, 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, SST (Sea Surface Temperature), stb.

A saját vételű MODIS adatok felhasználási területei

A saját vételű MODIS produktumok közül a teljes kihullható vízgőz és az 550 nm-re vonatkozó aeroszol optikai mélység kiválóan használható a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) meteorológiai műholdak AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) adatainak pontos légköri korrekciójához. A leképező szenzorok által derült képpontokra mért radianciákból a légkör hatásának leválasztásához alkalmazott eljárások leginkább e két paraméterre érzékenyek. Ezen mennyiségek alkalmazhatóságának vizsgálata kapcsán elsőként a kihullható vízgőzzel foglalkoztunk részletesen (Kern *et al.*, 2008).

MODIS adatok alapján valós idejű (*real-time*) 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 vételű adatainkra automata rendszerben minden vétel után közvetlenül meghatározzuk a tüzes koordinátákat, melyekről (köztük a hazaiakról is) elektronikusan azonnal értesülünk.

A számszerű információk kinyerése mellett vizuális elemzéseket is végezhetünk, melyre a műholdmeteorológiában többféle mód is kínálkozik. A valós színezésű, 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 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 and 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. A teljes Európát lefedő, 250 méteres felbontású georeferált, valós színezésű MODIS kompozitkép naponta elérhető.

Az ELTE állomás által vett adatok feldolgozásának utolsó lépcsőfoka az ún. DBCRAS (Direct Broadcast CIMSS (Cooperative Institute for Meteorological Satellite Studies, University of Wisconsin-Madison) Regional Assimilation System) korlátos tartományú időjárás-előrejelző modellt, melyet az amerikai Wisconsin Madison Egyetemen fejlesztettek ki (Aune *et al.*, 2008). A pszeudo-nem-hidrosztatikus modellváltozat kifejezetten MODIS adatok asszimilálására és azok az előrejelzésre gyakorolt hatásának vizsgálatára készült. Az előrejelzés $48 \text{ km} \times 48 \text{ km}$ horizontális felbontású rácson, 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 (Global Forecast System) előrejelzési modelledmények, felszíni megfigyelések, NOAA hó- és jégtakarómezők, SST-mezők és saját vételű 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 paraméterét használja fel. A durva felbontású DBCRAS modellbe ágyazva hozták létre a finomabb felbontású NDBCAS-t (Nested DBCRAS), amelynek horizontális felbontása $16 \times 16 \text{ km}$. A modell 48 órára, 3 órás időlépcsőkkel állítja elő ugyanazokat a meteorológiai elemeket, melyet a kezdeti és határfeltételeket adó DBCRAS is előállít. Használatához ezért mindenképpen szükséges a DBCRAS egyidejű futtatása.

Köszönetnyilvánítás

A műholdvevő állomás kiépítését a Magyar Űrkutatási Iroda és az Informatikai és Hírközlési Minisztérium (IHM) támogatta. Az ELTE Meteorológiai Tanszék műholdas kutatásait a következő pályázatok támogatták: OTKA T-034867 (2001-2005), IHM TP-241 (2004-2005), IHM TP-258 (2005-2006), IHM TP-287 (2006-2007) és IHM TP-338 (2008-2009). Kiemelt köszönet jár a technikai és szakmai segítségükért Barcza Zoltánnak, Borbás E. Évának, Liam E. Gumleynak, Kovács Richárdnak és Kathleen I. Strabalanak. További köszönet illeti Robert Aunet, Steve Dutcher, az ELTE Űrkutatási Csoportot, Ihász Istvánt, Paul Menzelt, Németh Pétert, Pongrácz Ritát, Révész Beátát, Timár Gábort, Tóth Zoltánt, és Zsótér Ervint.

Irodalomjegyzék

- 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/DBCAS_DB2008.ppt)
- Bognár, P., Timár, G., Ferencz, Cs., Lichtenberger, J., Molnár, G., Székely, B., Kern, A., 2005: A földfelszín folyamatos monitorozása hiperspektrális műholdas adatok segítségével, *Technika* 48(9-10): 38-39. ISSN 0040-1110.
- Davies, D., Kumar, S., Descloires, 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 Lorand University, in Hungary, *Geodézia és Kartográfia* 55(9): 30-33.
- Giglio, L., Descloitres, 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., Descloitres, J., Schmaltz, J., 2003: Creating Reprojected True Color MODIS Images: A Tutorial. ([ftp.ssec.wisc.edu/pub/IMAPP/MODIS/True Color/MODIS_True_Color.pdf](ftp.ssec.wisc.edu/pub/IMAPP/MODIS/True_Color/MODIS_True_Color.pdf))
- Gumley, E.L., Evan, A., 2009: Direct Broadcast Google Earth. (http://cimss.ssec.wisc.edu/imapp/dbge_v1.2.shtml)
- Huang, H.-L., Gumley, L.E., Strabala, K., 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.
- Justice, C.O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J.T., Roy, D., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F., Kaufman, Y., 2002: The MODIS fire products, *Remote Sensing of Environment*, Vol. 83, 244–262.
- Kern, A., Bartholy, J., Pongrácz, R., 2005: Az ELTE Környezetfizikai Tanszékcsoport műholdvevő állomása, *Léggör*, 50., NO 1, 18-21 p.
- 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.
- 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.
- 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.
- Savtchenko, A., Ouzounov, D., Ahmad, S., Acker, J., Leptoukh, G., Koziana, J., Nickless, D., 2004: Terra and Aqua MODIS products available from NASA GES DAAC, *Advances in Space Research*, 34, 710–714.
- 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.

Az időjárás előrejelzési tevékenység támogatása műholdas információkkal

Gróbné Szenyán Ildikó, Putsay Mária és Kocsis Zsófia

Országos Meteorológiai Szolgálat
1181 Budapest, Gilice tér 39., e-mail: szenyan.i@met.hu

Összefoglaló – Bemutatjuk, hogy milyen műholdas információkkal segítjük az OMSZ időjárás előrejelzési tevékenységét. A műholdas információ vizuálisan és az előrejelzési, valamint Nowcasting célú numerikus programrendszerekbe való beépülés révén is segíti az időjárás analízisét és előrejelzést. A gyors és alapos vizuális kiértékelést segítő a sok információ optimális megjelenítésére törekszünk. Megjelenítjük az globális instabilitási indexeket (GII), melyeket műholdas és numerikus előrejelzési adatok együttes felhasználásával az EUMETSAT-ban származtatnak. Az OMSZ-ban futtatjuk az EUMETSAT „Nowcasting munkacsoportja” által fejlesztett programcsomagot, mely műholdadatokból származtat nowcasting-ot segítő produktumokat, paraméter-mezőket. Bemutatjuk a legújabb verzió legjelentősebb fejlesztéseit: a felhőfajta osztályozás produktum kód és alacsony felhők felismerése megbízhatóbbá vált alacsony napmagasságnál, a gyorsan fejlődő zivatarfelhők azonosítását végző produktumban pedig a konvektív felhők azonosítását végző algoritmus lett megbízhatóbb.

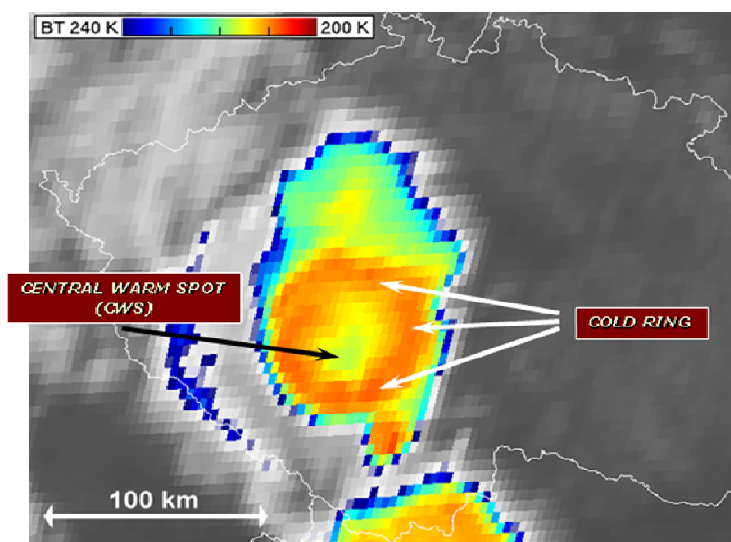
Műholdas információk interaktív felhasználása

Az interaktív felhasználás során a műholdas információt megjelenítő rendszerbe illesztjük és ott a felhasználó vizuálisan értékelheti ki. Egy-egy egyedi csatornájában készített képet, vagy több csatornát felhasználva készített ún. kompozit képet, illetve a műhold mérések felhasználásával származtatott paramétereket is meg szokták jeleníteni. Az előrejelzőknek maguk a képek, illetve az azokból készített animációk a legfontosabbak. A képeket egymás után vetítve jól látszanak a légkörben és a felhőzeti mezőben bekövetkező változások. A 15 percenkénti Második Generációs Meteosat (MSG) képeket már évek óta használják az előrejelzések készítése során a Szolgálatnál. Tavaly ősz óta már e műholdak 5 percenkénti képeit is operatíván vesszük és továbbítjuk az előrejelzőknek. Az 5 és 15 percenkénti képek közti különbség csak annyi, hogy az 5 percenkénti képek kisebb területről - Atlanti-Európa térség - készülnek, nem a teljes Földkorongról. Az 5 perces képek lehetővé teszik a gyors változások megfigyelését, továbbá segítségükkel 5 vagy 10 perccel korábban észlelhető az új zivatarcella vagy a kód megjelenése.

Az MSG műhold 12 csatornás SEVIRI leképező rendszere négy rövidhullámú, (ezek között egy nagyfelbontású) és nyolc hosszuhullámú (légköri ablakokban, vízgőz és CO₂ elnyelési sávokban levő) csatornában mér. Az OMSZ megjelenítő rendszerében (HAWK) az egyedi sávok közül a következőket jelenítünk meg: a 0.6 µm látható csatornát, a 6.2 és 7.3 µm vízgőz elnyelési csatornákat, a 10.8 µm-es infravörös (IR10.8) csatornát több változatban, és a nagyfelbontású látható csatornát.

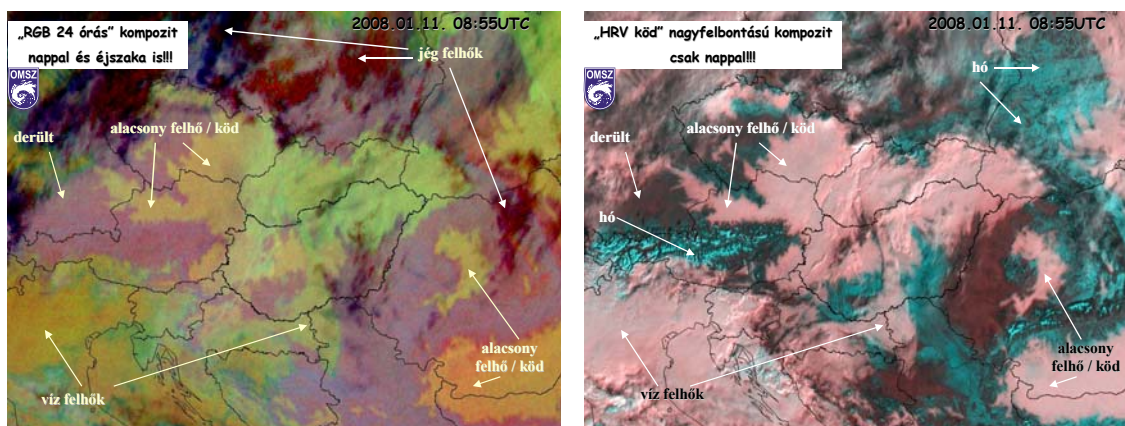
Az IR10.8 a leghagyományosabb és legtöbbet használt csatorna. A zivatarfelhők vizsgálatára régóta használják a meteorológusok. A képeken a leghidegebb (-33 Celsius foknál hidegebb) felhőtetőket színezéssel kiemelve, egyes felhőknél gyűrűs mintázat vagy U alakzat figyelhető meg. (1. ábra) Az USA-beli kutatások szerint (McCann, 1983; Adler et al., 1985), ha ilyen 'hideg gyűrű' vagy U alakot mutat a felhő tetején a hőmérséklet eloszlás, akkor ~70%-os valószínűséggel a felhő heves zivatar.

Martin Setvák és munkatársai az 5 perces MSG képek felhasználásával újabb vizsgálatokat folytattak (Setvák *et al.*, 2009). Megállapították, hogy ezek az alakzatok sokkal gyakoribbak, mint azt a 15 perces képek szerinti vizsgálatok mutatták. A rövid élettartamú alakzatok gyakran alakulnak ki nem heves zivatarok tetején is. Viszont ha a körülzárt meleg folt legalább 30-40 percig megmarad, akkor már érdemes figyelni arra a felhőre, mert ezek gyakran heves zivatarok.



1.ábra. – hideg gyűrű MSG IR10.8 képen

A sok egyedi csatornában rejlő rengeteg információból a lényeg kiemelésére szolgáló megjelenítési mód a kompozit képek készítése. A kompozit kép készítése során a 3 alapszínbe 1-1 csatorna képét (vagy 2-2 csatorna különbségét) egymásra vetítve, együtt jelenítjük meg. A sávok kiválasztása nem véletlenszerű, hanem attól függ, hogy a kompozit képen milyen fizikai tulajdonságot akarunk kiemelni. Komoly fejlesztő munka eredményeként több típusú “standard” kompozit képet fejlesztettek ki az EUMETSAT-ban (Kerkmann *et al.*, 2006). A 2. ábrán példát mutatunk be kompozit képekre.



2.ábra. – 24 órás mikrofizikai és a nagyfelbontású köd kompozit kép

A MSG új infravörös csatornáinak segítségével megoldódott az éjszakai alacsonyszintű felhők (ide értve a ködöt is) azonosításának problémája. A korábbi METEOSAT műholdakon csak egy infravörös sáv készült, amivel csak ritkán lehetett a ködös és derült területeket egymástól megkülönböztetni. Az MSG új infravörös sávjai teszik lehetővé az alacsonyszintű felhők (ködök) detektálását.

Műholdas információk automatikus felhasználása

A műholdadatokból (operatíván futó programokkal) légköri paramétereket származtathatóak. Ezek a programok esetenként felhasználnak más, nem műholdas adatokat is, például előrejelzési modellek eredményeit.

Az EUMETSAT sokféle paramétert származtat az MSG műholdképek felhasználásával. A globális instabilitási indexek csoportját az OMSZ-ban is felhasználjuk. Az instabilitási indexek (és a légoszlop összegzett vízgőztartalmának) számításához a SEVIRI adatokon kívül numerikus előrejelzési adatokat is felhasználnak. Az indexeket a HAWK rendszerben jelenítjük meg oly módon, hogy a felhős területeken az IR10.8 infravörös kép látsszon, míg a derült területen az indexek, sárgás pirosas színnel jelölve a leginstabilabb helyeket, ugyanis ezeket az indexeket csak a derült területeken lehet számolni.

Az EUMETSAT Nowcasting SAF munkacsoportja kifejlesztett egy programcsomagot (SAFNWC) nowcasting célú légköri paraméterek operatív, gyors előállítására. A munkacsoportban az OMSZ több munkatársa is dolgozott a programok fejlesztésén és verifikálásán is eseti megbízások keretében. Az OMSZ-ban béta-tesztelőként már próbaadatokon is futtattuk a programcsomagot. A programcsomagot azóta is folyamatosan fejlesztik; jelenleg a 2009-es verziót használjuk. A programcsomag legújabb fejlesztései a felhő produktumoknál és a gyorsan fejlődő zivatarok produktumcsoportban történtek, ezeket röviden összefoglaljuk.

A régebbi verzióknál problémát jelentett, hogy napfelkelte és naplemente idején átmenetileg kevésbé detektálta a program az **alacsonyszintű felhőket vagy ködöket**. Sikertelenül sikerült csökkenteni szürkület idején ezen területek átmeneti eltűnését a legújabb program verzióban, azzal a módszerrel, hogy az egymás utáni képeken figyelik a felhős területek gyors változásait.

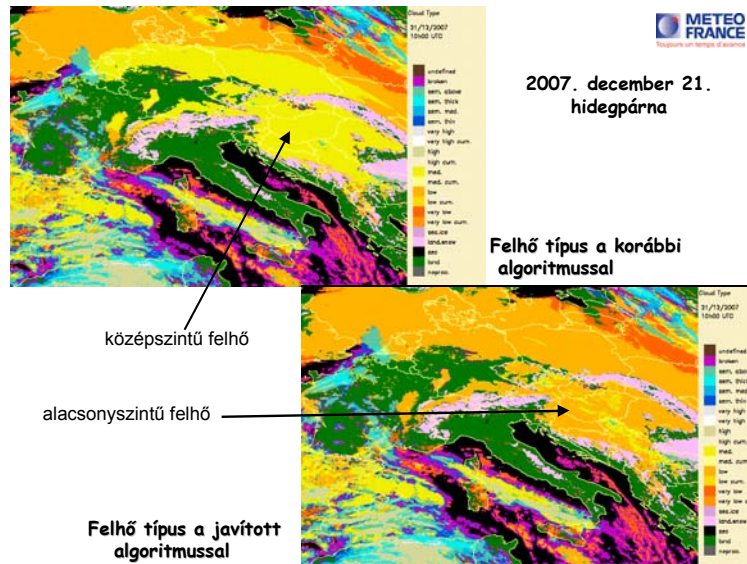
Az **alacsonyszintű felhők felismerését talaj menti hőmérsékleti inverzió** esetén is sikerült javítani. Inverziós esetekben a program sokszor tévesen az alacsonyszintű felhőket a középszintű felhők osztályba sorolta. A 8.7 és 10.8 μm -es infravörös csatornák fényességi hőmérsékletének különbségét vizsgálva érték el a javulást fejlesztők (3. ábra).

Fejlesztették a **cumulus felhők detektálását** is. A probléma az volt, hogy kis-méretű felhők esetén egy adott pixelben felhő és derült terület is van, melyet nehéz detektálni. Az eddigi program változatok csak a 3 km-es felbontású csatornákat használták fel a felhők detektálásához. Most azzal érték el az eredményt a fejlesztők, hogy bevonták a detektálásba nagyfelbontású látható képet is.

A 2010-es program verzióban új produktum is meg fog jelenni, a „**felhőtető halmazállapota**” (vízcseppek, jégkristályok vagy vegyes).

A **gyorsan fejlődő zivatarok** produktum az egymás utáni képeken követi a felhőrendszereket, és kiválogatja a konvektív felhőket. A cellák megtett útját és az egyes

tulajdonságok időbeli változásait is mutatja ez a produktum. A 2009-es program változatban jelentős fejlesztéseket hajtottak végre konvektív és nem konvektív felhők szétválasztásában. Az idén nyáron teszteltük az új program zivatar produktumait és azt állapítottuk meg, hogy megbízhatóbban találja meg a program a konvektív felhőket.



3.ábra. – Hidegpárna helyzetben a régebbi és újabb Felhőtípus algoritmus eredménye

A műholdas információk **automatikus felhasználásának** másik módja, mikor input adatként használják fel számítógépes programokban, pl. numerikus időjárás előrejelzési modellbe asszimilálva a műholdas adatokat. Az OMSZ-ban az ALADIN előrejelző modellbe asszimilálják MSG képekből számított légköri mozgásvektorokat (AMV) és a poláris műholdak légköri szondázási adatait (ATOVS adatok). Az OMSZ-ban futtatott MEANDER nowcasting modellbe is asszimilálnak műholdas adatokat, a SAFNWC programcsomag felhő produktumait. A MEANDER modellre épül az OMSZ veszélyes időjárás jelenségekre figyelmeztető riasztórendszere, így ebben is benne vannak a műholdas információk.

Irodalomjegyzék

- Adler, R.F., Markus, M.J. and Fenn, D.D., 1985: Detection of Severe Midwest Thunderstorms Using Geosynchronous Satellite Data. *American Meteorological Society* **113**, 769-781.
- Kerkmann, J., Lutz, H.J., König, M., Prieto, J., Pylkko, P., Roesli, H.P., Rosenfeld, D., Zwatz-Meise, V., Schmetz, J., Schipper, J., Georgiev, C., and Santurette, P., 2006: MSG Channels, Interpretation Guide, Weather, Surface Conditions and Atmospheric Constituents. [Available at http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/index.html.]
- McCann, D.W., 1983: The enhanced-V: a satellite observable severe storm signature. *Mon. Weather Rev.* **111**, 887–894.
- Setvák, M., Lindsey, D.T., Novák, P., Wang, P.K., Radová, M., Kerkmann, J., Grasso, L., Su, S., Rabin, R.M., Štáštka, J., Charvat, Z., and Kyznarová, H., 2009: Cold-ring-shaped cloud top features atop convective storms. Submitted to *Atmos. Research*.

Zivatarok megfigyelése műholdadatok segítségével WV képek elemzése potenciális örvényességi mezőkkel

Simon André és Putsay Mária

Országos Meteorológiai Szolgálat, 1024 Budapest, Kitaibel Pál u.1

simon.a@met.hu; putsay.m@met.hu

Összefoglaló – A veszélyjelzésben és a repülés-meteorológiában nagyon fontos a gyorsan fejlődő zivatarok korai felismerése. A második generációs METEOSAT (MSG) műhold nagy tér- és időbeli felbontású felvételei, adatai megkönnyítik az intenzív konvekció detektálását és a konvektív paraméterek számítását. Az MSG kompozit képek segítségével a felhők mikrofizikai jellemzői láthatóvá tehetőek, az ezekkel összefüggő jelenségekre lehet segítségükkel következtetni. A potenciális örvényességi mezők és a vízgőz képek együttes elemzése lehetővé teszi a nagyméretű dinamikus folyamatok (pl. ciklogenezis) követését és megértését.

Bevezetés

A gyorsan fejlődő zivatarok észlelése, nyomon követése és előrejelzése a veszélyjelzés és a rövidtávú időjárás előrejelzés egyik legnehezebb feladatköre. Az intenzív konvekciót gyakran veszélyes jelenségek kísérik, pl. erős leáramlások és kifutó szelek, úgynevezett „downburst”-ok (Fujita, 1978), néha felhőtölcsérek, vagy tornádók is előfordulhatnak. Főleg a hosszú életű mezo-léptékű konvektív rendszerek (MCS) és komplexumok (MCC; Maddox, 1980), instabilitási vonalak, derecho viharok (Johns és Hirt, 1987) érdemelnek rendkívüli figyelmet, mivel ezek több száz kilométer hosszú sávokban, nagy területeken okoznak károkat (szélvihar, jégeső, nagy térségű intenzív csapadék).

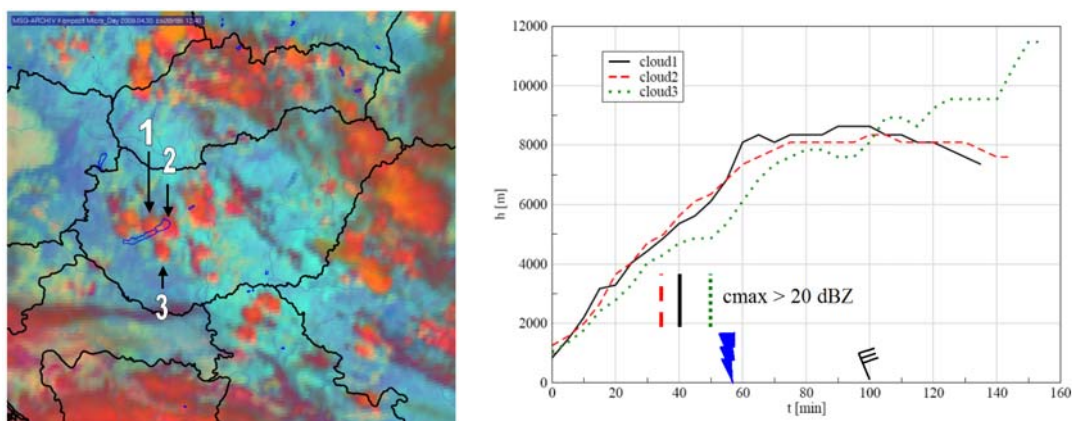
Az MSG műhold 12 (látható - VIS, infravörös - IR és vízgőz elnyelési -WV) csatornája lehetővé teszi a felhők fejlett, sokoldalú megfigyelését. A képek területi felbontása Magyarországon felett ~4×6 km (a nagyfelbontású látható HRV csatornában, ~1,3×2 km) az időbeli felbontás pedig 15 perc (a 'Rapid-Scan' képeknél 5 perc). Az MSG adatok felhasználásával számos módszert fejlesztettek ki a zivatarok tanulmányozására. Ezek közül említünk meg néhányat. Az egyes sávokból (vagy azok különbségeiből) előállított RGB kompozit kép típusok (Kerkmann, 2006) egy-egy légköri jellemzőt emelnek ki, például a felhőtető mikrofizikai jellemzőit. Többféle algoritmust is kifejlesztettek a zivatarfelhők automatikus észlelésére és követésére, ilyen például az ún. Gyorsan Fejlődő Zivatarok (Rapid Developing Thunderstorm, RDT) program. Műholdadatokból sokféle légköri paramétert származtatnak, pl. a Globális Instabilitási Indexeket (GII; König és Coning, 2009). Ezek előállításánál a numerikus modellek mezőit is felhasználják. A képek magas tér- és időbeli felbontása (15 perc) elősegíti az aktuális instabilitási viszonyok meghatározását a felhőnélküli területeken. A potenciális örvényesség (PV) egy nagyon gyakran használt paraméter mind a dinamikus, mind a szinoptikus meteorológiában (Ertel, 1942). Mivel a PV az adiabatikus folyamatoknál nem változik, így lehetővé teszi a légtömeg mozgásának követését, valamint olyan légköri állapotok és folyamatok

meghatározását, mint a baroklin instabilitás és gyors ciklogenezis. A sztratoszféra eredetű, száraz, magas PV-ű levegőtömeg áramlása általában jól követhető a 6,2 μm vízgőz elnyelési csatorna képein. A numerikus modellek által előállított PV mezők és a műholdképek együttes elemzése számos értékes információt ad a fent említett folyamatokról és légköri viszonyokról (pl. a magassági futóáramlás elhelyezkedése).

Gyorsan fejlődő zivatarok

Az erős leáramlást, szélvihart okozó zivatarok gyakran instabil rétegezésnél, de nagyon száraz magassági levegő jelenlétében fordulnak elő (Fawbush, 1956). Ilyen helyzetekben érdemes a konvekciót már a korai, fejlődő fázisában követni, az 5 perces képek segítségével (főleg a HRV és IR sávból készült kompoziton). A vertikálisan nagy kiterjedésű gomoly- és zivatarfelhők a „nappali mikrofizikai” kompozit RGB képeken is jól felismerhetők (1a. ábra).

A gomolyfelhők a műholdképeken korábban jelennek meg, mint a radarképeken. Az első villámok, illetve az erős, vagy viharos szellőkések gyakran csak 30-60 perc múlva észlelhetők (1b. ábra).



1a. ábra. (balra) MSG „nappali mikrofizikai” kompozit kép (VIS0.8, IR3.9refl, IR10.8), 2009.04.30. 12:40 UTC. A számok és nyilak az 1b. ábrában tanulmányozott zivatarfelhőket jelölik.

1b. ábra. (jobbra) MSG IR10.8 adatokból és aerológiai mérés (Budapest, 2009.04.30. 12:00 UTC) alapján becsült felhőmagasság (vonalak, m) időbeli változása az 1a. ábrán jelölt zivatarfelhők esetében. A függőleges vonalak az első 20 dBz-nél nagyobb radar reflektivitás előfordulását jelölik. Az idő tengely kezdete az első felhőnél (folytonos vonal) 11:05 UTC, a második (szaggatott vonal) és a harmadik (pontozott vonal) felhőnél egyaránt 10:55 UTC. Az idő tengelyen az első villám (12:00 UTC), illetve első 15 m/s-t meghaladó szellőkés (12:45 UTC) előfordulását is bejelöltük.

Magas légköri instabilitásnál és bizonyos mezoszínoptikus helyzetekben (pl. konvergencia vonalak kialakulása) a konvekció intenzívebb, a zivatarfelhők gyorsabban fejlődnek. Az MSG által megfigyelt zivatarfelhő növekedésének sebessége ilyen helyzetekben elérheti az 5-7 m/s értéket is. Itt figyelembe kell venni azonban azt is, hogy ezek az értékek a műhold felbontására vonatkozó átlagok. A maximális vertikális sebességek

a felhőben eléri a 10-50 m/s értékeket is. Ilyen gyors feláramlás esetében a felhőalaponál keletkezett kisméretű cseppeknek nincs idejük megnőni, s a felhő tetején igen kisméretű jégkristályok lépnek ki a feláramlási csatornából. Ezek jól megfigyelhetők az IR 3.9 μm sávban (magas reflektivitásuk miatt) és az úgynevezett „convective storm” (zivatar) RGB kompozit képeken is.

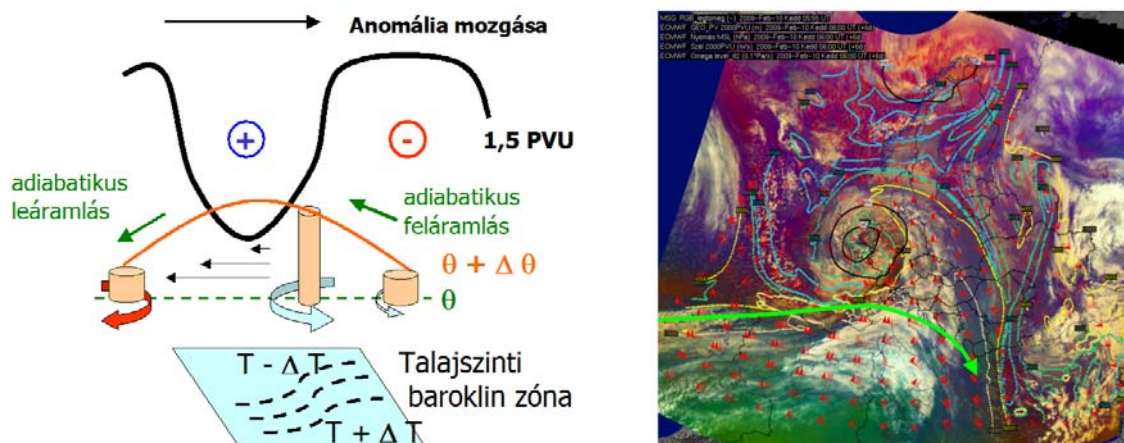
Zivatarrendszerek követése

Az RDT szoftverek elsősorban a felhőtető hőmérsékletét vizsgálják, az alacsony hőmérsékletű területek kiterjedését és annak változásait. Ez gyakran összefügg a rendszer intenzitásával és a veszélyes időjárással, főleg az MCC típusú zivataroknál. A zivatarrendszerek fejlődésük során gyakran átalakulnak. A konvekció átmeneti gyengülése (pl. nagyméretű kifutó szél következtében, ami hűti és szárítja a rendszer előtti levegőt) megtevesztheti az előrejelzőt a helyzet értékelésében. A konvektív rendszerek egyensúlyát több tényező is meghatározza, pl. a környező levegő instabilitása, szélnyírása és vízgőztartalma. Ilyen esetekben a GII-ből származó paraméterek segítségével is meg lehet becsülni a rendszer további fejlődését. Például az instabil, alsó rétegekben nedves, de magasabb szinteken száraz beáramló levegő kedvez az új zivatarok kialakulásának, viszont a konvektív leáramlást is támogatja, ezáltal felgyorsíthatja a rendszer haladását. Hasonló körülményeknél az ekvivalens potenciális hőmérséklet vertikális változásait és ehhez fűződő indexeket (pl. TED, MDPI) érdemes figyelni.

A PV koncepció használata a műholdmeteorológiában

Az adiabatikus folyamatoknál a sztatikus stabilitás és az abszolút örvényesség (izentróp koordinátában) szorosan összefüggő mennyiségek, szorzatuk (ami gyakorlatilag majdnem azonos a PV-vel) állandó. Ez azt jelenti, hogy egy képzeletbeli levegőoszlopban a sztatikus stabilitás csökkenése (pl. vertikális feláramlásnál) az örvényesség növekedéséhez vezet és fordítva. Ilyen körülmények között a PV lokálisan csak advekcióval változik. A magas PV értékek a sztratoszférában és a sarkvidéki levegőtömegben találhatóak. A meridionális, magas (alacsony) PV értékeket tartalmazó hideg (meleg) levegőtömeg advekciója következtében a légkörben pozitív (negatív) anomáliák keletkeznek az egyébként zonális PV eloszlásban. Mivel a sztratoszférikus eredetű levegő nagyon száraz, a pozitív anomáliák nagyon jól láthatóak a 6,2 μm vízgőz képeken. Az anomáliák peremén gyakran található tropopauza törések, erős vertikális mozgások és futóáramlás (jet stream) központok (2a. ábra). Ezek a régiók jól kitűnnek a „légtömeg” RGB kompozit képeken (pirosas színek, 2b. ábra).

Az alacsony szinteken is létrejöhetnek néha elszigetelt pozitív PV anomáliák (2-5 PVU), nem adiabatikus folyamatok (csapadék, súrlódás) következtében (a PV egysége a PVU, Potential Vorticity Unit, $1 \text{ PVU} = 1 \times 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1} \text{ K kg}^{-1}$). Az alacsony szintű anomáliáknak is nagy jelentősége van a légkördinamikában (pl. baroklin instabilitásnál), ezek azonban többnyire csak numerikus modellek segítségével azonosíthatók.



2a.ábra. (balra) A magasszintű (pozitív) PV anomália talajszinti baroklin zónához való közeledése feláramlást és az örvényesség növekedését, néha gyors ciklogenezist eredményezi. A 1,5 (2,0) PVU felületet gyakran dinamikus tropopauzának is nevezik.

2b.ábra. (jobbra) MSG „légtömeg” RGB kompozit kép (WV6.2–WV.3, IR 9.7-IR10.8, WV6.2), 2009.02.10. 05:55 UTC. A szaggatott vonalak az ECMWF által előrejelzett 2 PVU szint magasságát, a folytonos vonalak a talajszinti nyomást mutatják (hPa-ban, csak a ciklon környezetében). Az előrejelzett szél 2,0 PVU magasságra vonatkozik (szélzászlók). A zöld nyíl a futóáramlás tengelyét jelzi.

Konklúzió – további lehetőségek

A jövőben még pontosabb és még több információt szolgáltató zivatar-követő rendszerek fejlesztése várható. Ez még nagyobb adatcserét tesz majd szükségessé a nagyfelbontású numerikus modellek, illetve más nowcasting rendszerek és a műholdas rendszerek között. A tervezett harmadik generációs METEOSAT műhold magasabb tér- és időbeli felbontása sokkal több részletet fog mutatni, így kisebb és rövidebb életű zivatarok, zivatarrendszerek fejlődését is meg lehet majd figyelni. További dinamikus paraméterek származtatása és felhőtető mikrofizikai jellemzőinek pontosabb meghatározása is jelentős előrelépést eredményezhet a nowcasting-ban és rövidtávú időjárás előrejelzésben.

Irodalomjegyzék

- Ertel, H., 1942: Ein neuer hydrodynamischer Wirbelsatz. *Meteor. Z.* **59**, 277–281.
- Fawbush, E. J., Miller, R. C., 1954: A basis for forecasting peak wind gusts in nonfrontal thunderstorms. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **35**, 14–19.
- Fujita, T. T., 1978: Manual of downburst identification for project NIMROD. Satellite and Mesometeorology Res. Paper 156, *Dept. of Geophysical Sciences, University of Chicago*, 104 pp.
- Maddox, R. A., 1980: Mesoscale convective complexes. *Bull. Amer. Meteor. Soc.* **61**, 1374–1387.
- Johns, R. H., Hirt, W. D., 1987: Derechos: widespread convectively induced windstorms. *Wea. Forecasting* **2**, 32-49.

- Kerkmann, J., Lutz, H.J., König, M., Prieto, J., Pylkko, P., Roesli, H.P., Rosenfeld, D., Zwatz-Meise, V., Schmetz, J., Schipper, J.,J., Georgiev, C., and Santurette, P., 2006. *MSG channels Interpretation Guide, weather, surface conditions and atmospheric constituents*. http://oiswww.eumetsat.org/WEBOPS/msg_interpretation/index.html
- König M., Coning E., 2009: The MSG Global Instability Indices Product and Its Use as a Nowcasting Tool. *Wea. Forecasting.*, **24**, 272-285.

Műholdképek használata a hazai szinoptikus gyakorlatban

Kolláth Kornél

Országos Meteorológiai Szolgálat, Repülésmeteorológiai és Veszélyjelző Osztály
1024 Budapest, Kitaibel Pál u. 1., email: kollath.k@met.hu

Összefoglaló – Az Országos Meteorológiai Szolgálat mindennapi gyakorlatában alkalmazott műholdszinoptikai eszközöket kívánjuk bemutatni. Összegezzük az elmúlt évek azon fontosabb változásait, fejlesztéseit, melyek az előrejelzők munkájára sokban hatottak. Betekintést nyerhetünk abba, hogy a korszerű megjelenítési technikáknak köszönhetően a műholdképekből kinyerhető információkra fókuszálva, hogyan lehet hatékony módon analizálni a légkörben zajló, különböző skálájú folyamatokat. Bemutatunk néhány olyan módszert, melyek segítségével a szinoptikus időben felismerheti a numerikus modellfuttatások valósághoz képesti anomáliáit. Végül pár gondolatot ejtünk a műholdszinoptika várható jövőbeni tendenciáiról.

Bevezetés

A szinoptikus gyakorlatban a célprognózistól és az időjárási helyzettől függően manapság már hatalmas mennyiségű információt kell az előrejelzőnek szintetizálni (1. ábra). Gondolva az előrejelző „asztalán” az utóbbi időben elérhetővé tett számos újabb és újabb produktumra, a szinoptikus meteorológia legnagyobb kihívása jelenleg az, hogy hogyan lehet tudományos megalapozottsággal, ugyanakkor az általában rövid rendelkezésre álló idő alatt feldolgozni, hatékonyan felhasználni a szóban forgó információk összességét. A numerikus modellek után talán a legnagyobb falatot a különféle műholdképek és származtatott műholdas produktumok képviselik.

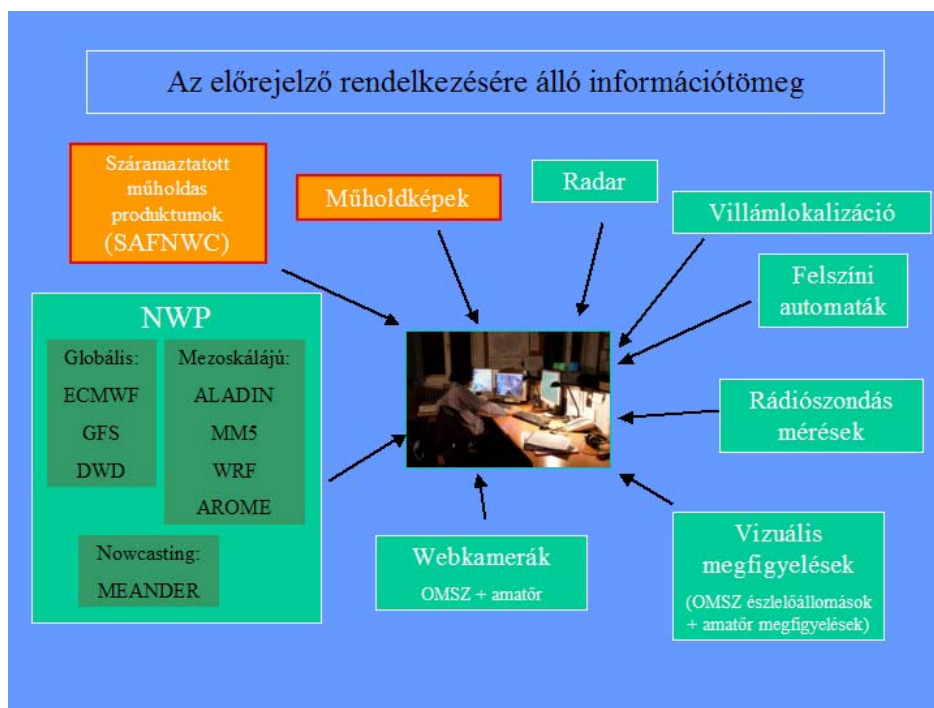
A leggyakrabban használt műholdas produktumok

A szinoptikus gyakorlatban az időbeni folyamatosság jelentősége miatt szinte kizárólag a geostacionárius műholdakat használjuk. 2004 előtt a METEOSAT-7 klasszikus látható, vízgőz és infra sávokban készült képei jelentették a mindennapi gyakorlatban használt műholdas produktumokat. Az MSG operatív használatba vételével igen jelentősen bővült az eszköztár. A legnépszerűbb produktumokat és jellemző használatukat az 1. táblázat mutatja.

Az időjárási helyzet általános, szinoptikus skálájú áttekintéséhez több különféle műholdképet használhatunk. A felhőzet analíziséhez fő szempontként említhetjük, hogy elkülönüljenek a különböző magasságban lévő felhők, kapjunk információt a felhőzet vastagságáról, fázisáról. Ezen követelménynek általában eleget tesznek a mikrofizikai műholdképek. A felsőtroposzféra dinamikai analíziséhez elengedhetetlen a hagyományos vízgőzkép használata, de gyors áttekintést nyújthat az ún. légtömeg kompozitkép is.

A mezoskálájú analízis céljára általában a HRV kompozitképeket alkalmazzuk, ha lehetőség van rá, akkor az RSS szolgáltatást nyújtó MSG műholdról. /A HRV csatorna mellé vagy a felhőzet hőmérsékletére/magasságára utaló infrakép, vagy a felhőzet

mikrofizikai tulajdonságait (főként a fázisát) jellemző 1,6 μm -es csatorna van beépítve (HRV felhő, illetve HRV köd kompozitkép). Esetenként a jobb kontraszt eléréséhez megfelelő színskálával ellátott önálló HRV csatornát is alkalmazunk./



1.ábra. Az előrejelzőnek rövid idő alatt számos forrásból származó információt kell értékelni, feldolgozni, melyek közül az egyik nagy szeletet a műholdas produktumok képviselik.

Produktum	Jellemző felhasználás
Egyedi csatornák	
IR 10.8μm (infrakép)	A hagyományos infrasáv általános, szinoptikus célú áttekintésre történő felhasználása megmaradt az új, MSG rendszerben is. A megjelenítés során tetszőleges színskálával dolgozhatunk. Kiemelhetünk hőmérsékleti tartományokat, amin belül finomabb felbontásban, kontrasztosabban színezzük (például a zivatarfelhők tetejének pontosabb struktúrájához).
WV 6.2μm (vízgőzkép)	fölsötroposzféra dinamikai analízise (anomáliák, jet, deformációs zónák)
WV 7.3μm (vízgőzkép)	középtroposzféra nedvességi és dinamikai analízise, középtroposzférikus jet, meleg-nedves szállítószalagok kijelölése. A csatorna önálló felhasználásán kívül a légtömeg és a zivatar-kompozitkép összetevőjeként szerepel.
HRV műholdképek	
HRV (nagyfelbontású láthatókép)	Felhőzet finomstruktúrájú fejlődésének nyomonkövetése, különös tekintettel a konvekcióra és a ködre, alacsony szintű felhőkre.
HRV-felhő (RGB: HRV,HRV,IR10.8)	Nagyfelbontású kompozitkép, melyben elkülönülnek az alacsonyabb és magasabb hőmérsékletű felhők.
HRV-köd (RGB: NIR1.6,HRV,HRV)	Nagyfelbontású látható kép a vízfelhők és jégfelhők/hófelszín elkülönítésével. Fejlődő felhőzet fázisátalakulása (például mikor érik el a fiatal konvektív felhők a jégfázist?), köd és hófelszín elkülönítése.

<i>Különféle RGB kompozitképek</i>	
RGB natural (NIR1.6,VIS0.8,VIS0.6)	Látható kép szinoptikus skálájú analízis céljára. Víz és jégfelhők, hófelszín elkülönítése. A felszín természeteshez hasonló színárnyalatokban jelenik meg (zöld vegetáció).
RGB nappali mikrofizikai (VIS0.6,IR3.9solarpart,IR10.8)	Általános célú műholdkép, mely nagyon érzékeny mind a fázisra (víz/jégfelhő, hófelszín), mind a részecskeméretre. A részecskemérettől függő színárnyalatokból akár a csapadék egzisztenciájára is következtetni lehet.
RGB hó (VIS0.6, NIR1.6, IR3.9solarpart)	Olyan nappali órákban használatos mikrofizikai műholdkép, amiben a lehető legnagyobb kontraszt elérésére törekszünk a jégfelhő/hófelszín, illetve a vízfelhő/hómentes felszín megjelenése között. Leginkább télen használjuk a hófelszín, köd, hómentes felszín elkülönítéséhez.
RGB éjszakai mikrofizikai (IR12.0-IR10.8,IR10.8-IR3.9, IR10.8)	Köd és talajfelszín elkülönítése az éjszakai órákban.
RGB 24 órás mikrofizikai (IR12.0-IR10.8,IR10.8-IR8.7, IR10.8)	Tisztán infravörös csatornákból összeállított mikrofizikai kompozitkép (napszaktól, napállástól független megjelenés). Köd és talajfelszín elkülönítése szürkületkor
RGB légtömeg (WV6.2-WV7.3, IR9.7-IR10.8, WV6.2)	dinamikai és légtömeg analízis
RGB zivatar (WV6.2-WV7.3, IR3.9-IR10.8, NIR1.6-VIS0.6)	Fejlődőben lévő veszélyes zivatarfelhők detektálása. (A magas felhőtejtű és erős feláramlásra utaló, kis felhőelemekkel rendelkező felhők rikító sárga színárnyalatot mutatnak.)
RGB por (IR12.0-IR10.8,IR10.8-IR8.7, IR10.8)	vékony cirrusfelhők azonosítása; magasra jutó és nagyobb koncentrációban jelen lévő por detektálása. (Gyakorlatilag ezzel a kompozitképpel a mediterrán térségben azonosíthatjuk a gyakran ott még megfelelően nagy koncentrációban jelen lévő afrikai eredetű port, ami az áramlással aztán hazánk területe fölé helyeződhet.)
<i>SAFNWC produktumok</i>	
Felhőtető hőmérséklet, magasság, nyomás	Pontos információk megjelenítése a felhők magasságáról, nyomásáról. /Figyelembe kell venni, hogy a produktum előállításához felhasznált háttérmodell (ECMWF) hibákkal lehet terhelt. Főként az alacsony-szintű felhők/köd esetén lehetnek jelentősebb eltérések, de a tropopauzán túlnyúló zivatarfelhők esetén sem adekvát a produktum./
Automatikus SATREP	A megajánlott konceptuális modellek szimbólumokkal történő megjelenítése esetenként segíthet a megfelelő nagyskálájú analízis elkészítéséhez.
Cellakövetés (RDT)	A cellák automatikus felismerésével, követésével gyorsan áttekinthető objektív képet kaphatunk több fontos karakterisztika időbeni fejlődéséről, általában a cella/cellacsoport eddigi életéről. Főként a veszélyes zivatarok tipizálásához, fejlődési fázisuk megállapításához használhatjuk a radarképekből kinyerhető információkkal együtt.

1. táblázat: Az előrejelző gyakorlat legnépszerűbb műholdas produktumai és jellemző felhasználásuk. (A lista nem teljes körű, csak a leggyakrabban használt produktumokat mutatja be, néhány jellemző felhasználási területtel.)

Műholdképek egyéb meteorológiai produktumokkal való szimultán megjelenítése, műholdszinoptikai eszköztár

A korszerű meteorológiai munkaállomások segítségével meglehetősen testreszabható formában helyezhetünk a műholdképekre különféle meteorológiai mezőket (főként numerikus modellekből (NWP) származó paramétereket). Az Országos Meteorológiai Szolgálat HAWK szoftvere is igen összetett módon képes különféle meteorológiai produktumok szimultán megjelenítésére. A szoftver új, 3. verziója a korábbiakhoz képest is bővebb lehetőségeket kínál. A műholdképekkel kapcsolatban ki lehet emelni például a félig áteresztő színezés alkalmazását (radarkép vagy egyéb folytonos színezésű mező ráhelyezése a műholdképre), vagy a műholdkép pixelértéktől függő megjelenítését (pl. meghatározott hőmérsékleti küszöb alatt helyezük csak fel az infraképet).

A meteorológiai jelenségek azonosítása azok konceptuális modellje alapján történik. A konceptuális modellekhez ún. kulcs-paramétereket köthetünk, melyeknek az objektum körül valamilyen megfelelő eloszlásuk kell legyen (például a meleg-nedves szállítószalagok esetén a felhőzet kb. a 850 hPa-os szint ekvivalens-potenciális hőmérsékleti gerincében helyezkedik el). Az objektumok ilyen elv szerinti azonosítása elsősorban a modellek által jól kezelt szinoptikus skálájú jelenségek esetén történik (tipikusan az NWP futtatások első 12 óráját használjuk a szóban forgó célra). Figyelembe kell vennünk természetesen, hogy ritkán, de ilyen skálán is lehetnek eltérések a numerikus modell és a valóság között, akár az analízis időpontjában is. Mezokálájú jelenségek analízise és ultra-rövid távú előrejelzése esetén nagyobb hangsúlyt kapnak tisztán a távérzékelési, mérési, megfigyelési információk, melyeket jól kiegészíthetnek a nowcasting rendszer meteorológiai mezői. A műholdképeken kívül a felhőzet megfigyeléséhez a SYNOP állomások kódolt információi mellett egyre szélesebb körben használjuk a webkamerák felvételeit is.

Kitekintés

Feltételezhetjük, hogy az elmúlt évek fejlődéséhez hasonlóan a jövőben is mind részletesebb, nagyobb tömegű információ lesz elérhető a szinoptikus munkához. Nagyobb felbontású, kisebb skálájú folyamatokat is kezelő numerikus modellek lesznek operatív alkalmazásban, melyekre egyre fejlettebb utófeldolgozás épül. A távérzékelési adatok – esetünkben különös tekintettel a műholdképekre – szintén szélesebb körű információhalmazzal biztosítanak. Mindezekkel párhuzamosan az informatikai háttér fejlődése is egyre robosztusabb eszközök alkalmazását teszi lehetővé. Feltételezhetjük, hogy az előrejelzési munkafolyamatot további nagyfokú automatizáltság fogja jellemezni. Ebben a környezetben a rövidtávú, ultra-rövid távú előrejelzéssel foglalkozó szinoptikus munkája akkor fog jelentős hozzáadott értéket képviselni, ha a megfelelő szakmai tudás birtokában képesek vagyunk a légkörben aktuálisan zajló folyamatokat jól megérteni, átlátni. Fontos nyomon követni, hogy az aktuális időpontra vonatkozó numerikus modelledmények – nagyságrendi skála szerint elkülönítve – mennyire vannak összhangban a valóságban zajló folyamatokkal, amiben –mivel a légnedvesség és felhőzet a legérzékenyebb indikátorok közé tartozik – kitüntetett szerepe kell legyen a műholdképeknek. Ez lenne az alapja annak, hogy az automatikusan előállított előrejelzett meteorológiai mezőn konzisztensen, szakmailag megalapozott módon lehessen korrigálni.

Irodalomjegyzék

- Bader M. J., Forbes G. S., Grant J. R., Lilley R. B. E. and Waters A. J. (1995): Images in weather forecasting - A practical guide for interpreting satellite and radar imagery; *Cambridge University Press*.
- Best practices for RGB compositing of multi-spectral imagery, User Service Division, *EUMETSAT*: oiswww.eumetsat.int/~idders/html/doc/best_practices.pdf
- Christo G. Georgiev and Patrick Santurette: Mid-level jet in intense convective environment as seen in the 7.3 μm satellite imagery. *Atmospheric Research*, Volume 93, Issues 1-3, July 2009, Pages 277-285; 4th European Conference on Severe Storms - 4ECSS, 4th European Conference on Severe Storms
- David M. L. Sills: On The MSC Forecasters Forums and the Future Role of the Human Forecaster, *Bulletin of the American Meteorological Society*, Volume 90, Issue 5 (May 2009), pp. 619–627
- Jann, A., Wirth, A., & Zwatz-Meise, V., (2001): Pattern recognition methods in satellite meteorology and its applications for nowcasting and VSRF, *Proceedings Fifth European Conference on Applications of Meteorology ECAM 2001*, Budapest, Hungary, September 24-28 2001.
- Patric Santurette and Alain Joly: ANASYG/PRESYG, Météo-France's new graphical summary of the synoptic situation, 2002. *Meteorol. Appl.* 9, 129-154.
- Patrick Santurette and Christo G. Georgiev: Weather Analysis and Forecasting. Applying Satellite Water Vapor Imagery and Potential Vorticity Analysis. *Elsevier Academic Press*, 2005
- Weather Forecasting Technique Considered as a Sequence of Standard Processes from the Forecaster's Point of View, *WMO consultant report*. Workshop on severe and extreme events forecasting, 2004
- ZAMG, Manual of synoptic satellite meteorology, Version 6.8:
<http://www.zamg.ac.at/docu/Manual/SatManu>

A műholdak szerepe a numerikus időjárás-előrejelzésben

Randriamampianina Roger

Országos Meteorológiai Szolgálat (OMSZ), 1024 Budapest, Kitaibel Pál u. 1.
Norvég Meteorológiai Intézet (Met.no), CIENS, Forskningsparken, Gaustadalleén 21, 0313 Oslo
e-mail: rogerr@met.no

Összefoglaló – Napjainkban egyre szélesebb teret nyernek a numerikus időjárás-előrejelző modellek. A numerikus modellek használata során kiemelten fontos az, hogy a kezdeti feltételeket minél pontosabban határozzuk meg. Ezek a feltételek a légkör állapotát jellemzik a modellfuttatás kezdeti időpontjában. Megállapításuk, valamint pontosításuk különböző megfigyelések bevonásával történik. Ezt a folyamatot nevezzük adatasszimilációnak. Az utóbbi évtizedekben a hagyományos meteorológiai megfigyeléseken túl egyre szélesebb körben használnak műholdas megfigyeléseket az adatasszimiláció során.

A műholdas adatok a hagyományos megfigyelésektől eltérően közvetett mérésekből származnak, ezért bevonásuk az adatasszimilációs rendszerbe bonyolult, sokszor nemlineáris összefüggések segítségével történik. A műholdas megjelenések és a közvetlenül ezt követő időszakban a műholdas adatok teljes körű használatának két fő korlátja volt: a számítógépek fejlettségi szintje és a szükséges alkalmazott matematikai módszerek hiánya.

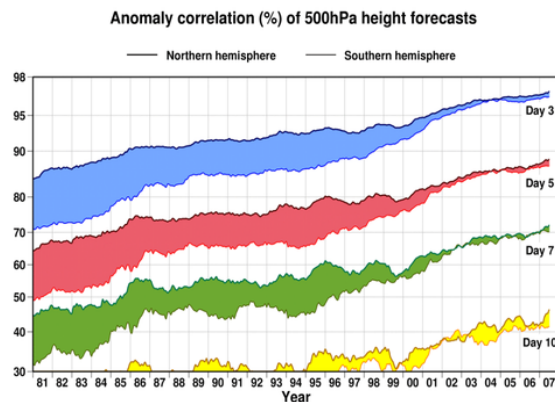
Kezdetben a numerikus időjárás-előrejelző modellek még fejletlenek voltak. Ebben a szakaszban a légköri jellemzőket a modellen kívül, külön eljárás keretében állították elő a műholdas mérésekből (származtatott adatok). Ekkor az adatasszimiláció olyan módszerrel – pl. optimális interpolációval - történt, mely során lineáris összefüggést feltételeztek a megfigyelések és a modell meghatározó változói között. Ehhez képest előrelépésnek számított az, amikor a modellek fejlettségi szintje lehetővé tette variációs eljárások beépítését. Ezen eljárások keretében a műholdas megfigyelések bevonása a numerikus modellbe közvetlenül történik. Időközben az egydimenziós variációs eljárást követően kidolgozták a három-, illetve négydimenziós variációs módszereket is. A műholdas mérések sajátosságaiból kifolyólag nem minden megfigyelést tudunk közvetlen módon asszimilálni a modellekben. A mai napig léteznek olyan műholdas adatok, amelyeket csak származtatott formában tudunk használni.

Jelen tanulmányban röviden ismertetem az eltérő távérzékelési módszereket, a kapcsolódó adatfeldolgozó-, és asszimilációs eljárásokat, valamint a műholdas adatok hatását az előrejelzésre.

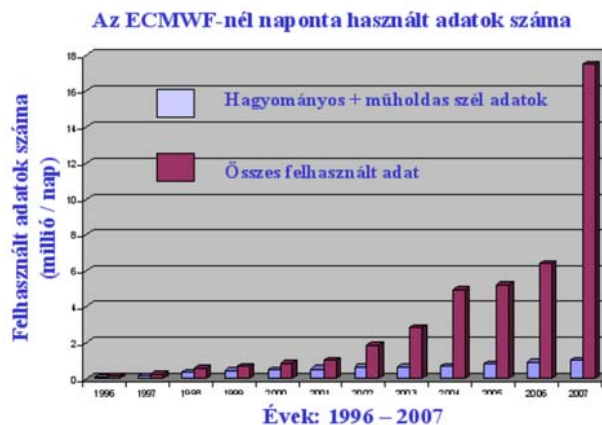
Bevezetés

A számítástechnika gyors fejlődésének köszönhetően bizonyos feladatok, amelyek 15-20 éve még lehetetlennek tűntek, ma már viszonylag egyszerűen megoldhatóak. Ezek közé tartozik a numerikus időjárás-előrejelzés elkészítése is, melyben kiemelten fontos a kezdeti feltételek pontossága. A kezdeti feltételek létrehozása/pontosítása az ún. adatasszimilációs eljárás segítségével történik. Az adatasszimiláció során a modell háttérállapota alapján figyelembe vesszük a különböző forrásból származó, eltérő tér- és időbeli felbontású megfigyeléseket. Az 1. ábrán láthatjuk az ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts) modell fejlődését 1981 és 2007 között. Az ábrán az északi és a déli féltekén futtatott modellek előrejelzési bevalásait (3, 5, 7, és 10-napos előrejelzés esetében) hasonlíthatjuk össze. Látható, hogy a különbség 1981-ben még közel 15% volt, míg 2007-ben ez már alig észrevehető. A déli féltekére vonatkozó modelledmények fejlődésének nyilvánvalóan több oka is van. Az adatasszimiláció szempontjából a szárazföld és a tengerrel borított terület arányának köszönhető, hogy az északi féltekén több hagyományos megfigyelés található, mint déli féltekén. Ez részben magyarázhatja a modelledményekben a nyolcvanas években tapasztalt különbséget,

hiszen akkoriban az adatasszimiláció nagyjából csak a hagyományos megfigyelésekre hagyatkozott. Mint az a 2. ábrán látható, a kilencvenes évek közepétől egyre több műholdas megfigyelés került felhasználásra.



1. ábra: Az ECMWF globális modellje által az északi (felső vonal) és déli (alsó vonal) féltekére előállított, 3- (kék), 5- (piros), 7- (zöld), és 10-napos (sárga) előrejelzések bevételek különbsége



2. ábra: Az ECMWF modellben naponta felhasznált megfigyelések száma.

Jelen tanulmányban röviden ismertetem a műholdas adatok numerikus modellekben történő alkalmazásának nehézségeit és előnyeit. Elsőként a műholdadatokat sajátosságaira és az alkalmazott asszimilációs rendszerek bemutatására térek ki. Ezt követően ismertetem tapasztalataimat a műholdadatokat numerikus modellek analízisére és előrejelzésére gyakorolt hatásáról.

A műholdas adatok sajátosságai az adatasszimilációs eljárások szempontjából

A meteorológiai műholdak két kategóriába sorolhatók: i) a geostacionárius műholdak folyamatosan az Egyenlítő egy-egy adott pontja felett tartózkodnak, így a Földnek mindig ugyanazt az oldalát látják; ii) a poláris műholdak mozognak a Földfelszínhez képest, kb. 100 perc alatt kerülnek meg a Földet, a pólusokon át. Ezek a műholdak egyazon terület felett kb. 12 óránként vonulnak át, így a teljes földfelszín végig pásztázásához is 12 óra szükséges. A műholdak érzékelői közvetett/indirekt „méréseket” végeznek. A műszerek a légkör felső rétegén kilépő radianciát érzékelik, illetve mérik egy-egy adott frekvencia tartományban. A mért radiancia és a légköri változók (pl. hőmérséklet vagy

nedvesség) közötti összefüggés egy bonyolult egyenletrendszerrel, az ún. sugárzásátviteli egyenlettel írható le. Mivel az adatasszimilációs eljárások igénylik egy olyan operátor alkalmazását, mely a modellváltozókat a mért értékek halmazába vetíti, az alkalmazott asszimilációs eljárások nagyban meghatározhatják az elfogadható megfigyelési típusokat. A számítástechnika, valamint az alkalmazott matematikai háttér fejlettsége miatt korábban az ún. optimális interpolációs (OI) eljárás kapott szélesebb alkalmazást. Az OI egyik „gyengesége” az, hogy az eljárás során a megfigyelések és a modellparaméterek közötti összefüggés csak lineáris formában használható. Ennek ellenére az OI-t széles körben alkalmazták a kilencvenes évek közepéig, amikor a műholdas adatokat származtatott formában használták a numerikus modellekben. A 90-es évek elejétől kezdték fejleszteni a variációs asszimilációs rendszert. Kezdetben 1-dimenziós változatban, majd 3-, és végül a 90-es évek vége felé már 4-dimenziós formában alkalmazták a világ több időjárás-előrejelző központjában. A variációs módszer lehetővé teszi olyan megfigyelések beépítését is a numerikus időjárás-előrejelző modellekbe, melyek nemlineáris összefüggésben állnak a modell kontrollváltozóival. Ezáltal a műholdas radianciákat közvetlenül lehet vele asszimilálni. A radiancia adatok asszimilációja során azonban ki kell szűrni a szisztematikus hibákat, melyek részben a mérés jellegéből, részben pedig a sugárzásátviteli egyenlet megoldásából adódnak. *Harris és Kelly* (2001) kimutatta, hogy a hiba két dologtól függ: i) a mérés szkennelési szögétől; illetve ii) a légkör tömegétől. A szkennelési hiba konstansnak tekinthető, a hiba és a légkör tömege közötti összefüggés pedig prediktorok segítségével számolható. Beigazolódott, hogy a szisztematikus hibákra vonatkozó együttthatók újraszámolása /frissítése nagyon fontos, főleg a korlátos tartományú modellek (LAM) esetében. Az együttthatókat jobb az analízis során, variációs – adaptív - módon (*Auligné et al.*, 2007) számolni, mint az asszimilációs folyamattól elkülönítve és csak időközönként frissítve.

Bizonyos műholdas adatokat még napjainkban is származtatott formában asszimilálunk. Ilyenek pl. a scatterometer mérésekből számított tenger fölötti széladatok, vagy a geostacionárius műholdakból érzékelt felhők mozgásából számított széladatok (AMV). Példaként említve az AMV adatokat, melyek az alkalmazott számítási eljárásból adódnak nem igazán pontmérések, számos kérdést vet fel: Melyik mérést kell használni a magasság meghatározásánál? Melyik szint/réteg reprezentálja legjobban a felhő mozgását? Ezekre a kérdésekre egy komoly kutatócsoport keresi a választ. Munkájuknak köszönhetően évről évre finomabb AMV eredményeket kapunk.

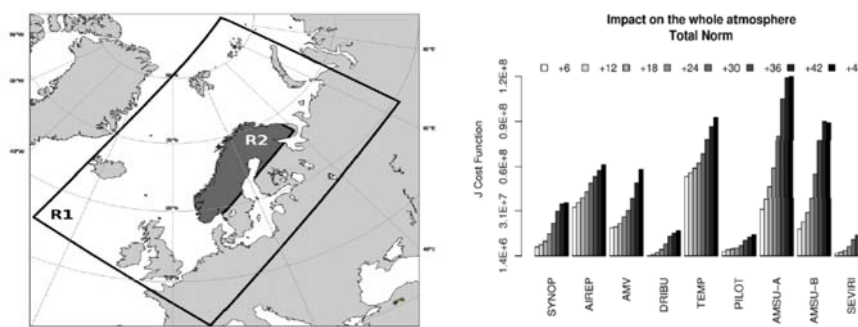
A műholdas adatok hatása az analízisre és az előrejelzésekre – saját tapasztalatok

Származtatott adatok hatása – az AMV példáján

Az AMV adatok hatásvizsgálatát az OMSZ-nál operatíván futó ALADIN LAM modellel végeztem. Ismeretes, hogy a széladatokat a globális modellekben csak a tenger fölött asszimilálják. A 2. ábrán látható, hogy az ECMWF modell nem tud sokat használni ezekből a szél adatokból a szigorú minőségellenőrzés miatt. Az adat minőségén (a minőség mutató alapján) javítani nem lehet, ugyanakkor a vizsgálatunk során kimutattuk, hogy bizonyos képből számított szelek használhatóak a szárazföld fölött is. Ezt felhasználva a globális modellekhez képest több adatot tudtunk használni, mert 160 helyett 25 km-re csökkentettük az aktív megfigyelések közötti legkisebb elfogadható távolságot. Az AMV adatok hatása az analízisre és az előrejelzésre többnyire neutrális volt, figyelemre méltó azonban, hogy a szélsőséges időjárási helyzetekben pozitív hatást tapasztaltunk.

Az ATOVS (AMSU-A, AMSU-B/MHS) radianciák hatása

A norvég ALADIN-HARMONIE LAM modell bevezetésekor megvizsgáltuk a modell előrejelzésének érzékenységét a felhasznált megfigyelésekkel szemben a relatív nedves energiaveszteség (total moist energy norm) alapján Ehrendorfer *et al.* (1999). Vizsgálatainkat különböző tartományokra (R1 és R2, 3. ábra) és magassági rétegekre terjesztettük ki. Megállapítottuk, hogy a hagyományos megfigyelések inkább a rövidtávú, míg a műholdas adatok a hosszabb távú előrejelzésekre hatnak (részletesebben lsd. Storto és Randriamampianina, 2010).



3. ábra: A norvég LAM modell tartománya (bal) és a relatív energia veszteség (jobb) különböző megfigyelési típusokra és előrejelzés hosszakra (eltérő árnyalatok) a teljes modell tartományra vonatkozóan

A IASI radianciák hatása az ALADIN-HARMONIE/NO előrejelzésére

A IASI radianciák hatását az ALADIN-HARMONIE/norvég modellre az IPY-THORPEX/norvég keretein belül tanulmányoztuk. Annak ellenére, hogy viszonylag kevés aktív csatornát használtunk, szignifikánsan pozitív hatást észleltünk, elsősorban a geopotenciális magasság, a hőmérséklet és a nedvesség előrejelzésére. Esettanulmány keretében igazoltuk, hogy a IASI adatok fontos szerepet játszanak a gyorsan fejlődő sarkköri ciklonok pontosabb előrejelzésében.

Következtetések

A műholdas adatok szerepe nemcsak a globális, hanem a korlátos tartományú modellekben is jelentős, így használatuk hozzájárulhat a gyorsan fejlődő, lokális időjárási jelenségek pontosabb előrejelzéséhez. A IASI adatok használata olyan értékes plusz információt visz az adatasszimilációs rendszerbe, amely a többi adat „hasznosságára” is hatást gyakorol.

Irodalomjegyzék

- Auligné, T., A. P. McNally, D. P. Dee, 2007. Adaptive bias correction for satellite data in numerical weather prediction. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.*, 133, 631-642.
- Ehrendorfer M, Errico RM, Raeder KD. 1999. Singular-vector perturbation growth in a primitive equation model with moist physics. *Journal of Atmospheric Sciences*, 56, 1627-1678.
- Harris, B.A. and Kelly, G., 2001: A satellite radiance-bias correction scheme for data assimilation. *Q. J. Roy. Meteor. Soc.* 127, 1453-1468.
- Storto A. and Randriamampianina R., 2010: The Relative Impact of Meteorological Observations in the Norwegian Regional Model as determined using an energy norm-based approach, *Atmos. Sci. Let. (in press)*.

Műholdas adatok használata az OMSZ rövidtávú numerikus előrejelző rendszerében

Böloni Gergely

OMSZ, Numerikus előrejelző és Éghajlat-dinamikai osztály, 1024, Bp. Kiatibel P. u. 1.,
boloni.g@met.hu

Összefoglaló – A távérzékelési technika és az adatasszimilációs módszerek fejlődésének köszönhetően a legtöbb mai numerikus előrejelző modell képes műholdas méréseket figyelembe venni a kezdeti feltételek előállításához. A műholdas adatok felhasználásának eleinte tengerek és óceánok fölött volt nagy jelentősége (főként globális modellek), mivel e területeken a hagyományos mérésekből (felszíni és rádiószondás adatok) jelentős hiány van. Napjainkra a műholdas adatok térbeli felbontása a szárazföldek fölött is meghaladja a hagyományos mérésekét, amely indokoltá teszi figyelembevételüket olyan korlátos tartományú modellekben is, amelyek nagy szárazföldi területeket fednek le. Az OMSZ-ban futtatott korlátos tartományú modell (ALADIN) adatasszimilációs rendszerében (3DVAR) is egyre több műholdas adatot használunk fel. A beszámolóban e megfigyelések előrejelzésekre gyakorolt hatását mutatjuk be.

Korlátos tartományú modellek és az adatasszimiláció

A korlátos tartományú modellek kezdeti feltételeit alapvetően kétféleképpen lehet meghatározni: a) egy nagyobb tartományú (általában globális) modell kezdeti feltételeit interpoláljuk ; b) lokális adatasszimilációt futtatunk. Az a) megoldás olcsóbb számítási szempontból, azonban kis skálájú információt nem ad a kezdeti mezőhöz csak interpolációs zajt (az interpoláció elkerülhetetlen hibája miatt). A b) megoldás meglehetősen költséges (összemérhető egy 2 napos előrejelzés költségével) azonban a modell teljes spektrumán valós meteorológiai információkat eredményez, amivel sok esetben jelentősen javíthatjuk az előrejelzést (*Gustaffson et al.*, 2001, *Lindskog et al.*, 2001, *Dévényi and Benjamin*, 2003, *Fischer et al.*, 2006).

Az ALADIN modell adatasszimilációs rendszere

Az OMSZ-ban futtatott ALADIN modell (*Horányi et al.*, 1996) kezdeti feltételei kezdetben az ARPEGE modell interpolációjával készültek, majd 2005 óta ezt egy lokális 3DVAR adatasszimiláció váltotta fel. Az asszimiláció 6 órás ciklusban fut és az 1. táblázatban felsorolt megfigyeléseket használja fel.

Observation type	Variable	Horizontal density
SYNOP surface reports	Ps, T, RH	~20-50 km
TEMP upper air reports	T, u, v, q	~200-250 km
AMDAR aircraft reports	T, u, v	25 km
Wind Profiler	u,v	~500 km
MSG/AMV	u,v	80 km
NOAA/ATOVS AMSU-A,B	Radiancia	80 km
MSG/SEVIRI	Radiancia	80 km

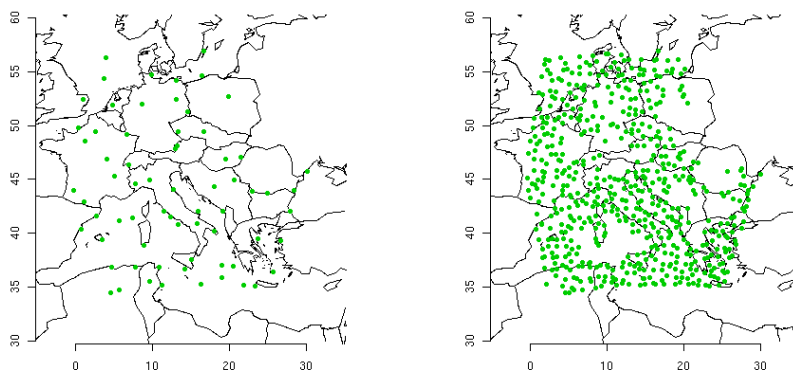
1.táblázat Az OMSZ-ban futtatott ALADIN 3DVAR asszimilációs rendszer által felhasznált megfigyelési adatok (2009 novemberi állapot)

Az OMSZ-ban futtatott operatív ALADIN 3DVAR asszimilációról részletesen *Böloni* (2006) és *Randriamampiana* (2006) cikkében olvashatunk.

Műholdas adatok elő-feldolgozása az ALADIN asszimilációban

A műholdas adatok elő-feldolgozása a következő főbb lépésekből áll az ALADIN modell esetében:

- Bias korrekció (a szisztematikus hiba szűrése): Ez két lépésből áll. Egyrészt műhold „ferde” látószögéből fakadó torzítási hibát, másrészt a sugárzás átviteli modell szisztematikus hibáját szeretnénk kiszűrni. Az utóbbi igen nehéz feladat, mivel a sugárzás átvitel a modellváltozókon keresztül erősen időjárás-függő. Éppen ezért, a korábbi konstans korrekció helyett egy adaptív korrekciós módszert használunk, amely az ECMWF-ben került kifejlesztésre (*Dee*, 2004).
- Ritkítás („thinning”): Műholdas adatok egyre nagyobb horizontális felbontásban állnak rendelkezésre, azonban a maximális felbontást az adatasszimilációban egyelőre nem tudjuk kihasználni. Ennek az a fő oka, hogy a jelenlegi módszerek nem képesek a térben korrelált megfigyelési hibák figyelembevételére, márpedig műholdas adatok esetében ilyen hibák mindenképpen fellépnek. E probléma jelenlegi feloldására olyan horizontális szűrést alkalmazunk az adatokon, hogy két szomszédos pixel megfigyelési hiba korrelációja közel nulla legyen.
- Minőség-ellenőrzés: A fenti módon szűrt adatok további minőség-ellenőrzésen esnek át, amelynek a legjellemzőbb lépése, hogy a megfigyelt értékeket összehasonlítjuk a modell értékkel (radiancia esetében a modelltől számolt szimulált radiancia) és ha azok rendkívül különböznek, elvetjük az adott megfigyelést.
- Feketelista („blacklisting”): egyes műholdas műszerek több ezer csatornán (hullámhossz-tartományon) mérnek, ezekből azonban aránylag kevés használható a numerikus modellekben. Előfordul az is, hogy valamely műszer meghibásodik a műholdakon és így egy adott csatorna hibás információkat kezd sugározni. Azokat a csatornákat, amelyeket nem szeretnénk használni, úgynevezett „feketelistára”, vagy „blacklist”-re tesszük és ezáltal figyelmen kívül hagyjuk az asszimiláció során.

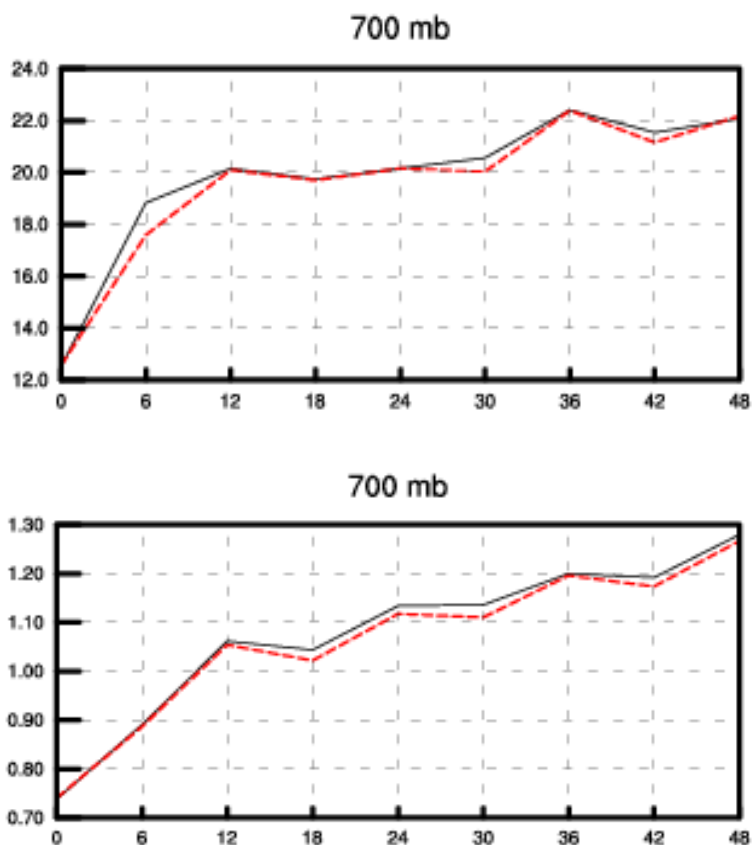


1.ábra A NOAA ATOVS/AMSU-A,B adatok tipikus sűrűsége az ARPEGE (bal) és az ALADIN (jobb) modellek asszimilációs rendszerében

Fontos megjegyezni, hogy a műholdas adatok enyhébb szűrése révén értékes kis skálájú információkat juttathatunk a korlátos tartományú modellek asszimilációs rendszerébe a globális modellekhez képest. Így például azt találtuk, hogy ha az ATOVS/AMSU-A,B adatok ARPEGE globális modellben használt 250 km-es szűrése helyett egy enyhébb, 80 km-es szűrést alkalmazunk (1. ábra) akkor javíthatunk az ALADIN modell előrejelzésén. Megjegyezzük, hogy az adatokat nem lehet tetszőlegesen sűrű (pl. maximális) felbontásban használni a megfigyelési hibák horizontális korrelációja miatt.

Műholdas adatok hatása az ALADIN modell előrejelzéseire

Az ALADIN modell asszimilációs rendszerében úgynevezett OSE (Observing System Experiment) kísérletekkel vizsgáljuk az adott megfigyelés hatását az operatív használat megkezdése előtt. Az OSE kísérlet olyan (tipikusan 1 hónapon keresztül futtatott) asszimilációs ciklus futtatását jelenti, amelyben hozzáadjuk a tesztelni kívánt megfigyelést az aktuális operatív (referencia) asszimilációs rendszerhez. A hatást, a bővített és a referencia asszimilációból indított 2 napos előrejelzések bevalásán mérjük. A bevalást többnyire az előrejelzések és a megfigyelések (vagy egy verifikációs analízis) különbségének négyzetes és szisztematikus hibáján keresztül becsüljük.



2.ábra A NOAA ATOVS/AMSU-B adatok hatása az ALADIN modell előrejelzésére. Az előrejelzés és a rádiószondás megfigyelés különbségének négyzetes (RMSE) hibája a 700 hPa nyomási szinten. Piros szaggatott: AMSU-B adatok figyelembevételével, Fekete: AMSU-B adatok nélkül. Fent: relatív nedvesség, Lent: hőmérséklet

Az OMSZ-ban 2000 óta foglalkozunk az ALADIN 3DVAR adatasszimilációval. Azóta a következő műholdas adatok kerültek operatív felhasználásra (szintén OSE kísérletek eredményeképpen):

- 2002: AMSU-A (NOAA15-17)
- 2006: AMSU-B (NOAA15-17)
- 2007: AMV (Atmospheric Motion Velocity) (MSG2)
- 2008: AMSU-A és MHS (NOAA18)
- 2009: SEVIRI (MSG2)

A fenti műholdas megfigyelések közül az AMSU-B adatok hatását illusztráljuk a 2.ábrán. Az AMSU-B asszimilációja egyértelműen javította az ALADIN modell nedvesség előrejelzéseit. A műholdas adatok ALADIN előrejelzésekre gyakorolt hatásáról bővebben *Randriamampianina* (2006) és *Montmerle et al.*, (2007) tollából olvashatunk.

Irodalomjegyzék

- Böläni, G., 2006: Development of a variational data assimilation system for a limited area model at the Hungarian Meteorological Service. *Időjárás* **110**, 309-327
- Dee, D.P., 2004: Variational bias correction of radiance data in the ECMWF system, Workshop on Assimilation of High Spectral Resolution Sounders in NWP, http://www.ecmwf.int/publications/library/ecpublications/_pdf/workshop/2004/ws_AIR_S_dee.pdf
- Dévényi, D. and Benjamin, S., 2003: A 3-dimensional atmospheric variational assimilation technique in a hybrid isentropic-sigma coordinate. *Meteor. Atmos. Phys.*, **82**, 245-254
- Fischer, C., Montmerle, T., Berre, L., Auger, L., Stefanescu, S. 2005: An overview of the variational assimilation in the Aladin/France numerical weather prediction system, *Tellus* **131**, 3477-3492
- Gustaffson, N., Berre, L., Hörnquist, S., Huang, X.-Y., Lindskog, M., Navascués, B., Mogensen, K.S., and Thorsteinsson, S., 2001: Three-dimensional variational data assimilation for a limited area model. Part I: General formulation and the background error constraint. *Tellus*, **53A**, 425-446
- Lindskog, M., Gustaffson, N., Navascués, B., Mogensen, K.S., Huang, X.-Y., Yang, X., Andrae, U., Berre, L., Thorsteinsson, S. and Rantakokko, J., 2001: Three-dimensional variational data assimilation for a limited area model. Part II: Observation handling and assimilation experiments. *Tellus*, **53A**, 447-468
- Montmerle, T., Rabier, F. and Fischer, C., 2007: Relative impact of polar-orbiting and geostationary satellite radiances in the Aladin/France numerical weather prediction system, *QJRM*, **133**, 655-671
- Randriamampianina, R., 2006: Impact of high resolution observations in the ALADIN/HU model., *Időjárás* **110**, 329-349

Az infravörös földfelszíni emisszivitás hatása a műholdas és a numerikus modell alkalmazásokra

**Borbás Éva¹, B. Ruston², S.W. Seemann¹, R. Knuteson¹, R. Saunders³, and A.
Huang¹**

Space Science and Engineering Center, University of Wisconsin, Madison, WI, USA

²NRL, Monterey, Ca, USA

³UK Met Office, Exeter, UK

A felszín emisszivitása kulcsfontosságú paraméter azokban az alkalmazásokban, amelyek fényességi hőmérséklet (forward) számításokat tartalmaznak, ilyenek például a felszíni folyamatok, a felszín-légkör kölcsönhatások, továbbá az éghajlat és az időjárás modellezése. Az emisszivitás pontos meghatározása elengedhetetlen a felszíni energia és vízháztartási számításokban is. Mivel a jelenlegi műholdas szenzorok csak korlátozott információt szolgáltatnak a felszín emisszivitásáról, így felmerült az igény egy globális, nagy spektrális és térbeli felbontású földfelszíni emisszivitási adatbázis létrehozására. Az előadásom első felében a wisconsini egyetemen kifejlesztett, MODIS méréseken alapuló, havi, globális, infravörös, földfelszíni emisszivitási adatbázist mutatom be, második felében pedig az emisszivitási adatbázis használatának szerepét, hatását a forward modellszámításokra (RTTOV), a műholdas légköri szondázásra és a IASI adatok numerikus modellben történő asszimilálására.

Műholdakról történő levegőkémiai mérések

Kocsis Zsófia

Országos Meteorológiai Szolgálat, Előrejelzési és Éghajlati Főosztály
1024 Budapest, Kitaibel Pál utca 1, e-mail: kocsis.zs@met.hu

Összefoglaló – A levegő minőségének megfigyelése egyre fontosabb szerepet kapott az utóbbi időben. A földfelszíni mérőállomások igen elszórtan helyezkednek el térben, mivel a mérések igencsak költségesek. A felszíni mérések mellett különböző modellszámításokat és egyéb méréseket is felhasználnak a levegő minőségének meghatározásához. A műholdak fejlődésének köszönhetően ma már az űrből történő mérések jól ki tudják egészíteni a felszíni méréseket.

Az EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological) létrehozott egy olyan nemzetközi munkacsoportot (Ozone and Atmospheric Chemistry Monitoring SAF, O3MSAF), mely a MetOp-A műhold mérései alapján származtat, verifikál, archivál és rendelkezésre bocsát különböző nyomgázokra, aeroszolonokra, felszíni UV sugárzásra vonatkozó adatokat. Az O3MSAF feladata olyan sugárzás-átviteli számítások és más algoritmusok kifejlesztése, melyek ezen anyagok térbeli eloszlásáról adnak információt, valamint a produktumok rendszeres előállítását és a felhasználók rendelkezésére bocsátását.

Az előadásban a teljesség igénye nélkül szeretnénk bemutatni a műholdakról történő levegőkémiai méréseket, különös figyelmet szentelve az európai MetOp-A műhold méréseire és az O3MSAF által előállított produktumokra.

Bevezetés

A légkör összetevőinek rövid- és hosszútávú változása hatással van a környezetünkre és az éghajlatra. Kimutatták, hogy a sarkok feletti sztratoszférikus ózon csökkenéséért a légkörbe jutott CFC gázok a felelősek (WMO, 2003). A troposzférikus ózon globális növekedése befolyásolja a levegőminőséget, az élővilágot (WMO, 1995). A troposzférikus ózon mellett egyéb üvegházgázok légköri mennyisége is növekedett az elmúlt években, mely az éghajlat változásához vezet (IPCC, 2007). Ahhoz, hogy ezeket a változásokat és hatásokat meg tudjuk becsülni, a légkörben lejátszódó fizikai és kémiai folyamatok megismerése szükséges. Ehhez a légköri nyomgázok mennyiségének térbeli és időbeli változásának lokális és globális skálán történő nyomon követése elengedhetetlen. Erre jó lehetőséget adnak a műholdakról történő mérések. A későbbiekben látni fogjuk, hogy a légkör alkotóinak mennyiségét ma már számos műhold/műszer méréseiből meg lehet határozni.

A légköri összetevők műholdas méréseinek elvei

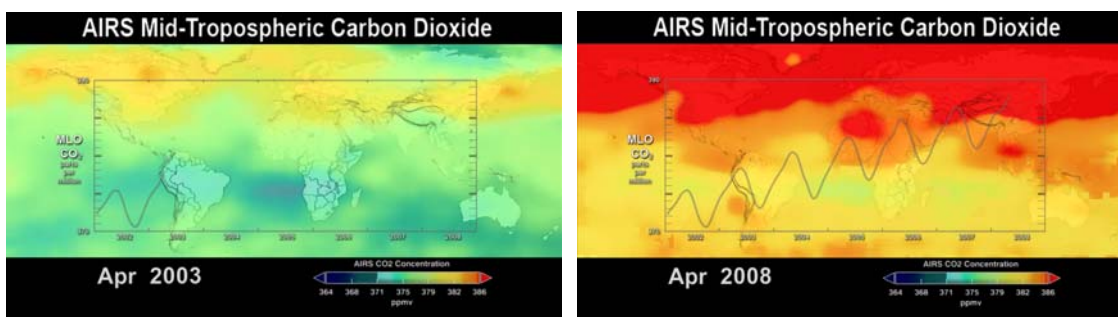
A légköri összetevők mennyiségét a műholdak nem tudják közvetlenül mérni, ezek származtatott mennyiségek. A műholdas műszerek rövid- és hosszuhullámú sugárzást mérnek, melyekből különböző algoritmusok segítségével a légköri alkotóelemek mennyisége meghatározható. Ezen módszerek általában az abszorpciós vagy emissziós spektrum elemzésén alapulnak (Gottwald et al., 2006). Az abszorpció és az emisszió

hatására olyan spektrum alakul ki a légkörben, amely az adott elnyelő/kibocsátó atomra, molekulára jellemző. Mindkét módszerhez a légkör tetején távozó sugárzás pontos ismerete szükséges.

Az emissziós spektrum azon jelekből áll, melyeket a légköri összetevők főként az infravörös és a mikrohullámú tartományokban bocsátanak ki. Ezt a légkör hőmérsékleti „ujjlenyomatának” is szokták nevezni. Az emissziós vonalak tulajdonságaiból a különböző légköri gázok mennyiségeit lehet meghatározni.

A napsugárzás abszorpciós spektrumából is meg lehet állapítani a légköri gázok mennyiségeit. A légkör elnyelési és szórási tulajdonságai meghatározhatóak, ha a légkörről visszavert és a szórt radianciákat összevetjük a naptól érkező extraterresztriális irradianciákkal. A hányadosból (Föld-légkör rendszer visszaverési spektruma) meghatározhatóak a légköri gázok mennyiségei.

Az előadásban példákon keresztül mutattuk be, hogy milyen gázokat mely műszerek/műholdak méréseiből lehet meghatározni. Az 1. ábrán az AIRS méréseiből származtatott CO₂ mennyiségekre látunk egy alkalmazást. A színekkel az AIRS mérései láthatóak a földrajzi elhelyezkedésnek megfelelően. Jól látszik, hogy az északi féltekén nagyobb koncentrációban van jelen a CO₂, mint a déli féltekén. Az ábrán folytonos vonallal egy helyen, Mauna Loa-n mért felszíni méréseket látunk. A Mauna Loa-i mérések 3,4 km-es magasságban történnek, míg az AIRS koncentrációk a 3 és 13 km-es magasságok közti átlagot mutatják. A Mauna Loa-i mérések görbéjén az évi menet figyelhető meg, melynek az északi féltekén maximuma áprilisban, májusban, minimuma pedig szeptemberben, októberben van. Ennek oka a növényzet életciklusában keresendő. A déli féltekén ez a menet kevésbé szembetűnő, hiszen ott kevesebb a szárazföld, így a növényzet is (Perkins et al., 2009).



1. ábra. Az AQUA/AIRS CO₂ mérései 2003 és 2008 áprilisában, a Mauna Loa-i (Hawaii) felszíni mérések 2003 és 2008 között (Perkins et al., 2009).

Az EUMETSAT Ózon és Levegőkémiai Munkacsoportja (O3MSAF)

Az Ózon és Levegőkémiai Munkacsoportban (Ozone and Atmospheric Chemistry Monitoring SAF) hét európai ország tíz intézete működik együtt. Az O3MSAF a MetOp-A műhold mérései alapján származtatja, verifikálja, archiválja és rendelkezésre bocsátja a különböző nyomgázok, aeroszolok, felszíni UV sugárzások származtatott mennyiségeit. A munkacsoport feladata olyan sugárzás-átviteli számításokat és más algoritmusokat kifejlesztése, melyek ezen anyagok térbeli eloszlásáról adnak információt.

Függőleges légoszlopban található össz mennyiségre vonatkozó produktumok

A munkacsoport a GOME-2 mérésekből származtat troposzférikus ózon és NO₂; valamint a függőleges légoszlopra integrált ózon (O₃), nitrogén-dioxid (NO₂), bróm-oxid (BrO), kén-dioxid (SO₂), vízgőz (H₂O), formaldehid (HCHO), klór-dioxid (ClO) mennyiségeket.

Az alaskai Kasatochi vulkán 2008. augusztus 7-ei kitörésekor SO₂ és BrO került a légkörbe, mely a légáramlatokkal szétterült. A MetOp-A GOME-2 műszere sikeresen detektálta mindkét gázt. A 2. ábra 2008. augusztus 11-én mutatja a SO₂ és BrO gázok elhelyezkedését a légkörben.



2. ábra. A MetOp-A GOME-2 műszerével detektált SO₂ és BrO gázok elhelyezkedése a légkörben 2008. augusztus 11-én (Valks, 2009). (A gázok koncentrációja a pirostól a sárgán és kéken át a liláig csökken.)

Ózon profil produktumok

Az O3MSAF-nál az ózon profil meghatározása a GOME-2 valamint az IASI méréseinek felhasználásával történik. A két műszer (GOME-2 és IASI) eltérő technikát alkalmaz a vertikális profil meghatározására: az IASI a Föld hőmérsékleti sugárzásának spektrumát méri az infravörös tartományban (3,65-15,5), míg a GOME-2 a visszavert napsugárzás spektrumát. A műszerek vertikális érzékenysége különböző az eltérő mérési módszer következtében. A GOME-2 érzékenysége a felső sztratoszférában, az IASI érzékenysége pedig a szabad troposzférában a legjobb.

Felszíni UV és aeroszol produktumok

A munkacsoport többféle UV produktumot is meghatároz. A derült és felhős égboltra vonatkozó UV indexek mellett különféle UV sugárzási dózist is számolnak. Bizonyos produktumokhoz a GOME-2 mellett felhasználgják az AVHRR adatokat is, azaz a MetOp-on található két különböző műszer adatait kombinálják.

A GOME-2 adatokból aeroszol elnyelési indexet határoznak meg. Az aeroszokra vonatkozó produktumot a közeljövőben tervezik bővíteni az aeroszol optikai mélység indexszel.

Irodalomjegyzék

- Gottwald, M., Bovensmann, H., Lichtenberg, G., Noel, S., von Bargaen, A., Slijkhuis, S., PETERS, A., Hoogeveen, R., von Savigny, C., Buchwitz, M., Kokhanovsky, A., Richter, A., Rozanov, A., Holzer-Popp, T., Bramstedt, K., Lambert, J.-C., Skupin, J., Wittrock, F., Schrijver, H., Burrows, J.P.: SCIAMACHY, Monitoring the Changing Earth's Atmosphere; DLR, 2006
- IPCC, 2007: Climate Change 2007: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [Solomon, S., D. Qin, M. Manning, Z. Chen, M. Marquis, K.B. Averyt, M. Tignor and H.L. Miller (eds.)]. *Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA*, 996 pp.
- Perkins, L., Shirah, G., Chahine, M., Pagano T., Olsen, E., Unninnayar, S. and Chen, L., 2009: Aqua/AIRS Carbon Dioxide with Mauna Loa Carbon Dioxide Overlaid. NASA/Goddard Space Flight Center and NASA/Jet Propulsion Laboratory Scientific Visualization Studio.
- Valks, P., 2009: The O3M-SAF minor trace-gas column products: GOME-2 NO₂, BrO, SO₂ and CH₂O. In *2009 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference, Bath, United Kingdom*.
- WMO 1995, "Scientific Assessment of Ozone Depletion 1994", Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 37.
- WMO 2003, "Scientific Assessment of Ozone Depletion: 2002", Global Ozone Research and Monitoring Project Report No. 47, *Geneva*.

A műholdadatok felhasználási lehetőségei a hazai levegőkémiai kutatásokban

Baranka Györgyi

Országos Meteorológiai Szolgálat Földfelszíni Megfigyelések Osztálya
1024 Budapest, Kitaibel Pál u. 1, e-mail: baranka.gy@met.hu

Összefoglaló – Az Országos Meteorológiai Szolgálatnál a műholdadatok felhasználása a légszennyezőanyagok monitoringja és modellezése területén számos új távlatot nyithat. A munkához a GOME-2 és SCIAMACHY műholdak megfigyeléseit használtuk fel, az adatokat O3MSAF produktumokból nyertük. A sikeres légszennyezettség előrejelzéséhez háromféle tevékenység - a szennyezőanyagok felszíni mérése, a levegőminőségi modellezés és a műhold megfigyelés - eredményeinek asszimilációjára van szükség. A levegőminőség előrejelzésére a CHIMERE nevezetű, Franciaországban kifejlesztett, mezoskálájú fotokémiai transzport modellt adaptáltuk. A műhold adatok alkalmazása szempontjából legfontosabb tulajdonsága, hogy 15 vertikális rétegben (nevezetesen a talajtól a 200 hPa-os szintig) képes meghatározni a szennyezőanyag koncentráció mezőket. A modell jól működő gázfázisú kémiai szubrutinnal rendelkezik, így képes többek között az ózon, a nitrogén-oxidok, szén-monoxid, kén-dioxid koncentrációinak meghatározására. A modellfuttatások eredményét - az O3M SAF produktumok között elérhető számos szennyezőanyag közül - a troposzférikus NO₂ koncentrációval vetettük össze.

Bevezetés

A légköri folyamatok tudományos megismerését a megfigyelések, a laboratóriumi kísérletek és a légköri folyamatok számítógépes szimulációja segíti. Ezen három elem kölcsönhatása lendítette előre e tudományág fejlődését és integrálta egy egésszé. A földfelszíni mérések pontosak, időben folytonosak, de értékei csak egy pontra érvényesek. A levegőkémiai megfigyeléseket hagyományosan földfelszíni mérőpontokban, esetleg obszervatóriumokban végzik vagy történhet mobil platformokról is, ezek lehetnek repülőgépek, hajók, ballonok. Földi bázisú távérzékelési eszközökkel (pl. lidar) a légköri nyomanyagok vertikális profilja meghatározható, de ezen mérések horizontális lefedettsége is korlátozott. A légköri komponensek műholdokról történő mérése egyre nagyobb teret kap. Nagy időbeli felbontású, globális képet nyújt a légszennyező anyagok terjedéséről és a kémiai folyamatokról.

A műholdadatok felhasználási lehetőségei a légszennyezőanyagok földfelszíni monitoringja területén

A légszennyezettség mérése folyhat háttér és városi körülmények között. A magyarországi háttérszennyezettségi mérőhálózat 5 állomással rendelkezik (K-pusztá, Nyírjes, Farkasfa, Hortobágy és Hegyhátsál, ahol CO₂ koncentrációt mérnek). Referencia állomásunk K-pusztá az ország közepén, Kecskeméttől nem messze található, leg hosszabb és legkiterjedtebb mérési programmal rendelkezik, amely magában foglalja a légköri gázok mérését és légköri aeroszolok kémiai összetételének meghatározását, valamint a csapadékminták kémiai analízisét is.

A műholdadatokat a légszennyezőanyagok mérése területén segíthetnek az adathiányok pótlásában, a bizonytalansági faktorok és adatok kiszűrésében, a folytonos adatsorok előállításában, segíthetik az adatok interpretálását, és a légszennyezőanyagok transzport folyamatainak megértését. A műholdról származó levegőminőségi információk – a pontszerű mérésekhez képest – nagyobb térbeli kiterjesztést tesznek lehetővé, alkalmazhatóak a trendanalíziseknél (különösen nem szignifikáns trendek esetén) és az optimális mérőhálózat megtervezésénél is felhasználhatóak. A műholdadatokat továbbá olyan távoli területekről szolgáltat információkat, ahova mérőállomások telepítése nem lehetséges.

A műholdadatokat felhasználási lehetőségei légszennyezettség előrejelzése területén

Bizonyított tény, hogy a levegőminőségre a nagy távolságú transzport is hatást gyakorol. A földfelszínen elhelyezett levegőminőségi monitorokkal a nagy távolságról érkező szennyező anyag transzport nem követhető nyomon, hiszen a szennyeződés ekkor a talajjal nem érintkező, inverziós rétegekben halmozódik fel és szállítódik (*Birmili et al.*, 2008). A légszennyező anyagok terjedésének modellezésekor a határfeltételeket nem lehet pontosan megadni felszíni mérésekből származó adatokkal. Nagymértékben pontosítja a regionális léptékű modellek eredményeit, ha a felső és oldalsó határfeltételeket műholdas légszennyezettségi mérésekből veszik (*Labrador et al.*, 2004). Így a regionális léptékű szennyezettség modellezésekor a nagytávolságról érkező transzportot is figyelembe vehetjük.

A légszennyezőanyagok modellezése területén fontos input adatok a felszíni karakterisztikák (érdesség, felszín borítottság, stb.) adatbázisainak alkalmazása. A műholdas folyamatos monitorozással segítik, hogy ezen adatbázisok naprakészek legyenek.

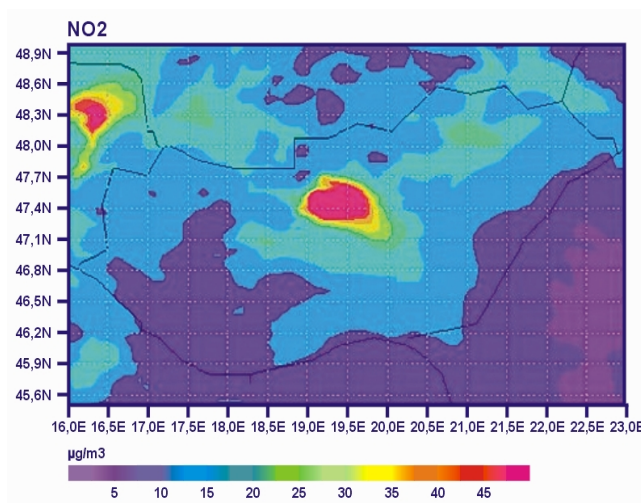
A levegőminőségi modellekkel különböző emisszió szabályozási stratégiák hatékonyságát is teszteljük, értékeljük. A minden forrás kategóriára kiterjedő, nagy tér és időbeli felbontásban rendelkezésre álló, a lehető legújabb felméréseken alapuló emissziós (természetes és antropogén) adatok a pontos légszennyezettségi előrejelzéshez elengedhetetlenek. Az emissziós adatok bizonytalansága legtöbbször abban rejlik, hogy az adatok nem napra készek. A műholdas mérések lehetővé teszik az emissziós adatbázisok gyors aktualizálását is.

Hazai modellfejlesztések eredményeinek műholdadatokkal való egybevetése

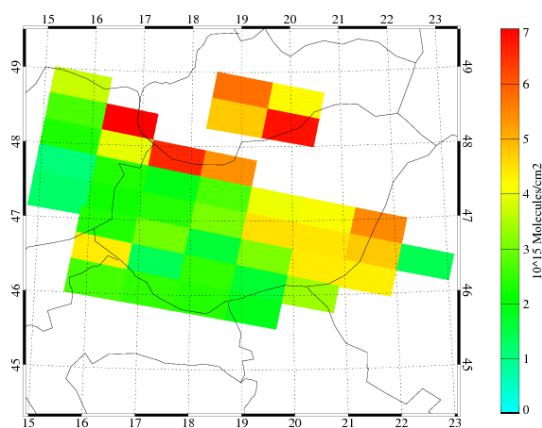
A műholdas légszennyezettségi adatok felhasználása az Országos Meteorológiai Szolgálatnál végzett, a légszennyezőanyagok monitoring- és modellezése tevékenységében számos új távlatot nyithat. A levegőminőség előrejelzésére a CHIMERE (*CHIMERE*, 2008) nevezetű, Franciaországban kifejlesztett, mezo-skálájú fotokémiai transzport modellt adaptáltuk és használjuk. A modellt a planetáris határrétegben lejátszódó légköri folyamatok leírására a Troen és Mahrt parametrizációt (*Troen and Mahrt*, 1986) alkalmazza. A műholdadatokat felhasználása szempontjából legfontosabb tulajdonsága, hogy 15 vertikális rétegben (nevezetesen a talajtól a 200 hPa-os szintig) képes meghatározni a szennyezőanyag koncentráció mezőket (*Konovalov et al.*, 2008). A modell jól működő gázfázisú kémiai szubrutinnal (MELCHIOR2) rendelkezik, így képes többek között az ózon, a nitrogén-oxidok, szén-monoxid, kén-dioxid koncentrációinak

meghatározására. A modell meteorológiai inputjait az MM5 numerikus előrejelző modellel állítottuk elő. A modellfuttatások eredményét - az O3M SAF produktumok között elérhető számos szennyezőanyag közül - a troposzférikus NO₂ koncentrációval vetettük össze, hiszen ennek a szennyezőanyagnak jelentős része a földfelszín közelében halmozódik fel (Blond *et al.*, 2007).

A számításokat 2008. december 9-10 közötti időszakra végeztük, amikor a Kárpát-medencében anticiklonális helyzet uralkodott, a légköri keveredési folyamatok nem voltak intenzívek, és ez kedvezett a szennyezőanyagok felhalmozódásának. Az 1. ábra a CHIMERE modellel számított felszíni a NO₂ koncentráció eloszlását mutatja Magyarországon 2008. december 9-én 08:00 UTC-kor (Baranka és Labancz, 2009). A magas szennyezettséggel jellemezhető terület Budapest és környékén található.



1.ábra. Számított NO₂ koncentráció eloszlás Magyarországon 2008 december 9-én 08:00 UTC-kor



2.ábra. A légoszlop teljes NO₂ tartalma O3M SAF produktumokból Magyarország felett 2008. december 9-én

A 2. ábrán a légkör troposzférikus NO₂ tartalmát tüntettük fel a vizsgált napra Magyarország felett, sajnos néhány területen adathiánnyal. A modellszámítással kapott területi eloszlással összehasonlítva megállapítható, hogy mindkét esetben az ország keleti részén, beleértve Budapest térségét is fordultak elő magasabb koncentrációk.

A jövőben megvalósítandó terveink között szerepel a műholdak által mért NO₂ és O₃ profilok asszimilációja a CHIMERE fotokémiai transzport modellbe. A fejlesztés eredményei felhasználhatóak a légszennyező modellek által készített hazai előrejelzések tökéletesítéséhez.

Légszennyezettség előrejelzések Európára

Európai léptékben számos, részben műholdadatokon alapuló, O₃-ra NO₂-re és PM-re vonatkozó előrejelzések léteznek (pl.: <http://www.gse-promote.org/index2.html> és <http://www.knmi.nl>), amelyek 72 órás előrejelzései rendszeresen elérhetőek az Interneten. A produktumok több kémiai transzport modell eredményeit, felszíni méréseket és műholdról származó levegőminőségi információkat ötvözik magukban. Az egyesített információk hozzájárulnak a pontosabb légszennyezettség előrejelzéshez.

Köszönetnyilvánítás: A bemutatott fejlesztéseket az OTKA 75500 projekt támogatta. Külön köszönet illeti Kocsis Zsófiát a műholdas NO₂ adatok bemutatásáért.

Irodalomjegyzék

- Baranka, Gy., and Labancz, K. 2009: Urban Air Quality Forecast for the City of Budapest, Hungary, *Conference on Modelling Fluid Flow (CMFF'09), The 14th International Conference on Fluid Flow Technologies*, (Editor: J. Vad) Vol. I., pp. 119-124
- CHIMERE 2008. Institut Pierre-Simon Laplace (C.N.R.S.), INERIS, LISA (C.N.R.S.)Bessagnet,
- Birmili, W., Schepanski, K., Ansmann, A., Spindler, G., Tegen, I., Wehner, B., Nowak, A., Reimer, E., Mattis, I., Müller, K., Brüggemann, E., Gnauk, T., Herrmann, H., Wiedensohler, A. Althausen, D., Schladitz, A., Tuch, T. and Löschau G. 2008: A case of extreme particulate matter concentrations over Central Europe caused by dust emitted over the southern Ukraine. *Atmos. Chem. Phys.*, **8**: 997-1016
- Labrador, L.J., von Kuhlmann, R. and Lawrence, M.G. 2004: The effects of lightning-produced NO_x and its vertical distribution on atmospheric chemistry: sensitivity simulations with MATCH-MPIC, *Atmos. Chem. Phys. Discuss.*, **4**, 6239–6281
- Konovalov, I., Beekmann, M., Vautard, R., Burrows, J., Richter, A., Nüß, H., and Elansky, N. 2005: The comparison and evaluation of modelled and GOME measurement derived tropospheric NO₂ columns over western and eastern Europe. *Atmos. Chem. Phys.*, **5**, 169-190, 2005
- Blond, N., Boersma, F., Eskes, H.J., van der A, H.R., van Roozendaal, M., De Smedt, I., Bergametti, G. and Vautard, R. 2007: Intercomparison of SCIAMACHY NO₂, the Chimère air quality model and surface observations. *JGR* **112**, 2007,
- Troen, I. and Mahrt, L. 1986: A simple model of the atmospheric boundary layer; sensitivity to surface evaporation. *Boundary-Layer Meteorol.*, **37**, 129-148

Háromdimenziós jelenségek a műholdas felhő megfigyelésekben

Várnai Tamás

University of Maryland Baltimore County, JCET
Code 613.2, NASA GSFC, Greenbelt, MD 20771, USA, e-mail: tamas.varnai@nasa.gov

Összefoglaló – A felhők és a légköri aeroszolok globális eloszlásáról alkotott képünk egyik fő forrását a légkör által visszavert napsugárzás műholdas mérései képezik. Ezekből ugyanis olyan tulajdonságokat lehet megbecsülni, mint a napsugarat visszaverő felhők víztartalma vagy a levegőben lebegő részecskék koncentrációja és mérete. Jelenleg a megfigyelések egyik fő hibaforrása az, hogy az adatok értelmezése egydimenziós elméleten alapszik, és így azt feltételezi, hogy egy adott terület fényességét teljes mértékben meghatározzák a terület felszíni és légköri tulajdonságai. Ez azért problematikus, mert háromdimenziós sugárzási folyamatok (például árnyékolás) révén az egymáshoz közeli területek befolyásolni tudják egymás fényességét. Az előadás röviden összefoglalja a háromdimenziós sugárzási folyamatokról összegyűjtött ismereteinket. Konkrétan azt tárgyalja, hogy a háromdimenziós folyamatok milyen problémákat okoznak a felhőkről, aeroszolokról, és a felhők és az aeroszolok közötti kölcsönhatásokról alkotott képünkben — és azt, hogy ezeket a problémákat hogyan lehetne orvosolni. Az előadásban tárgyalt kutatás alapvető célja, hogy segítse a műholdak alkalmazását az éghajlati rendszerről alkotott képünk pontosabbá tételében és az éghajlat modellek javításában.

Bevezetés

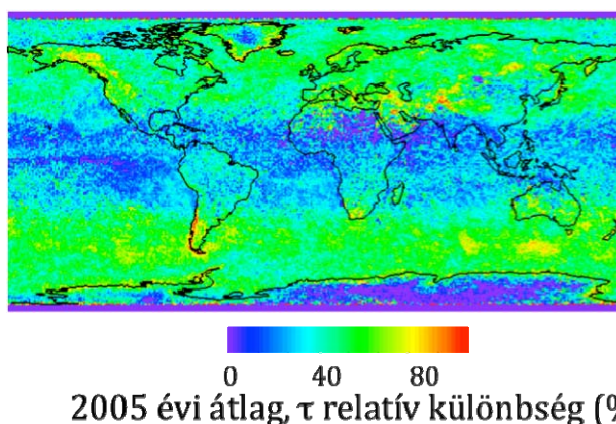
Az emberiség a Föld energiaháztartásának több elemét befolyásolja, például üvegházhatást okozó gázok (szén-dioxid, stb.) kibocsátása révén. Az emberi befolyás összetevői közül a legnagyobb bizonytalanság a kibocsátott aeroszol részecskék (pl. korom) hatását övezi. A jelenlegi ismereteink bizonytalansága igen nagy az aeroszolok napsugárzásra gyakorolt közvetlen (visszaverés és elnyelés) és közvetett hatása terén is. (Közvetett hatás alatt azt értjük, hogy az aeroszolok a felhők tulajdonságait s így a felhők által okozott napsugár-visszaverést és üvegházhatást befolyásolják.)

A légköri aeroszolok és felhők globális eloszlásáról alkotott képünk egyik fő forrását a légkör által visszavert napsugárzás műholdas mérései képezik. E műholdak segítségével ugyanis olyan tulajdonságokat lehet megbecsülni, mint a napsugarat visszaverő felhők víztartalma vagy a levegőben lebegő részecskék koncentrációja és mérete. A jelenlegi műholdas mérések egyik fő hibaforrása az, hogy az adatok értelmezése egydimenziós elméleten alapszik, és így azt feltételezi, hogy egy adott terület fényességét teljes mértékben meghatározzák a terület felszíni és légköri tulajdonságai. Ez azért problematikus, mert háromdimenziós sugárzási folyamatok (pl. árnyékolás) révén az egymáshoz közeli területek befolyásolják egymás fényességét.

Ez a cikk néhány új eredményt ismertet röviden a háromdimenziós folyamatok és az általuk okozott műholdas adatfeldolgozási nehézségek terén. A cikk elsőként a felhők, majd a felhők közelében levő aeroszolok műholdas megfigyelését tárgyalja.

Felhő megfigyelés

Az utóbbi három évtized során számos elméleti tanulmány és mérési eredmény jelezte azt, hogy a háromdimenziós folyamatok eltorzítják a felhőkről az egydimenziós közelítés segítségével kialakított képünket (pl. *Davies, 1984; Marshak et al., 1995*). A probléma egyik vetülete jól látható az *1. ábrán*, amely a Terra műhold MODIS műszerének adataival készült feldolgozást ábrázol. Az ábra azt mutatja, hogy az egydimenziós módszerrel számított optikai vastagság értékek azt a látszatot keltik, mintha a felhők nap felé forduló oldala sokkal vastagabb lenne, mint az árnyékos oldaluk. E látszat oka az, hogy az egydimenziós adatfeldolgozási módszerek azt feltételezik, hogy a felhők fényességét egyértelműen meghatározza a bennük található vízcseppek száma és mérete — és nem veszik figyelembe azt, hogy a felhők nap felőli oldala azért fényesebb, mert jobban van megvilágítva, mint az árnyékos oldal.

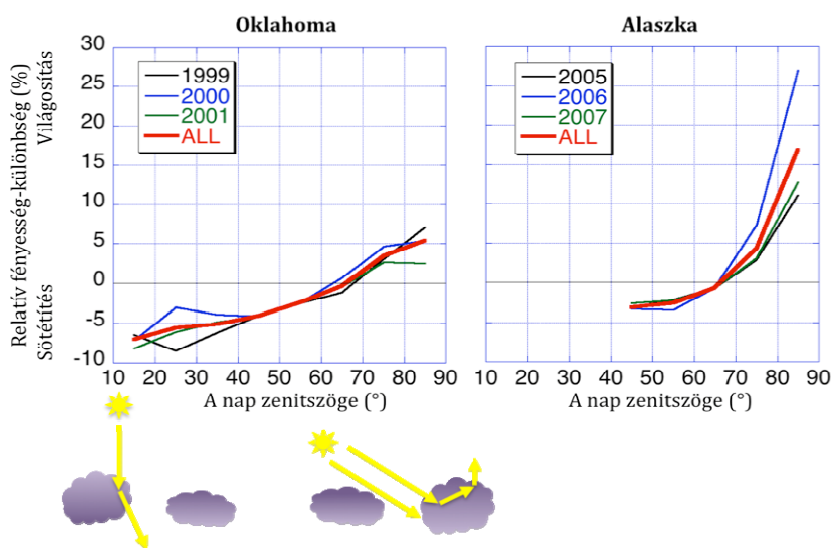


1. ábra. A felhők nap felőli es ellenkező oldalának átlagos optikai vastagsága közötti relatív különbség a MODIS műszer adatai szerint.

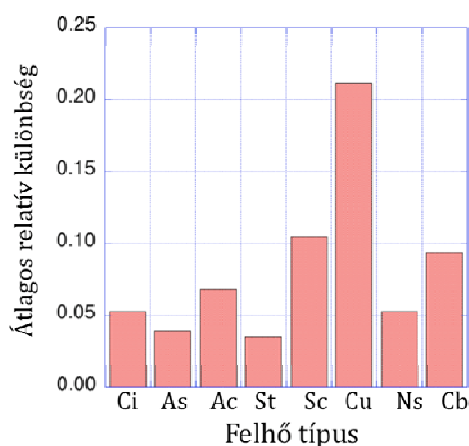
Noha az ilyen műholdadatokat egyértelműen kimutatják, hogy az egydimenziós adatfeldolgozás hibákat vét a felhők árnyékos és napos oldalán, a hibák nagy területek átlagértékeire gyakorolt hatását azonban csak szimulációk segítségével tudjuk megbecsülni. E szimulációkhoz az amerikai Energiaügyi Minisztérium Oklahomában és Alaszkában működő állomásain három év felhőmegfigyeléseit használtuk fel. A radarok és egyéb műszerek által megadott víztartalom és részecskeméret-adatok által jellemzett felhők műholdakról látható fényességét egy Monte Carlo sugárzás-átviteli modellel szimuláltuk.

Az egydimenziós és háromdimenziós szimulációk eredményeinek összevetése azt mutatja, hogy magasan álló nap esetén a háromdimenziós folyamatok csökkentik a felhők fényességét, míg alacsonyan álló nap esetén ez a tendencia a visszájára fordul (*2. ábra*). A jelenség oka az ábra alján látható. Magasan álló nap esetén sok lefelé tartó foton a felhők oldalán át felhőtlen levegőbe szóródik, ahol további felhőcseppek már nem verhetik őket vissza a műhold felé. Alacsony nap esetén viszont sok foton akkor is felhőbe ütközik, ha egydimenziós esetben két felhő között lejutna a földfelszínre.

A háromdimenziós folyamatok fontossága természetesen a felhőmezők tulajdonságaitól is függ. Például az oklahomai eredmények azt mutatják, hogy a háromdimenziós folyamatok hatása jóval erősebb a kifejezettebben strukturált, konvektív eredetű felhőfajták esetében (*3 ábra*).



2. ábra. Háromdimenziós és egydimenziós modellek által szimulált műholdas felhőfényesség mérések közötti átlagos relatív különbség.



3. ábra. Háromdimenziós és egydimenziós modellek által szimulált műholdas felhőfényesség mérések közötti átlagos relatív különbség Oklahomában megfigyelt felhőtípusokra.

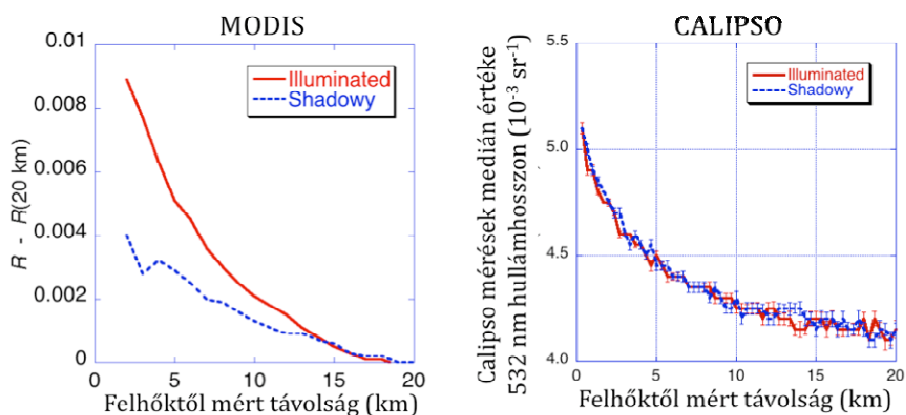
Aeroszol megfigyelés felhők közelében

Az utóbbi évek során több tanulmány is arról számolt be, hogy felhők közelében magasabb fényesség-értékek voltak megfigyelhetők (pl. *Koren et al.*, 2007). A fényesség felhőközeli magasabb értékeit több tényező is magyarázhatja, például az aeroszol részecskék méretének növekedése a felhőközeli nedves levegőben, azonosítatlan felhőcseppek jelenléte, a műholdképek műszerhibák miatti kismértékű elmosódottsága, és/vagy háromdimenziós sugárzási folyamatok.

E fejezetben az utolsó tényező jelentőségét vizsgáljuk. A háromdimenziós folyamatok fő mechanizmusa az, hogy a felhők által visszavert napsugárzás növeli a szomszédos területek megvilágítását és ezáltal fényességét. Mivel a jelenleg használatos, egydimenziós adatfeldolgozási módszerek nem veszik figyelembe a megvilágítás

növekedését, a magasabb fényesség értékeket tévesen az aeroszol koncentráció növekedésének tulajdonítják.

A fényesség növekedése jól látható az 4. ábra baloldalán, amely több száz, az Atlanti-óceán északkeleti részét ábrázoló műholdkép statisztikai feldolgozásának eredményét mutatja. A háromdimenziós szimulációk eredményeihez hasonlóan a fényesség növekedése erőteljesebb a felhők napsütötte oldala, mint az árnyékos oldala közelében. Ez az eltérés egyértelműen a háromdimenziós folyamatok hatásának tulajdonítható, mert az e hatásoktól mentes CALIPSO műhold lidar műszerének mérései azt mutatják, hogy a részecske koncentráció statisztikailag egyforma a felhők napos és árnyékos oldala közelében (4. ábra, jobboldal).



4. ábra. Műholdadatok felhők közelében. MODIS fényesség (R) átlagértékek különbsége a felhőktől 20 km távolságban mért átlagértéktől ($R(20 \text{ km})$) 470 nm hullámhosszon (balra), és CALIPSO lidar mérések 532 nm hullámhosszon (jobbra).

Konklúzió

A bemutatott eredmények azt illusztrálják, hogy a légköri sugárzási folyamatok háromdimenziós természete hibákat okoz mind a visszavert napsugárzás mérésén alapuló műholdas felhőparaméterekben, mind a felhőközeli aeroszol mennyiségében. Mivel e hibák eltorzítják az aeroszolkoncentrációra és felhőkre gyakorolt hatásáról alkotott képünket, kívánatos az olyan új adatfeldolgozási módszerek kifejlesztése, amelyek figyelembe tudják venni a háromdimenziós sugárzási folyamatok hatásait.

Irodalomjegyzék

- Davies, R., 1984: Reflected solar radiances from broken cloud scenes and the interpretation of scanner measurements. *J. Geophys. Res.*, **89**, 1259-1266.
- Marshak, A., A. Davis, W. Wiscombe, and G. Titov, 1995: The verisimilitude of the Independent Pixel Approximation used in cloud remote sensing. *Remote Sens. Environ.*, **52**, 72-78.
- Koren, I., L. A. Remer, Y. J. Kaufman, Y. Rudich, and J. V. Martins, 2007: On the twilight zone between clouds and aerosols, *Geophys. Res. Lett.*, **34**, L08805, doi:10.1029/2007GL029253.

Tűzdetektálás műholdas megfigyelésekből

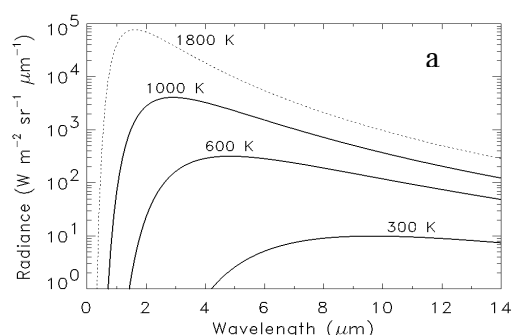
Csiszár Iván

NOAA/NESDIS Center for Satellite Applications and Research
5200 Auth Road, Camp Springs MD 20746, USA, e-mail cím: ivan.csiszar@noaa.gov

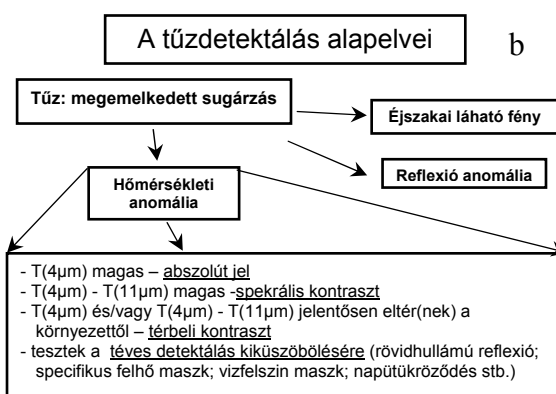
Összefoglaló – A természetes vegetáció égése és a mezőgazdasági tüzek fontos szerepet játszanak a földfelszín átalakulásában és kihatnak a levegőkörnyezet állapotára. A tüzek globális, szisztematikus megfigyelése ezért rendkívül fontos többek között a katasztrófa-elhárítás, a közegészségügy és az éghajlatváltozás szempontjából. A legújabb műholdrendszerek már szolgáltatnak olyan specifikus radiometrikus méréseket, amelyek a tüzek által kibocsátott sugárzást a korábbiaknál nagyobb pontossággal becslik. A pontos tűzinformáció egyik jelentős alkalmazása az égés folyamán kibocsátott gázok és részecskék mennyiségének becslése és terjedésének előrejelzése. A tűzadatok egyre hosszabb adatsora lehetőséget ad a tüzek előfordulásának globális és regionális elemzésére is a klímamegfigyelés és klímakutatás részeként. Ennek az alkalmazásnak különös jelentőséget ad az, hogy a tüzek előfordulása a Globális Klímamegfigyelő Rendszer egyik alapvető klímaváltozója. Napjainkban jelentős nemzetközi koordináció folyik a globális és szisztematikus tűz megfigyelés folytatásának elősegítésére mind a geostacionárius, mind a poláris műholdakból.

A műholdas tűzdetektálás fizikai alapjai és néhány fontosabb tűz megfigyelő rendszer

A távérzékeléses tűzdetektálás az égési folyamat során kibocsátott sugárzási energia azonosításán alapul. A Wien-féle eltolódási törvény alapján a tipikus láng hőmérsékletéhez tartozó feketetest-sugárzás maximuma $4 \mu\text{m}$ környékén helyezkedik el (1a. ábra). Ebben a spektrális tartományban számos műholdas érzékelő rendszer rendelkezik csatornákkal. A leghosszabb idősort a NOAA műholdak AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) műszerének $3.7 \mu\text{m}$ -es mérései szolgáltatják. Alapvető problémát jelent azonban az AVHRR, és néhány hasonló, "hagyományos" érzékelő alacsony telítési szintje, ami megakadályozza a tűz által kibocsátott, az érintetlen háttérhez viszonyítva sokszor több nagyságrenddel megnövekedett sugárzás egyértelmű azonosítását.



300K ~ földfelszín; 600K ~ parázs; 1000K ~ láng



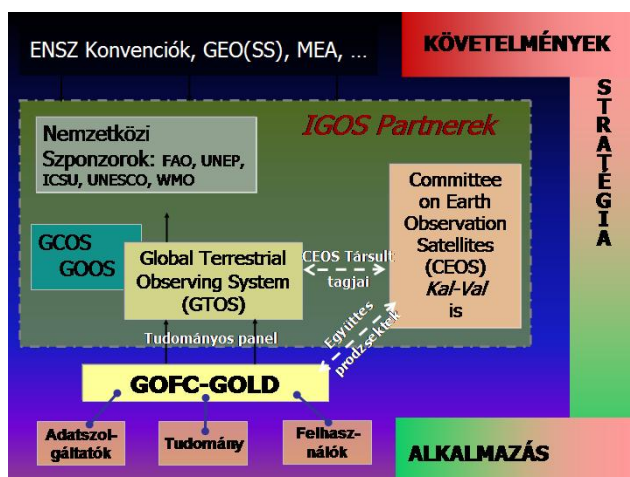
1. ábra. A Planck-függvény néhány feketetest-hőmérsékletre (a) és a műholdas tűzdetektálás alapelvei (b). A "T" szimbólum fényességi hőmérsékletet jelöl.

Döntő fordulatot jelentett a NASA Terra és Aqua műholdjainak MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) érzékelője, melynek jóval magasabb telítési

sintje az egyik 4 μm körüli csatornában, több egyéb jellemző mellett, lehetővé tette a globális műholdas tüzdetektálást a korábbinál nagyobb megbízhatósággal (Justice et al., 2002). Az általánosan elfogadott algoritmus alapja a fent leírt, megnövekedett sugárzási-áram elkülönítése a nem égő területek által kibocsátott sugárzásáramtól, mind spektrális, mind térbeli kontrastok alapján (pl. Giglio et al., 2003; 1b. ábra).

Nemzetközi koordináció

A globális, szisztematikus tüzmegfigyelés nagymértékű nemzetközi koordinációt igényel (2. ábra). Az ENSZ klímaváltozással foglalkozó szervezetei és az őket támogató tüzőkológiai és klimatológus tudományos közösségek hosszútávú, nagy pontosságú, homogén adasorokat igényelnek. A katasztrófa-elhárítási és erdészeti alkalmazások az adatok gyors elérhetőségét igénylik, esetenként a pontosság rovására. A MODIS által detektált tüzek helye és időpontja például napjainkban könnyen elérhető rövid időn belül többek között a FIRMS (Fire Information for Resource Management System) internetes rendszeren keresztül (Davies et al., 2009). A magas szinten meghatározott követelmények kielégítésére szolgáló stratégiákat nemzetközi szervezetek, mint például a Globális Felszínmegfigyelő Rendszer (GTOS) fejlesztik ki.



2. ábra. A különböző nemzetközi koordinációs programok rendszere

A globális tüzmegfigyelések megvalósítását a GOFC-GOLD (Global Observation of Forest and Land Cover Dynamics) program végzi. A műholdas megfigyelések szempontjából fontos az adatok validációja is nagyobb felbontású műholdas, vagy repülőgépes megfigyelésekkel (Csiszar et al., 2006), illetve a folytonos, tüzdetektálásra

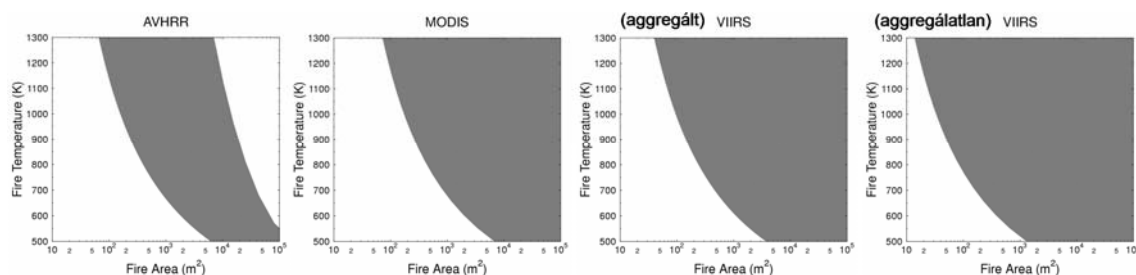
alkalmas megfigyelőrendszerek biztosítása az űrügynökségek által. Ez utóbbiakban a legfontosabb szerepet a CEOS (Committee on Earth Observation Satellites) és a CGMS (Coordination Group for Meteorological Satellites) játsszák.

A tűz mint alapvető klímaváltozó

Az utóbbi évtizedben egyre több figyelem fordult a globális tűzaktivitásra, és tüzek szerepére a globális klímarendszerben. Ennek egy fontos megnyilvánulása az, hogy a Globális Klímamegfigyelő Rendszer (GCOS) a tűzaktivitást, mint az egyik alapvető klímaváltozót (Essential Climate Variable; ECV) jelöli meg (GCOS, 2004). A GCOS Implementációs Terve és annak műholdas megfigyelésekre vonatkozó kiegészítő dokumentumai (GCOS, 2006) konkrét követelményeket jelölnek meg minden ECV kapcsán. A követelmények megvalósíthatóságának elemzését a CEOS szakbizottságai végzik

(CEOS, 2006). Napjainkban a GCOS új Implementációs Tervet készít, melynek kifejlesztésében a fentiekben leírt nemzetközi koordinációs szervezetek is részt vesznek.

A tűz ECV három paraméterből áll: égett terület, aktív tűzdetektálás és kisugárzott tűzenergia (Fire Radiative Power). Az aktív tűzdetektálási adatok folytonosságának, és az idősorok homogenitásának biztosítása nagy kihívást jelent (GTOS, 2009a), mivel a detektálható tüzek mérete, és ezen keresztül az adatbázisokban megjelenő detektált tüzek száma nagymértékben függ az érzékelő pixelméretétől (3. ábra).



3. ábra. Az AVHRR (~1x1km), a MODIS (~1x1km) és a VIIRS aggregált (~750x750m) és aggregálatlan (~250x750m) üzemmódja által detektálható tüzek, a méret és hőmérséklet függvényében. A szürke területek 90%-os valószínűségű detektálást jelölnek.

A tűzveszély és a tüzek környezeti hatásainak elemzése

A tüzek problémaköre jóval tágabb a tüzek detektálásánál, és előfordulásuk térbeli és időbeli dinamikájának elemzésénél. Foglalkozni kell a tüzek előfordulásához vezető környezeti folyamatokkal, illetve a tüzek utólagos, közvetlen és közvetett hatásaival. Ezek a feladatok további műholdas adatok alkalmazását is igénylik.

A tűzveszély előrejelzése, mind katasztófaelhárítási, mind éghajlati szempontból, a meglévő biomassza mennyiségének, minőségének és állapotának ismeretét igényli a levegőkörnyezeti állapotok mellett. A biomassza mennyiségének becslése közvetett módon lehetséges a növénytakaró optikai adatokkal történő osztályozása által. Közvetlen becslések azonban csak aktív távérzékelő rendszerekkel (radar, lidar) lehetséges (GTOS, 2009b). A növényzet nedvességtartalmának becslése specifikus spektrális tartományokban történő méréseket igényel, melyek legtöbbször csak hiperspektrális műszerekkel nyerhetők.

A tüzek által kibocsátott gáz- és részecske emisszió becslésére két módszer áll rendelkezésre. Az egyik, immár hagyományosnak tekinthető eljárás az égett terület és az ott található növényzet mennyisége és állapota alapján szolgáltat becslést (pl. de Groot et al., 2007). Az újabb módszer a sugárzási tűzenergia és az emisszió között megfigyelt kapcsolaton alapul (pl. Ellicott et al., 2009). Fontos megjegyezni azonban, hogy az FRP számításához telítetlen mérésekre van szükség, ami csak a MODIS megjelenése óta lehetséges. Specifikus spektrális megfigyelések lehetővé teszik az égés súlyosságának becslését is, tovább finomítva ezáltal az emisszió becslését is.

Néhány jövőbeli operatív és kísérleti megfigyelő rendszer

Az előzőekben tárgyalt megfigyelési követelmények kielégítésére számos új érzékelő rendszer üzembe állítása várható az elkövetkező évtizedben. Az Egyesült Államok új generációs operatív környezeti műholdjain mind a poláris NPP/NPOESS VIIRS (Visible Infrared Imager Radiometer Suite), mind a geostacionárius GOES-R ABI (Advanced Baseline Imager) szolgáltat majd tűzdetektálásra alkalmas méréseket. Hasonló méréseket szolgáltatnak majd az ESA GMES Sentinel-3 és a EUMETSAT Meteosat Third Generation érzékelői is. Különös fontossággal bír azonban az a tény is, hogy az új generációs kísérleti műholdrendszerek, mint például a NASA Decadal Survey radar, lidar és hiperspektrális missziói (DESDynI, HypsIRI), várhatóan lehetővé teszik majd a biomassza és a növényzet állapotának globális, szisztematikus térképezését, és ezáltal a globális tűzaktivitás részletesebb nyomonkövetését is.

Irodalomjegyzék

- CEOS, 2004: Satellite Observations of the Climate System – The Committee on Earth Observation Satellites (CEOS) Response to the Global Climate Observing System (GCOS) Implementation Plan (IP). <http://www.ceos.org/>.
- Csiszar, I., J. Morisette and L. Giglio, 2006: Validation of active fire detection from moderate resolution satellite sensors: the MODIS example in Northern Eurasia. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **44**, 1757-1764.
- Davies, D.K., Ilavajhala, S., Wong, M.M., and Justice, C.O. 2009: Fire Information for Resource Management System: Archiving and Distributing MODIS Active Fire Data. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, **47**, 72-79.
- de Groot, W.J., Landry, R., Kurz, W., Anderson, .K.R., Englefield, P., Fraser, R.H., Hall, R.J., Banfield, E., Raymond, D.A., Decker, V., Lynham, T.J. and Pritchard, J. 2007: Estimating direct carbon emissions from Canadian wildland fires. *Int. J. Wildland Fire*, **16**, 593-606.
- Ellicott, E., E. Vermote, L. Giglio, and G. Roberts, 2009: Estimating biomass consumed from fire using MODIS FRE. *Geophys. Res. Lett.*, **36**, L13401, doi: 10.1029/2009GL038581.
- GCOS, 2004: Implementation Plan for the Global Observing System for Climate in Support of the UNFCCC, GCOS-92.
- GCOS, 2006: Systematic Observation Requirements for Satellite-based Products for Climate - Supplemental details to the satellite-based component of the GCOS Implementation Plan, GCOS-107
- GTOS, 2009a: Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables: Fire Disturbance. GTOS 68, <http://www.fao.org/gtos/topcECV.html>
- GTOS, 2009b: Assessment of the status of the development of the standards for the Terrestrial Essential Climate Variables: Biomass. GTOS 68, <http://www.fao.org/gtos/topcECV.html>
- Giglio, L., Descloitres, J., Justice, C.O., Kaufman, Y. 2003. An enhanced contextual fire detection algorithm for MODIS. *Remote Sens. Environ.*, **87**, 273-282.
- Justice, C.O., Giglio, L., Korontzi, S., Owens, J., Morisette, J.T., Roy, D.P., Descloitres, J., Alleaume, S., Petitcolin, F., Kaufman, Y. 2002: The MODIS fire products. *Remote Sens. Environ.*, **83**, 244-262.

A földfelszín és a növényzet megfigyelése műholdakról

**Fassang Ágnes, Kocsis Zsófia, Kern Anikó, Barcza Zoltán,
Bartholy Judit, Pongrácz Rita**

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Meteorológiai Tanszék;
Országos Meteorológiai Szolgálat

Az éghajlat és annak megváltozása jelentősen befolyásolja a szárazföldi vegetáció állapotát, produktivitását. Kutatások rámutattak, hogy az utóbbi évtizedekben a vegetációs időszak meghosszabbodott a mérsékelt övben, vagyis a növényzet számára hosszabb termőidőszak áll rendelkezésre. A növényzet is visszahat az éghajlatra, mivel a növények igen fontos szerepet játszanak a légkör nedvesség-, hő- és szén-dioxid forgalmában, és alapvetően meghatározzák a felszín albedóját. A kölcsönhatás a bioszféra és a légkör között elengedhetlenné teszi a meteorológus közösség számára a növényzet állapotának folyamatos vizsgálatát, melynek egyik módja az űrbázisú megfigyelések alapján készített produktumokban rejlik.

Az EUMETSAT (European Organisation for the Exploitation of Meteorological Satellites – Meteorológiai Műholdak Hasznosításának Európai Szervezete) a földfelszín műholdakról történő megfigyelésének elősegítésére hozta létre az LSA SAF-ot (Land Surface Analysis Satellite Applications Facility), azaz Földfelszín Megfigyelés Munkacsoportot. A munkacsoport fő feladata, hogy az MSG és a MetOp műholdak adataiból olyan produktumokat, algoritmusokat fejlesszen ki, melyek információt szolgáltatnak a földfelszínről és a felszín-légkör kölcsönhatásokról.

Az ELTE Meteorológiai Tanszéken folyó kutatások keretében a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) műholdak AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) szenzorából származtatott NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) 20 éves adatsorának (az ún. Pathfinder adatbázisnak) korrekcióját és vizsgálatát mutatjuk be. A korrekció során a földrajzi helymeghatározás pontatlanságának helyreállítása, illetve a téli hibás adatok kiszűrése után két korrekciós algoritmus (Best Slope Index Extraction és Mean-Value Iteration) Kárpát-medencére történő adaptálását végeztük el. Az idősor vizsgálatok során a tenyészidőszak hosszabbodását figyelhetjük meg hazánk térségében is és felfigyelhetünk az NDVI növekvő tendenciára, amely a globális felmelegedés hatására bekövetkező „zöldülési folyamat” része, és a vegetáció nagyobb szénmegkötését sejteti.

A városi hősziget vizsgálata MODIS és ASTER mérések felhasználásával

Dezső Zsuzsanna, Bartholy Judit, Pongrácz Rita

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet, Meteorológiai Tanszék
1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A.
tante@nimbus.elte.hu, bari@ludens.elte.hu, prita@nimbus.elte.hu

Összefoglaló – A városi környezet egyik jellegzetes ismertetője a városi hősziget-jelenség. Ennek részletes elemzéséhez távérzékeléssel nyert műholdképeket használtunk fel. Kutatásainkban az amerikai NASA által felbocsátott Terra és Aqua műholdak MODIS, illetve ASTER szenzorai által detektált sugárzási értékekből számított földfelszíni hőmérsékleteket használtuk fel. Ezek segítségével hazánk és a környező régió nagyobb városaira vonatkozóan meghatároztuk a városi hőszigetek intenzitását, térbeli szerkezetét és időbeli változásait.

A vizsgált városok hősziget-intenzitása változatos képet mutat. A városi és városkörnyéki területek havi átlagos felszínhőmérséklet-különbsége 1 °C és 6 °C között alakul, a legintenzívebb hősziget nappal, a nyári időszakban figyelhető meg, míg a legkevésbé intenzív hősziget a tavaszi és őszi hónapokban fordul elő. A havi átlagos értékek éves változékonysága nappal sokkal jelentősebb mértékű, mint éjszaka. Az elemzések során kapott eredmények segítik az általános városrendezési szempontok kialakítását, melyek jelentősége a globális klímaváltozás hatására a jövőben várhatóan fokozódik.

Bevezetés

Már közel két évszázada ismert tény, hogy egy városi térség és annak környezete között hőmérsékleti különbség áll fenn, amit a kutatók városi hősziget-jelenségnek neveztek el. A városi hőszigetet intenzitásával jellemezhetjük, ami a városi és városkörnyéki hőmérséklet különbségeként definiálható. A műholdas adatoknak a városklimatológiában való alkalmazására az 1970-es évektől kezdve, a nagy felbontású műholdak megjelenésével nyílt lehetőség. Az első ilyen vizsgálatok még durva felbontású műholdképeket (8-10 km/pixel) használtak. Már ekkor bebizonyosodott, hogy derült égbolt esetén a műholdak alkalmasak a városi hősziget észlelésére, a hősziget változásainak vizsgálatára (Matson et al., 1978).

A műholdak felbontásának javulásával lehetővé vált a városi hősziget szerkezetének részletesebb feltárása. Az ELTE Meteorológiai Tanszékén kilenc éve folyó kutatásaink keretében hazánk tíz legnagyobb városára (Budapest, Debrecen, Miskolc, Szeged, Pécs, Győr, Nyíregyháza, Kecskemét, Székesfehérvár, Szombathely), valamint Közép-Európa kilenc nagyvárosára (Bukarest, Varsó, Bécs, Milánó, München, Prága, Szófia, Belgrád, Zágráb) vonatkozóan végeztünk átfogó városklimatológiai vizsgálatokat. Finom felbontású műholdas felszínhőmérsékleti adatok felhasználásával tanulmányoztuk a városi hősziget sajátosságait (pl. Dezső et al., 2005; Pongrácz et al., 2006).

Adatok és módszerek

A NASA Földmegfigyelő Rendszerének részeként 1999 decemberében bocsátották pályára a Terra, majd 2002 májusában az Aqua nevű műholdat. A Terra fedélzetén

öt, az Aqua fedélzetén hat műszer található (Terra, 1999; Aqua, 2002). Kutatásaink során a mindkét műholdon megtalálható MODIS szenzor méréseiből meghatározott – 1 km-es térbeli felbontású – felszínhőmérsékleti, felszínborítottsági és vegetációs index adatsorokat, valamint a Terra műholdon lévő ASTER szenzor méréseiből meghatározott – 90 m-es felbontású – felszínhőmérsékleti adatokat használtuk fel. Ezek az adatok a Land Processes Distributed Active Archive Center, azaz a földfelszíni folyamatok adatainak aktív archiváló központján keresztül érhetők el. Vizsgálataink a Terra/MODIS adatok esetében a 2001. január 1. és 2008. december 31., az Aqua/MODIS adatok esetében a 2003. január 1. és 2008. december 31. közötti időszakra terjedtek ki. Így a 2001-2002 közötti időszakban napi kettő, ezt követően pedig napi négy mérés állt rendelkezésünkre.

Az adatgyűjtést, valamint a hibás, felhős képek kiszűrését követően meghatároztuk, hogy az egyes városok a műholdfelvételeken pontosan hol helyezkednek el, majd a teljes adatbázisból leválasztottuk a városokat és azok környékét tartalmazó kivágatokat. A kivágat mérete Budapest és a közép-európai nagyvárosok esetében 65×65, a többi magyarországi nagyváros esetében 30×30 pixel. Az adatfeldolgozás következő lépése a városi és városkörnyéki képpontok meghatározása volt, amihez felhasználtuk a MODIS felszínborítottsági adatbázist, a Google Earth műholdkép-adatbázist, valamint a GTOPO30 Digitális Terepmodellt.

Az így kapott pontok felszínhőmérsékleti adatainak felhasználásával minden városra és időpontra meghatároztuk a városi és városkörnyéki átlaghőmérsékletet, melyek különbsége adja a városi hősziget intenzitását. E paraméterek felhasználásával tanulmányoztuk a hősziget, valamint a különböző felszíni és meteorológiai paraméterek kapcsolatát, a hősziget napszaktól, évszaktól és városmérettől való függését, továbbá annak szerkezetét és keresztmetszetét.

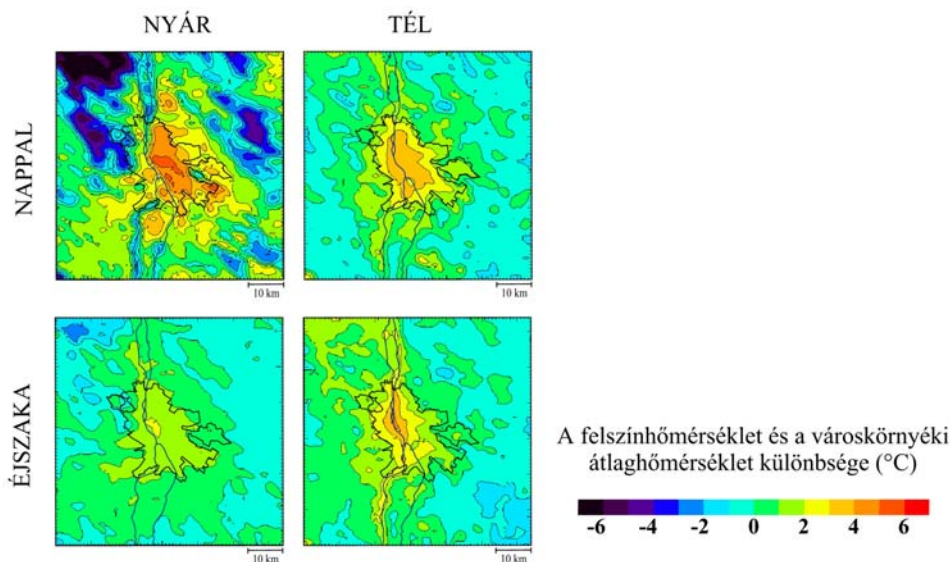
Eredmények

Vizsgálataink során mindegyik hazai és közép-európai nagyváros esetében meghatároztuk a hősziget évszagos átlagos szerkezetét a délelőtti, délutáni, esti és hajnali áthaladási időpontra vonatkozóan. A hősziget időbeli változásainak detektálása céljából kiszámítottuk a városok fő égtájak menti keresztmetszetei mentén található képpontok felszínhőmérsékleti értékeinek és a városkörnyéki átlaghőmérséklet különbségének havi átlagát, majd vizsgáltuk ennek idősorát 2001-2008 között. További elemzéseinkben Budapest XI. kerületére vonatkozóan összevetettük a finom felbontású ASTER felszínhőmérsékleti adatokat a különböző felszíni objektumokkal (betonépületek, parkok, irodaházak, hegyek, stb.).

A műholdas felszínhőmérsékleti mérések egyedülálló lehetőséget nyújtanak a városi hősziget térbeli szerkezetének részletes feltárására. Példaként a budapesti városi hősziget szerkezetét mutatjuk be az **1. ábrán**. Az ábrákon az egyes képpontok hőmérsékletének a városkörnyéki átlaghőmérséklettől vett eltéréseinek nyári és téli évszagos átlaga látható nappal és éjszaka, amit a délelőtti (Terra) és délutáni (Aqua), illetve az esti (Terra) és hajnali (Aqua) adatoknak a mérések száma szerint súlyozott átlagaként határoztunk meg.

A nappali mezőket vizsgálva megállapíthatjuk, hogy a városi hősziget magja a főváros pesti oldalán, a belváros területén helyezkedik el. A nyári időszakban a hősziget

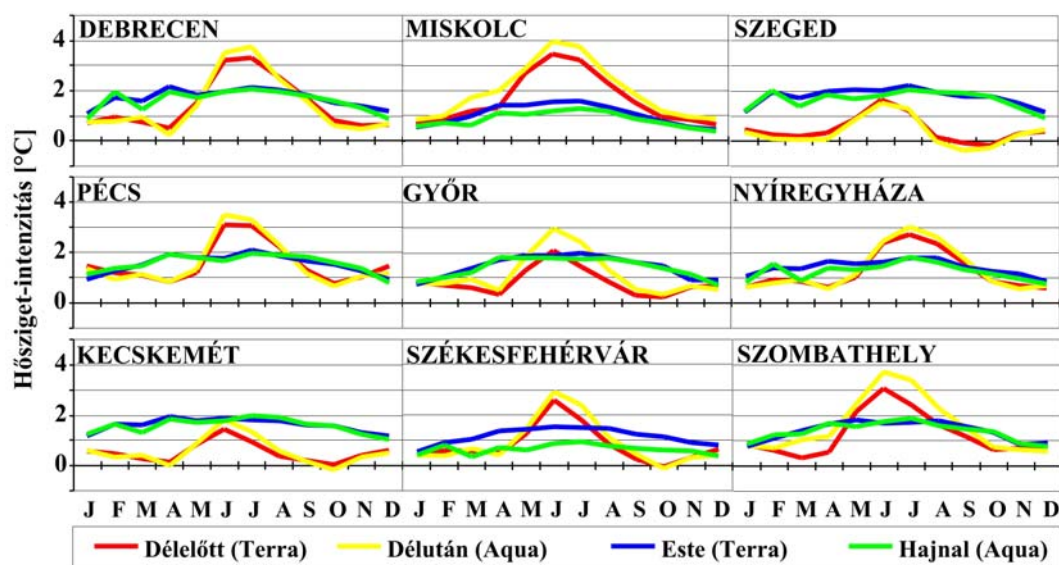
kiterjedése és intenzitása is jelentős: a városkörnyéki átlaghőmérsékletet nyáron 4-6 °C-kal meghaladó terület a fővárosnak szinte az egész pesti részére kiterjed. A budai oldalon a hősziget csak kisebb területet fed le, itt a domborzat, valamint a zöldfelületek nagyobb aránya mérsékli a városi hősziget erősségét. A téli időszakban nappal a hősziget erőssége a belvárosban 2-3 °C között alakul. Az éjszakai órákban a hősziget szerkezete jelentősen eltér a nappalitól: a főváros szinte teljes területén pozitív hőmérsékleti anomália jelenik meg, a hősziget centruma pedig a budai és pesti oldalra egyaránt kiterjed.



1.ábra. A városi hősziget átlagos szerkezete Budapest térségében nyáron és télen

Hazánk és Közép-Európa többi nagyvárosára vonatkozóan is elvégeztük a fenti vizsgálatot. A legtöbb város esetében mindegyik évszakban és napszakban megjelenik a hőmérsékleti többlet a város területén, ennek mértéke azonban városonként változó.

A **2. ábra** a magyarországi nagyvárosok havi átlagos intenzitásának éves menetét mutatja be. A havi átlagokat a délelőtti és esti (Terra) mérések esetén a 2001 és 2008 közötti, míg a délutáni és hajnali (Aqua) mérések esetén a 2003 és 2008 közötti időszakra átlagoltuk, súlyozva az egyes években rendelkezésre álló adatok száma szerint. A délelőtti és délutáni görbék maximuma mindenhol a nyári időszakra esik. A nappali görbék a legtöbb esetben két minimummal rendelkeznek: a március-áprilisi, illetve az október-novemberi időszakban a legalacsonyabb a városi és városkörnyéki átlaghőmérséklet különbsége. Az esti és hajnali görbék éves menete kisebb amplitúdójú, mint a nappaliaké. Itt is nyáron a legnagyobb a hősziget intenzitása, viszont a minimum decemberben és januárban fordul elő. Ha az intenzitás menetét különböző napszakokban összehasonlítjuk, megállapíthatjuk, hogy a délelőtti és délutáni, illetve az esti és hajnali görbék páronként nagyjából párhuzamosan futnak. A legtöbb városban a délutáni átlagos hősziget-intenzitások néhány tizedfokkal meghaladják a délelőtti értékeket. Az esti és hajnali intenzitás-átlagok közül az estiek általában magasabbak, de a különbség legfeljebb 0,1-0,2 °C.



2. ábra. A városi hősziget havi átlagos intenzitásának sokéves átlaga Magyarország nagyvárosaiban

Összefoglalás

Az emberi tevékenység természetére gyakorolt hatásának egyik fontos megjelenési formája a városi hősziget. E jelenség tanulmányozására többféle elfogadott eljárás létezik, ezek egyike a műholdas sugármérésekből meghatározott felszínhőmérséklet felhasználásán alapuló módszer. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszékén kilenc évvel ezelőtt kezdődött meg az a kutatási program, aminek keretében komplex módszert dolgoztunk ki a magyarországi és közép-európai nagyvárosok hősziget-jelenségének felszínhőmérsékleti méréseken alapuló vizsgálatára, és elvégeztük azok részletes elemzését.

Kutatásaink hosszabb távú célja a városklíma-kutatások eredményeinek gyakorlati alkalmazása az építészeti, városrendezési tervek készítésében, a különféle szabályozások megalkotásában, hisz ezek felhasználásával elő lehetne segíteni a városi ember életterének komfortosabbá tételét.

Irodalomjegyzék

- Aqua, 2002: Science writers' guide to Aqua. NASA Goddard Space Flight Center, Earth Observing System Project Science Office, Greenbelt, 40p.
- Dezső Zs., Bartholy J., Pongrácz R., 2005: Satellite-based analysis of the urban heat island effect. *Időjárás*, 109 (No. 4.), pp. 217-232.
- Matson, M., McClain, E. P., McGinnis, D. F., Pritchard J. A., 1978: Satellite detection of urban heat islands. *Monthly Weather Review*, 106, pp. 1725-1734.
- Pongrácz R., Bartholy J., Dezső Zs., 2006: Remotely sensed thermal information applied to urban climate analysis. *Advances in Space Research*. 37 (No. 12.), pp. 2191-2196.
- Terra, 1999: Science writers' guide to Terra. NASA Goddard Space Flight Center, Earth Observing System Project Science Office, Greenbelt, 27p.

Városi hőszigeteti mező modellezése légi felszínhőmérsékleti mérések alapján

Unger János¹, Gál Tamás¹, Rakonczai János², Mucsi László², Szatmári József²,
Tobak Zalán², Boudewijn van Leeuwen², Fiala Károly³

¹SZTE TTIK Éghajlattani és Tájföldrajzi Tanszék, 6722 Szeged, Egyetem u. 2, e-mail: unger@geo.u-szeged.hu ²SZTE TTIK Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, 6722 Szeged, Egyetem u. 2.
³Alsó-Tiszavidéki Környezetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség, 6720 Szeged, Stefánia 4.

Összefoglaló – A tanulmány egy olyan módszert mutat be, amely a városi, kora esti léghőmérsékleti mező eloszlását modellezi felszínhőmérsékleti adatok segítségével, mely adatokat repülőgépre telepített termális kamera 2 m-es felbontású felvételei szolgáltatták. A termális értékek kalibrálása a különböző városi felszínre egyidejűleg elvégzett közvetlen felszínhőmérsékleti mérések alapján, a képek georeferálása, összeillesztése és kiértékelése GIS módszerekkel történt. A felvételezéssel párhuzamosan mobil léghőmérséklet mérésekre is sor került egy 12 km hosszú városi keresztmetszet mentén. 500 m-es sugarú forrásterületet választva, igen szoros kapcsolat mutatkozott a két termális parameter között, vagyis a felszínközeli levegőelem hőmérsékletét a környezetében lévő felszíni elemek (távolsággal súlyozott) hőmérséklete döntő mértékben meghatározza. A kapcsolatot leíró regressziós egyenlet segítségével modellezhetővé vált a kiterjedt városi terület léghőmérsékleti mezejének területi eloszlása.

Bevezetés

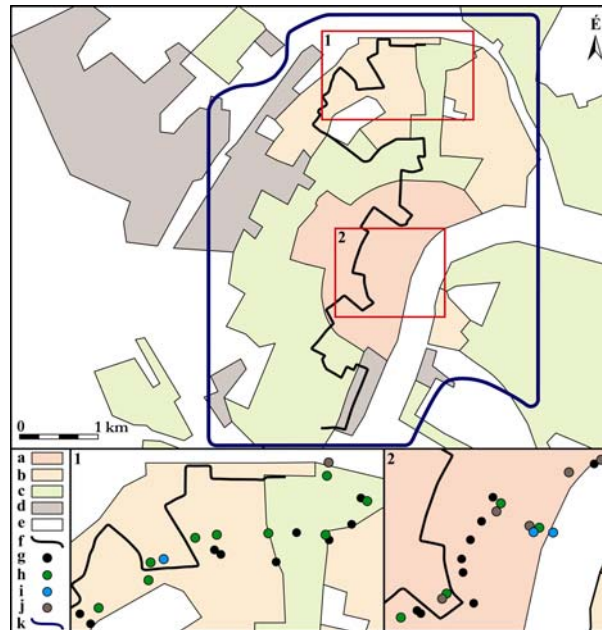
A városi felszínhőmérséklet (T_s) meghatározása nehéz a város-légkör közötti határfelület igen összetett geometriája miatt. Mérése távérzékeléssel, indirekt módon történik, általában a felületekről kiinduló – azok hőmérsékletét tükröző – infravörös sugárzást érzékelő kamerákat használnak. Nagyobb kiterjedésű városi felszín tanulmányozása során repülőgépre vagy műholdra szerelve alkalmazzák. A házak között lévő levegő hőmérsékletét (T_a) a városi felszín számos összetevőjének (pl. utak, tetők, falak, lombkoronák) felszínhőmérséklete befolyásolja (*Voogt and Oke, 1998*).

Kutatásunk arra irányul, hogy e kapcsolatrendszerben a felszínközeli levegő hőmérsékletét kialakító hatásterületet vizsgáljuk, feltételezve, hogy a hatásterület megfelelő kiválasztásával a kétféle hőmérséklet között kimutatható lesz egy statisztikailag megalapozott kapcsolat. E hatás- vagy forrásterület az, amelyben az ott lévő elemek fizikai sajátosságainak és a külső hatásokra adott válaszreakcióinak (felmelegedés-lehűlés, turbulens folyamatok generálása) összehatásaként kialakul az adott levegőelem hőmérséklete. Célunk, hogy két nyári este (2008. aug. 12. és 14.) adatai alapján (i) a különböző hatásterületek figyelembevételével feltárjuk a köztük lévő kapcsolatokat, majd (ii) a feltárt kapcsolat segítségével mindkét napra előállítsuk a léghőmérsékleti mezőt egy nagyobb városi területre.

Vizsgált terület, időjárási helyzet, módszerek

A vizsgált város, Szeged, kifejezetten alkalmas a módosult városi éghajlat tanulmányozására, ugyanis mentes a domborzat (és a nagy víztömeg) klimatikus hatásaitól, valamint magas napfénytartamú, nem túl csapadékos, kevésbé szeles és felhős időjárása kedvez a kisléptékű éghajlati folyamatok kialakulásának. A várost a különböző

területhasználati típusok színes skálája jellemzi: sűrű beépítésű belváros, nagy panelházak alkotta lakótelepek, ipari és raktározási körzetek, családi házas kertvárosi övezetek, parkok zöldterületei és a külterületek mezőgazdasági földjei (1. ábra).



1. ábra. A jellemző területhasználati típusok Szegeden: (a) belváros, (b) panel lakótelepek, (c) kertvárosi övezet, (d) ipari és raktározási terület (e) mezőgazdasági és szabad terület, valamint: (f) keresztmetszeti mérési útvonal, felszínhőmérsékleti mintavételi pontok: (g) aszfalt, beton, kőburkolat, (h) füves felszín (i) vízfelszín, (j) talaj, kavics, homokos felszín, (k) a 10. ábrán bemutatott terület határa

Az észlelt hőmérsékleti értékek nemcsak az adott időpillanatban uralkodó környezeti körülményektől, hanem az azt megelőző (néhány órás vagy napos) időszak körülményeitől is függenek. Esetünkben a méréseinket megelőző 36 órás időszak nyugodt és derült időjárási viszonyai elősegítették a felszíni sajátosságok mikroklíma alakító hatásának erőteljes érvényre jutását.

A légi felvételezés és a felszíni mérések közvetlenül a naplementét követő időszakra (18.30-19.30 UTC közé) estek, ugyanis ekkor már nem lépett fel a hőkamera felvételeiben zavarokat eredményező direkt sugárzás. Így a mérések középidéjének a 19.00 UTC, a naplemente utáni 1. óra tekinthető.

A városi léghőmérséklet gépjárművel végzett mobil mérése általános eljárásnak tekinthető évtizedek óta (pl. Sun et al., 2009). Jelen esetben a 11,8 km hosszú mérési útvonal tulajdonképpen Szeged egy É-D-i keresztmetszetét jelentette, amely tartalmazta a város jellegzetes területhasználati típusait (1. ábra). A 60 perces mérés az útvonal mentén oda-vissza történt, a későbbiekben felhasznált értékek a mérés középidéjére (19.00 UTC) vonatkoznak. Az útvonalat 15 m-es szakaszokra tagoltuk, majd átlagoltuk az adott szakaszon az oda- ill. visszafelé mért értékek átlagait, így mérésenként 786 db T_a értéket kaptunk.

A felszínhőmérséklet meghatározására irányuló hőkamerás mérések kisformátumú digitális légi felvételező rendszerrel történtek, melynek alapját egy rendkívül hőérzékeny ($0,08^\circ\text{C}$) és gyors reakcióidejű FLIR típusú hőkamera adja, további

eleme a navigációt segítő és a repülési útvonalat rögzítő térinformatikai GNSS vevő. A kamera $-40\text{ }^{\circ}\text{C} - +500\text{ }^{\circ}\text{C}$ közötti tartományban képes mérni és 320×240 képpontból álló hőmérsékleti képeket készíteni. Esetünkben a felvételezés a felszín felett 2000 méteres magasságból történt, a gép 120 km/h -s sebessége mellett a képkészítés gyakorisága $1\text{ kép}/4\text{ másodperc}$, a szomszédos sorok távolsága pedig 400 méter volt.

A felvételek utófeldolgozására a hőképek elemzésére fejlesztett professzionális szoftver segítségével került sor. A párhuzamosan végzett terepi mérések eredményeivel az egyes pixel értékek ellenőrizhetővé és kalibrálhatóvá váltak (*1. ábra*). A felvételek időrendi sorbaállítása után a terepi felmérések hőmérsékleti értékeinek megfelelően finomítottuk az elkészített hőképeket. A hőképek feldolgozásának következő lépésében a GPS által másodpercenként rögzített állományból kinyertük a repülés tényleges útpontjainak koordinátáit, illetve idő adatait. Ezzel a művelettel minden képközépponthoz valós EOV koordinátákat rendeltünk. Ezután az önálló felvételek összeillesztésével és pontos geokorrektúrájával a teljes felvételezett területet lefedő, $2,5\text{ m}$ -es felbontású fotómozaikot állítottunk elő.

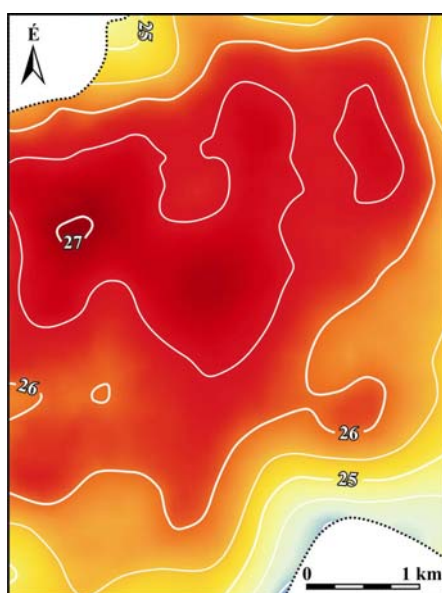
Több, a T_s és T_a közötti kapcsolatot kereső tanulmány rávilágított a házak közötti légrétegben fellépő mikroadvékció szerepének fontosságára (pl. Roth et al., 1989), amely elősegíti a levegőelemek, s ezzel a termális tulajdonságok elkeveredését egy tágabb környezetben. A szakirodalom alapján ez a forrásterület az adott mérési pont körüli néhány száz méteres nagyságú körzetben lévő felületekre terjed ki, amely körzet nyugodt, szélcsendes időjárási körülmények között kör alakúnak tekinthető. Városi környezetben egy $1,5\text{ m}$ magasan elhelyezett hőmérsékleti szenzor esetében ez a terület egy maximum $0,5\text{ km}$ sugarú körre terjed ki (Oke, 2004).

A T_a kialakításában természetesen a ponthoz közelebbi felületeknek a szerepe hangsúlyosabb a távolabban lévőkéhez képest. Figyelembe kell venni azt is, hogy az $1,5\text{ m}$ -es magasság esetén a tetők szerepe feltehetően kisebb a talajszinten lévő felszínéhez (járdák, utak, parkolók, füves területek, stb.) képest. Esetünkben a hőképeken gyakorlatilag csak a vízszintes felületek hőmérsékletei jelennek meg, ezért csak ezeket tudjuk számításba venni a T_s és T_a közötti kapcsolat keresése során.

A keresztmetszetünk mentén mért léghőmérsékletek forrásterületének nagyságára és az azon belüli pixelértékeknek a távolságon alapuló súlyozására többféle megközelítést alkalmaztunk. Ezek közül most csak azokat említjük, amelyek a kapcsolatkeresés során statisztikailag a legjobbnak bizonyultak. Ennek során lehatároltunk egy-egy r sugarú környezetet ($r = 100\text{--}500\text{ m}$) a mérési útvonal pontjai körül. A körökben szereplő pixelek T_s értékeit súlyozva vettük számításba, a legtávolabbiakat (r) $0,5$ -ös, a legközelebbit (0 m) 1 -es, a köztes elhelyezkedésűekét pedig e két érték közötti arányos szorzóval. Az adott pontra vonatkozó, r sugarú környezetet figyelembe vevő súlyozott (w) és átlagolt felszínhőmérsékleti értéket $T_s(wr)$ -rel jelöljük. A kiszámítás automatizálására írtunk egy algoritmust az ArcView Avenue fejlesztő nyelven.

Eredmények

A keresztmetszet menti T_a és a különböző sugarú környezetekben számolt $T_s(wr)$ értékek halmaza közötti (két mérés, $n = 1572$) regressziós kapcsolat vizsgálata szerint a sugár növelésével erősödött a kapcsolat szorossága a két paraméter között. A legmagasabb determinációs együttható ($R^2 = 0,685$) az $r = 500\text{ m}$ esetén adódott, ezért az itt kapott regressziós egyenletet használtuk fel az eredmények kiterjesztésére, vagyis a tágabb városi terület T_a eloszlásának modellezésére.



2. ábra. A modellezett léghőmérsékleti mező Szegeden (2008. aug. 12. 19.00 UTC)

Eredményeink kiterjesztése során a teljes felvételezett területre kapott felszín-hőmérsékleteket, mint input adatokat felhasználva egy 100 m x 100 m-es rácshálózatra alapozva modelleztük a léghőmérsékleti mezőt a két estén. Mivel a $T_s(w500)$ értékek előállítására szükség van a rácshálózat pontjainak 500 m sugarú környezetében lévő pixel-értékekre, ezért a modellezhető terület ($\sim 21 \text{ km}^2$) az eredetileg felvételezett területnél kisebb (1. ábra). Példaképpen, az augusztus 12-én generált városon belüli T_a mezőről elmondható (2. ábra), hogy a magas hőmérsékletű ($\geq 26,5^\circ\text{C}$) terület jelentős kiterjedésű: lefedi a városközpontot és kiterjed ÉNy felé, ahol ipari és raktárházasszerű felhasználást jellemző. Az ÉK-i részen, ahol nagyobb lakótelepek vannak, szintén magas a léghőmérséklet. Felismerhető az alacsonyabb beépítésű körzetek, a külső zöld területek és a Tisza környezetének hűvösebb volta is (ÉNy-on, DNy-on, DK-en). Összességében, a területen egy kb. 3°C -os különbség jelentkezik, ami nagyjából megegyezik a keresztmetszet mentén ezen az estén tapasztalt hőmérsékleti ingadozással.

Irodalomjegyzék

- Oke, T.R., 2004: *Siting and exposure of meteorological instruments at urban sites*. 27th NATO/CCMS Int. Tech. Meeting on Air Pollution Modelling and Application, Kluwer, Banff, Canada, p. 14.
- Roth, M., Oke, T.R. and Emery, W.J., 1989: Satellite-derived urban heat islands from three coastal cities and the utilization of such data in urban climatology. *Int. J. Rem. Sens.* 10, 1699-1720.
- Sun, C.Y., Brazel, A.J., Choe, W.T.L., Hedquist, B.C. and Prashad, L., 2009: Desert heat island study in winter by mobile transect and remote sensing techniques. *Theor. Appl. Climatol.* 98, 323-335.
- Voogt, J.A. and Oke, T.R., 1998: Radiometric temperatures of urban canyon walls obtained from vehicle traverses. *Theor. Appl. Climatol.* 60, 199-217.

Műholdadatok alkalmazása a hidrológiában és az éghajlatkutatásban

Lábó Eszter

Országos Meteorológiai Szolgálat, Előrejelzési és Éghajlati Főosztály
1024 Budapest, Kitaibel P. u.1., email: labo.e@met.hu

Összefoglaló – A meteorológiai műholdak méréseinek egyik legfontosabb feladata, hogy megfigyelésekkel támogassák az operatív funkciókat, illetve a Földdel kapcsolatos analíziseket. Éppen ezért az EUMETSAT-on (Európai Műholdas Meteorológiai Szervezet) belül célul tűzték ki olyan kutatói hálózatok létrehozását, melyek ezt szem előtt tartva dolgozzák fel a műholdas adatokat.

Az egyik kutatási program a Klíma-SAF, mely az elsők között jött létre az EUMETSAT adatok felhasználását célzó projektek közül. Ez főként éghajlati adatok előállításával foglalkozik. Az előadásom első részében a Klíma-SAF konzorcium által elért eredményeket összegzem, és bemutatom az általuk előállított műholdas információk sokszínűségét. Ez a terület hazai felhasználással nem dicsekedhet, de európai szinten számos kutatás alapját képezi.

Egy másik munkacsoport az olaszok által vezetett, több mint 10 európai országot tömörítő Hidrológiai SAF, amely a hidrológiai modellek számára készít műholdból származtatott produktumokat: csapadék-, talajnedvesség, illetve hóborítottság, hó-víz egyenérték adatokat. A műholdak által közvetlenül mért sugárzási információkból az időjárási, éghajlati paraméterek előállítása sokszor nem egyenesen következik. Ugyanis ezeket rengeteg egyéb fizikai paraméter befolyásolja, ráadásul nem egyértelmű a kapcsolat például a felhő tetejénél fennálló sugárzás és a földre hulló csapadék intenzitása között. Ezért különböző modellezési, illetve statisztikai eszközök figyelembevételével igyekeznek ezeket megállapítani.

Előadásom második részében bemutatom a Hidrológiai SAF által előállított produktumokat, illetve az ezek mögött álló tudományos erőfeszítéseket. Ezt követi majd a hazánkban folyó munka részletezése: Magyarország a HSAF konzorcium tagjaként fejlesztőként vesz részt a projektben, és a csapadékatatok összehasonlítását végzi felszíni mérésekkel. A felszíni mérések közül a radaros mérések képezik az összehasonlítási módszerünk alapját. Szó lesz a műholdas adatok validálásának lehetőségeiről.

Bevezetés

Bár a meteorológiai műholdak egyik fő célja az időjárás-előrejelzés támogatása, alkalmazási körük igen sokrétű a környezettudományok, a légkör, a felszín megfigyelése területén. Kiemelkedő fontosságú terület az időjárás előrejelzésén kívül az éghajlati paraméterek meghatározása.

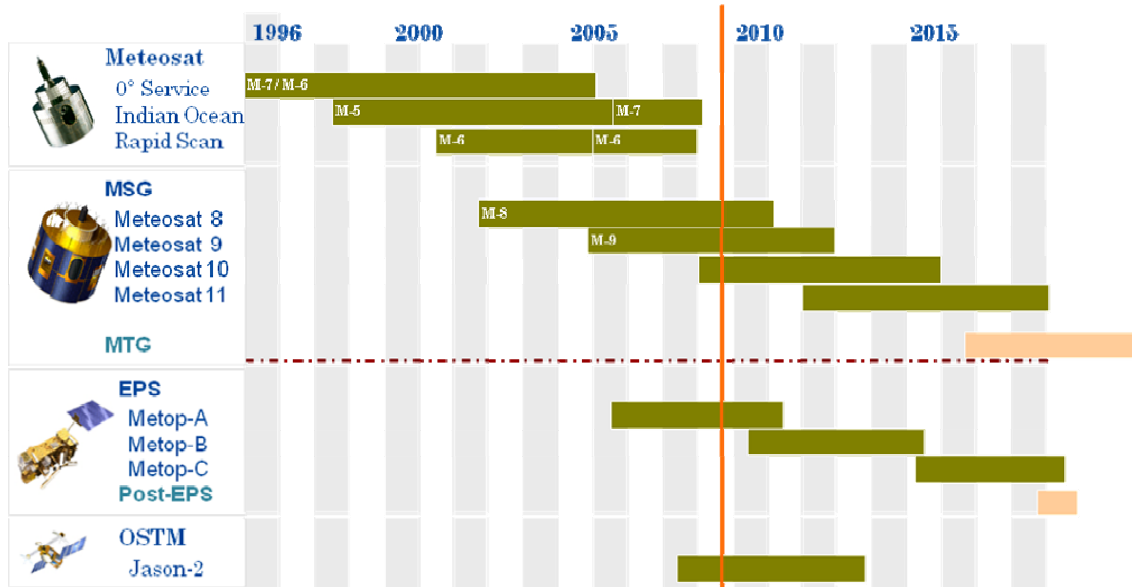
A műholdas kutatások végzése nemzetközi összefogás keretében megvalósítható. Ugyanis speciális szakértelmet, rendkívül nagy erőforrásokat igényelnek, melynek megteremtése csak közös erőfeszítésekkel lehetséges.

Európa meteorológiai célú műholdjai

Európa meteorológiai célú műholdjait a darmstadt-i székhellyel rendelkező EUMETSAT üzemelteti. Az EUMETSAT (Meteorológiai Műholdak Hasznosításának Európai Szervezete) jelenleg 26 európai tagországból áll, Magyarország 2009. január 1-étől teljes jogú tagja a szervezetnek. A tavalyi év óta részt vehetünk a döntéshozatalban, stratégiai kérdések eldöntésében, illetve kutatási projektek indításában, fejlesztésekben. Magyarországot hivatalosan az Országos Meteorológiai Szolgálat képviseli az üléseken.

Az EUMETSAT a programjai keretében gondoskodik a műholdak üzemeléséről és tervezéséről. A jelenleg már elfogadott projekteket az 1. ábra mutatja be. Ezen az ábrán a geostacionáris műholdcsoportot a Meteosat és MSG család tartalmazza, míg a

polárisakat az EPS (European Polar System). A geostacionárius holdak negyedóránkénti adataikkal az időjárás-előrejelzés és az éghajlati kutatások meghatározó elemei, míg a poláris holdak ritkább időközönként állnak rendelkezésre, de mikrohullámú adataikkal segítséget nyújtanak a légkör vízgőztartalmának és a csapadék mennyiségének meghatározására.



1.ábra. Az EUMETSAT által üzemeltetett és tervezett műholdak

Klimatológiai alkalmazások szempontjából kiemelhető a Meteosat 8 és 9 holdakon lévő GERB (Global Earth Radiation Budget) műszer, melynek detektora 256 pixelből álló, melyeket fekete színű anyaggal vontak be. A nadir-ban a pixel mérete 44.6*39.3 km. Éghajlati kutatásokban használják a napállandó meghatározására, illetve az atmoszféra tetején lévő a nettó fluxus meghatározására, amelyből a Föld hűlési vagy melegedési karakterisztikájára lehet következtetni (Comer, 2007; Bertrand, 2006). Emellett a légkörfizika és a meteorológia számára is hasznos információkat szolgáltat, mivel a légköri energiamérleg felügyeletét biztosítja, mely elengedhetetlen információ az aktuális légkördinamika pontos leírásához. A földi sugárzásháztartás megismerése is a GERB műszerhez kötött; ennek pontossága eléri a $\sim 1 \text{ Wm}^{-2}$ -t.

Nemzetközi kutatócsoportok (SAF-ok)

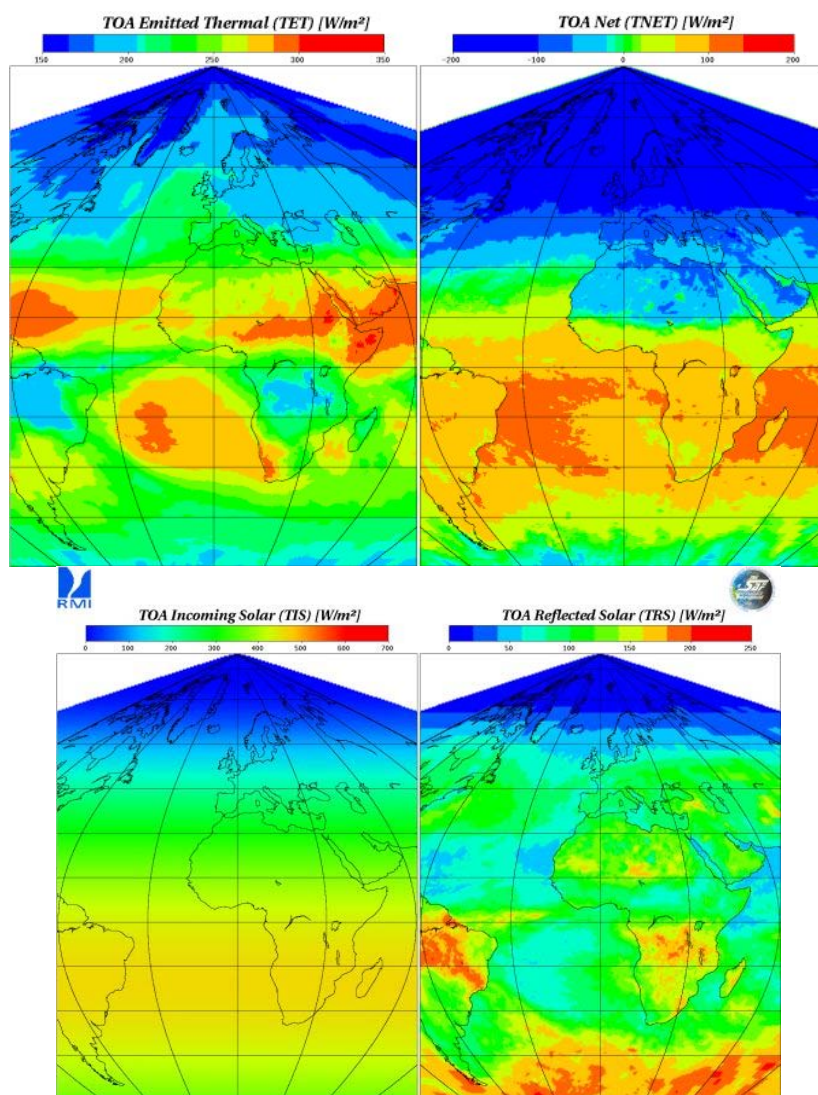
Az EUMETSAT által létrehozott kutatócsoportokat röviden SAF-oknak nevezik (Satellite Application Facilities). Ezek közül 8 létesült eddig, a legfiatalabb 2005-ben indult Hidrológiai SAF, a legidősebb pedig az 1998-ban újtárra indított Klíma SAF.

Klíma SAF

A Klíma-SAF projektet a német meteorológiai szolgálat, a DWD irányítja, egy széles nemzetközi konzorcium élén (svéd, norvég, finn, belga, svájci meteorológiai intézetek részvételével). A projekt 2007-től párhuzamosan operatív és fejlesztési feladatokat is ellát, tehát a felhasználók részére bocsátják az általuk kifejlesztett termékeket előre megadott időközönként, időben folyamatosan (Schulz, 2009).

A produktumok négy részre sorolhatóak: a sugárzási produktumok a felszíni sugárzási jellemzők és az atmoszféra tetején lévő sugárzási jellemzőket leíró produktumok két csoportjára bonthatók. Emellett léteznek a felhő-karakterisztikákat leíró produktumok, valamint a nedvességi jellemzőket leíró produktumok.

Mind rövidhullámú, mind hosszuhullámú komponenseket származtatnak: számolják a légkör tetejére érkező napsugárzást, a visszavert napsugárzást, és a kibocsátott hosszuhullámú sugárzást a légkör tetején (ezekre mutat példát a 2. ábra). A felszíni sugárzási paraméterek a következők: felszínre érkező rövid- és hosszuhullámú sugárzás, felszíni albedó, felszínről kilépő hosszuhullámú sugárzás, felszíni nettó rövid- és hosszuhullámú sugárzás, felszíni sugárzási egyenleg.



2.ábra. A légkör tetején kibocsátott, nettó (felső képsor), illetve bejövő és visszavert napsugárzás (alsó képsor) produktumok a Klíma-SAF keretében

A nedvesség produktumokat a NOAA és a MetOp műholdakon található ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder) műszer adataiból számolják. Legfontosabb paraméterek a függőleges légoszlop vízgőztartalma, a vertikális légoszlop 5 rétegében a vízgőztartalom (hőmérséklet és átlagos relatív nedvesség, valamint a hőmérséklet és a keverési arány hat nyomási szinten).

Hidrológiai SAF

A Hidrológiai-SAF projektet szintén európai együttműködés keretében hozták létre. Számunkra különleges fontosságú, hiszen ez az egyetlen projekt, amelyben Magyarország konzorcium-tag. A projektet az Olasz Meteorológiai Intézet vezeti, és rajta kívül 12 EUMETSAT tagország intézetei vesznek részt benne. A projekt célja, hogy hidrológiai modellek számára bemenő paramétereket állítson elő műholdas adatokból. Ezzel lehetővé téve a felszíni megfigyelő-hálózat helyettesíthetőségét. A műholdas mérésekből tehát három különböző információt számolnak a projekt keretein belül (HSAF, 2008):

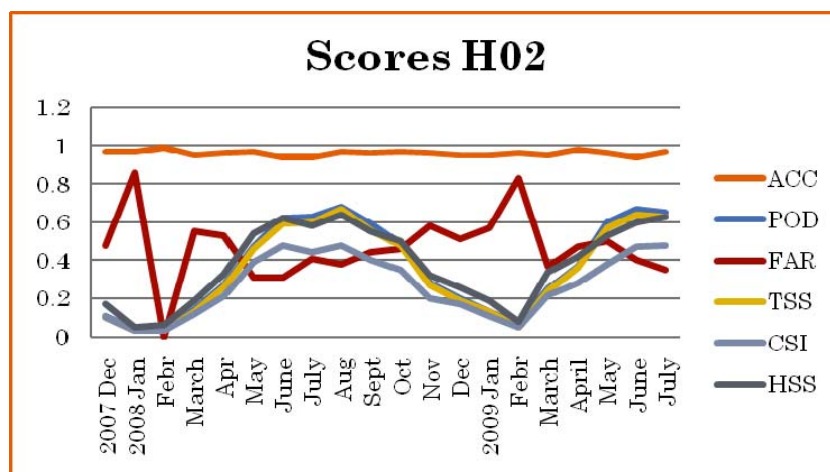
- csapadékintenzitás, és lehullott csapadékösszeg;
- talajnedvesség a felső talajrétegben, illetve az ECMWF központ által használt talajmodell segítségével a mélyebb rétegekben;
- hóborítottság, hó állapot, és hó-víz-egyenérték.

A csapadékproduktumok közül kettő mikrohullámú méréseken alapul, melyeket a MetOp, NOAA, illetve DSMP poláris műholdak műszerei szolgáltatnak. Az SSMI műszer adatai közül a légköri ablakokban mért sugárzás és a csapadék között egy létrehozott adatbázis segítségével állítanak fel statisztikai összefüggéseket, majd ezt az aktuálisan mért sugárzási intenzitásokra alkalmazva származtatnak csapadékot. Az AMSU műszerek adatai közül viszont az elnyelési sávokat (54 GHz : AMSU-A), illetve a vízgőz profilok meghatározására használt sávokat (183 GHz AMSU-B) alkalmazzák. Itt szükség van tanuló algoritmusokra a csapadék meghatározásához, szintén régebbi adatbázisok alapján.

Készülnek negyedóránkénti csapadékmezők is, amelyeket már geostacionárius holdak infravörös sugárzási adataiból állítanak elő, a mikrohullámú adatok segítségével. A negyedórás adatokra építve pedig 3, 6, 12, illetve 24 órás csapadékösszegeket számolnak.

Magyar eredmények

Az OMSZ feladata a fent részletezett négyfajta produktum összehasonlítása a felszíni meteorológiai radarhálózat adataival (Lábó, 2009; Zsugyel, 2009). Az összehasonlításokat havi bontásban végezzük el, különböző statisztikai paraméterek számításával. A 3. ábra H02 elnevezésű, AMSU műszer adataiból származtatott eredményeket mutatja 2007 decembere és 2009 júliusa között. Jól megfigyelhető mind a 4 produktumra jellemző téli-nyári ingadozás, azaz a nyári hónapokban a detektálás valószínűsége (Probability of Detection, POD) sokkal nagyobb, mint télen.

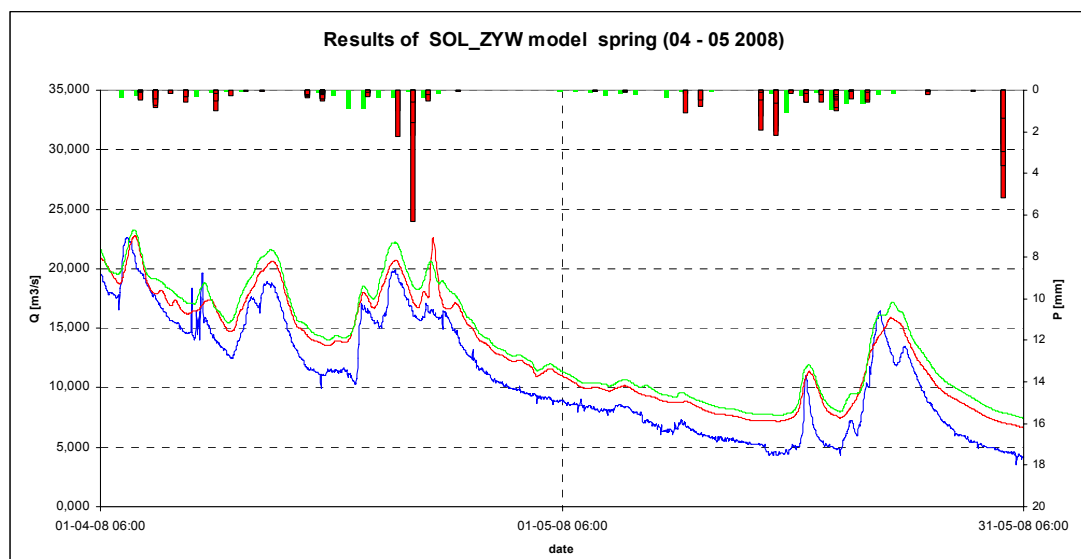


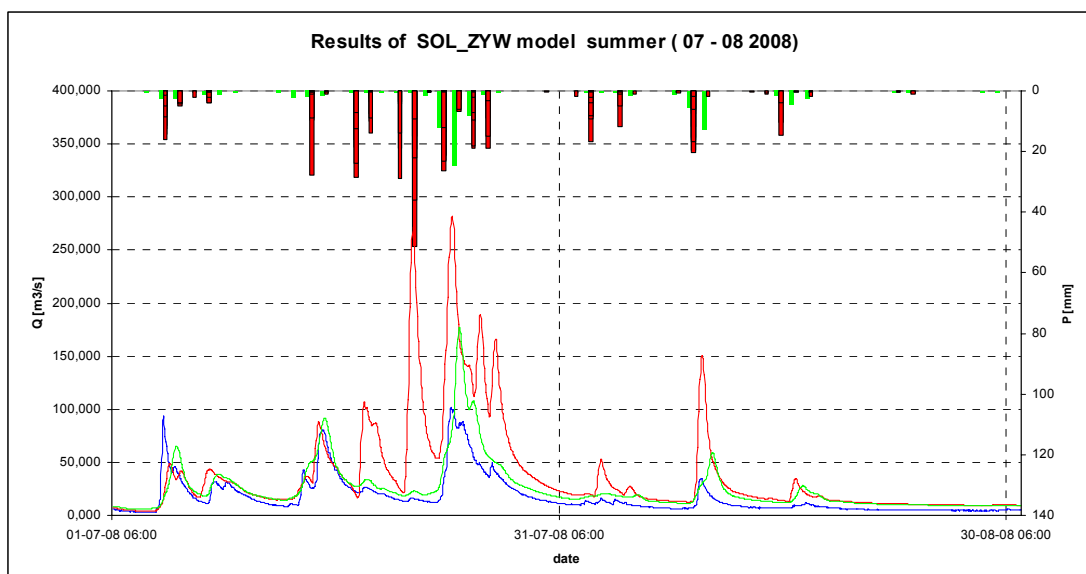
3.ábra. A HSAF keretében fejlesztett H02 elnevezésű csapadékintenzitás produktum havi statisztikai eredményei magyar radarhálózat adataival összehasonlítva

Hidrológiai modellezés műholdadatokkal

A HSAF projekt célja továbbá az is, hogy a műholdas adatok hidrológiai modellek számára való használhatóságát megteremtse, illetve bizonyítsa. Erre Lengyelország vezetésével egy Hidrológiai Validációs Csoport vállalkozott, amelyben 6 ország (Belgium, Németország, Lengyelország, Törökország, Szlovákia) hidrológusai alkalmazzák a produktumokat. A csapadékproduktumok vizsgálatában történt eddig a legjelentősebb előrelépés.

Ugyan a jelenlegi eredmények még csak előzetes eredmények, a csapadékproduktumok közül a negyedóránkénti intenzitásokat alkalmazva a lengyelek figyelemreméltó eredményeket kaptak: a Sola folyó modellje a műholdas adatokkal futtatva tavasszal egész jól követte a mért vízállást, míg nyáron nagy esőzések következtében túlbecsülte a vízszintet (4. ábra).





4. ábra. A HSAF keretében fejlesztett H03 elnevezésű csapadékintenzitás produktummal (piros), illetve felszíni csapadékmérőkkel (zöld) futtatott hidrológiai modell a Sola folyóra (késsel a mért vízszint)

Irodalomjegyzék

- Bertrand, C., Futyán, J., Ipe, A., Gonzalez, L., Clrbaux, N., 2006: Diurnal asymmetry in the GERB SW fluxes, *IEEE transactions on Geoscience and Remote Sensing* 44 (12): 3585-3600 Dec 2006.
- Comer, RE; Slingo, A; Allan, RP., 2007: Observations of the diurnal cycle of outgoing longwave radiation from the Geostationary Earth Radiation Budget instrument, *Geophysical Research Letters*, 34 (2): art. no. L02823 Jan 30 2007.
- H-SAF, 2008: Algorithm Theoretical Definition Document Updated Version. *Italy*, 30 September 2008. 102 pp.
- Lábó Eszter, 2009: Műholdas csapadékbecslések bevéálása 2008 tavaszán, <http://www.urvilag.hu/article.php?id=3146>, 2009. március 25.
- Schulz, J., Albert, P., Behr, H.-D., Caprion, D., Deneke, H., Dewitte, S., Dürr, B., Fuchs, P., Gratzki, A., Hechler, P., Hollmann, R., Johnston, S., Karlsson, K.-G., Manninen, T., Müller, R., Reuter, M., Riihelä, A., Roebeling, R., Selbach, N., Tetzlaff, A., Thomas, W., Werscheck, M., Wolters, E., and Zelenka, A.: Operational climate monitoring from space: the EUMETSAT Satellite Application Facility on Climate Monitoring (CM-SAF), *Atmos. Chem. Phys.*, 9, 1687-1709, 2009, <http://www.atmos-chem-phys.net/9/1687/2009/>
- Zsugyel Márton, Lábó Eszter, 2009: Csapadékbecslések az Űrből, <http://www.urvilag.hu/article.php?id=3145>, 2009. március 23.