

NOAA AVHRR/3 MŰHOLDKÉPEK VÉTELE,
ELŐFELDOLGOZÁSA ÉS MINŐSÉGBIZTOSÍTÁSA
(ELTE TTK HRPT VEVŐÁLLOMÁS)

Diplomamunka

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Természettudományi Kar
Meteorológiai Tanszék



Készítette:
Kern Anikó

Témavezető:
Dr. Bartholy Judit

2004. május 7.
Budapest

Tartalomjegyzék

Bevezetés.....	4
1. A meteorológiai kvázipoláris NOAA műholdak bemutatása, s az ELTE vevőállomása.....	7
1.1. A meteorológiai kvázipoláris NOAA műholdak.....	7
1.1.1. A NOAA KLM műholdsorozat.....	9
1.2. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem HRPT vevőállomása.....	11
2. Az antenna által vett nyers adatok előkészítése.....	12
2.1. Az adatok digitális tárolási módja.....	12
2.2. A fájlok szerkezete.....	13
2.3. Az AVHRR műszerrel mért adatok nyers megjelenítése.....	16
3. Az AVHRR műholdmezők földrajzi azonosítás.....	18
3.1. A földrajzi azonosítás célja.....	18
3.2. A TBUS-távirat.....	18
3.3. A műhold-navigációs program.....	20
3.4. A közép-európai kivágatok elkészítése.....	24
3.5. Egyéb módszerek az AVHRR mezők földrajzi azonosítására.....	29
4. Az AVHRR/3 sugárzásmérő műszer rövid bemutatása és kalibrációja.....	30
4.1. Az AVHRR/3-műszer.....	30
4.2. Az AVHRR/3 sugárzásmérő műszer kalibrálása.....	32
4.2.1. A látható és a közeli-infravörös csatornák kalibrálása.....	33
4.2.1.1. Kalibráció a műhold fellövése előtt.....	33
4.2.1.2. Kalibráció a műhold fellövése után.....	42
4.2.2. A termális infravörös csatornák kalibrálása.....	45
4.2.2.1. Kalibráció a műhold fellövése előtt.....	46
4.2.2.2. Kalibráció a világűrben.....	47
5. Az AVHRR/3 mezők felhasználásához szükséges további vizsgálatok, lépések.....	55
5.1. Hibaforrások az adatsorokban.....	55
5.2. A felhőzet azonosítása az AVHRR/3 mezőkön.....	58
5.2.1. A felhőzet azonosítására szolgáló módszerek.....	59
5.2.1.1. A felhőzet azonosításához használt feltételek és küszöbérték.....	60
5.2.1.1.1. Vízfelszín- és felhőszűrő kritériumok nappali képekre.....	60
5.2.1.1.2. Felhőszűrő kritériumok éjszakai képekre.....	66
5.2.2. Hó és jég fedte területek azonosítása.....	68

5.2.3. Felhasználhatóság.....	71
Összefoglalás, a továbblépés lehetősége.....	73
Köszönetnyilvánítás.....	75
Irodalomjegyzék.....	76

Bevezetés

Földünk első műholdját, a Szputnyik-1-et, 1957 őszén bocsátották fel az egykori Szovjetunióból. A műhold optikai megfigyelése tette lehetővé az első geofizikai méréseket a Föld felsőlégkörének sűrűségére vonatkozóan. Az 1960-as évektől kezdődően az amerikai NASA (National Aeronautics and Space Administration) és a NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) egy közös együttműködés keretében további speciális célú műholdakat bocsátott fel, megkezdve vele a Föld légkörének és felszínének tanulmányozását egy új és különleges szemszögből: a világűrből. A műholdaknak és az új informatikai technológiáknak köszönhetően lehetővé vált, hogy bolygónkat egy globális rendszerként tanulmányozzuk és olyan folyamatokat, jelenségeket is megfigyeljünk, melyekre előtte nem volt mód. Két alapvető műholdtípus létezik: a kvázipoláris és a geostacionáris műhold. Az előbbi napszinkron pályán kering a Föld körül 600-1500 km magasságban, az utóbbi pedig átlagosan 35.000-36.000 km magasan állandóan a Föld egy adott pontja felett tartózkodik.

Az időjárás és az éghajlat előrejelzése nagy mennyiségű adatot igényel mind térbeni, mind időbeni felbontásban, melyek egy részét az operatív műholdak hatékonyan és egységesen biztosítják ma már több mint 40 éve. A műholdas adatok segítségével a kutatók jobban megérthetik és könnyebben előrejelezhetik a föld természeti folyamatait, mint pl. az El Niño-t. Továbbá sok fejlődő országban és az óceánok nagy része felett a műholdak jelentik az egyetlen adatforrást a légkör és a felszín állapotáról és felbecsülhetetlen szereppel bírnak ezen a távoli területeken kialakuló extrém időjárási képződmények valós idejű feltérképezésében.

A műholdakról származó adatokat a numerikus időjárás előrejelző modellekbe is beépítik immár 20 éve a nagyobb előrejelző központokban, így pl. az ECMWF-nél is (European Centre for Medium Range Weather Forecasts). A fejlődésnek köszönhetően az előrejelzésekhez felhasznált adatok nagy részét napjainkban már ezen műholdas adatok teszik ki (Köpken, 2001). Számos olyan szondázó berendezés működik a különböző műholdak fedélzetén, melyek mért adataiból származtatott vertikális profilok felhasználhatók az időjárás előrejelzéséhez. Ez az információ-többlet egyértelmű pozitív hatással van az előrejelzés minőségére, vagyis segíti a prognosztikát (Thépaut, 2004). E célra jelenleg leggyakrabban a kvázipoláris műholdak közül a NOAA műholdak ATOVS (Advanced TIROS Operational Vertical Sounder) műszer csoportja és a szintén amerikai DMSP (Defence Meteorological Satellite Program) katonai műholdak SSM/I (Special Sensor Microwave/Imager) műszere által mért adatokat használják. Ezen adatokból különböző, ún. inverz módszerekkel az esetek

többségében kielégítően visszaállítható a méréskor fennállt légköri nedvesség- és hőmérsékletprofil. Ezeket az információkat hazánkban az Országos Meteorológiai Szolgálat által fejlesztett ALADIN/HU korlátos tartományú modellhez használják fel. A geostacionárius műholdak Földhöz viszonyított távolabbi helyzetüknél fogva erre a szondázó feladatra kevésbé alkalmasak, ezért leképező műszereiknek méréseiből a származtatott széladatokat használják fel az időjárás előrejelzéséhez (pl. európai METEOSAT, amerikai GOES - Geostationary Operational Environmental Satellite). Tekintve, hogy a műholdképekből előállított szélvektorokhoz a felhőzet mozgását veszik alapul, ezért ugyanarról a térségről időben sűrű mérésekre van szükség, amit a geostacionárius műholdak eleve jobban biztosítanak, mint a kvázipoláris műholdak. További szondázó berendezések mérései alapján felállítható többek közt az aktuális légköri ózon és szén-dioxid profil is.

A sugárzásmérő berendezések másik nagy csoportját képezik a már említett leképező műszerek, amilyen például az AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) különböző verziói is a NOAA műholdakon. Az általuk mért adatok alkalmazási területe az elmúlt évek során sokkal tágabbá vált, mint ahogy azt eredetileg tervezték: számos nem meteorológiai tudományág használja fel mindmáig eredményesen az AVHRR méréseket (Cracknell, 2001). Ezen területek a teljesség igénye nélkül az alábbiak: hidrológia, klimatológia, környezetvédelem, geológia tengermélység-méréstan, térképészet, halászat, biológia, agronómia. Ezekben belül olyan megfigyeléseket végeznek, mely kiterjed többek között a földfelszíni hőmérsékletre, a tengeri olajszenyeződésekre, a vulkáni hamu képezte felhőzetre, az aeroszolok pályájára, homokviharokra, erdőtüzekre, árvízi megfigyelésekre, a hó- és jégtakaró kialakulására és mozgására, a tengeráramlatokra, az algavirágzásra, a vegetáció fejlődésére, termésbecslésre, vagy akár a civilizáció okozta antropogén hatásokra is (Potter, 2003). Az AVHRR adatai alapján becsülhető a bioszféra szénháztartása, a Napból eredő energia-fluxus, a felszíni albedó, a felhőborítottság, stb..

Az Eötvös Loránd Tudományegyetem Meteorológiai Tanszéke eddig is számos műholdképeken alapuló kutatásban vett már részt, azonban a felhasznált képek mind olyan kész produktumok voltak, melyeken a szükséges előfeldolgozási lépéseket valamilyen műholdas központban (pl. NOAASIS - NOAA Satellite Information System) már végrehajtották. Az egyetem Környezetfizikai Tanszékcsoportja (melynek a Meteorológiai Tanszék is tagja) 2002 óta egy saját vevőberendezés segítségével 6 kvázipoláris műhold finomfelbontású méréseihez fér hozzá. Tekintve, hogy a Meteorológiai Tanszéken igény van további távérzékelte adatokra kutatási és oktatási feladatokra egyaránt, ezért célszerű ezt a lehetőséget a Tanszéken kihasználni és a nyers adatokat feldolgozni. Ennek keretében

született a gondolat, hogy a munkából olyan szakdolgozat szülessen, mely ezt az alapkutatót teljes részletességgel dokumentálja, betekintést nyújtva a későbbi felhasználók számára a teljes munkafolyamatba. Az általunk kiépített rendszert megteremtette a lehetőséget a műholdadatok operatív használatára. Innentől kezdve a Meteorológiai Tanszék saját műholdas adatbázissal rendelkezhet. Dolgozatom célja ennek a feladatnak a megoldása, vagyis az első alapvető lépések kidolgozása és dokumentálása volt, különös tekintettel az adatok minőségének biztosítására. A szakdolgozatban leírt összes lépést elvégeztük, az adatfeldolgozó szoftverek a rendelkezésre állnak (IDL illetve Fortran nyelven), így a potenciális felhasználó abban a kényelmes helyzetben találja magát, hogy a továbbiakban már nem kell az alapvető képzőkészítő lépésekkel és az adatok minőségével törődnie, hanem a kitűzött tudományos célra összpontosíthat.

A nyers digitális adatok használhatatlanok maradnak egészen addig, amíg néhány alapvető fontosságú lépést el nem végzünk rajtuk. Diplomamunkám keretében csak az AVHRR/3 sugárzásmérő műszer adataival foglalkoztam, s ezeket a lépéseket az AVHRR/3 műszerrel mért értékekre végeztem el, ezen munkafolyamatok eredményeit mutatom be külön fejezetekben. Az említett lépéseket (így a dolgozat fejezeteit) képezi az adatok szerkezetének értelmezése, a mért adatok földrajzi azonosítása, a műszer adatainak kalibrálása a visszavert és a hőmérsékleti sugárzási tartományban, az előforduló hibák felderítése és kiszűrése illetve a felhőzet azonosítása és kiszűrése.

1. A meteorológiai kvázipoláris NOAA műholdak bemutatása, s az ELTE vevőállomása

1.1. A meteorológiai kvázipoláris NOAA műholdak

Az első meteorológiai célokra tervezett műholdat (TIROS, Television Infrared Observation Satellites) 1960. áprilisában állította a NOAA Föld körüli kvázipoláris pályára. A következő műhold, melyet 1978-ban környezeti kutatási céllal bocsátottak fel, a TIROS-N nevet viselte, s egyben prototípusként szolgált egy több évtizedet átölelő műholdcsaládhoz. A NOAA és a NASA közösen indította egykor, és bocsátja pályájukra még ma is ezt a sorozatot (1. táblázat), melynek első tagja a NOAA-6 volt 1979-ben, utolsó tagja pedig a NOAA-N⁵ lesz, várhatóan 2008-ban.

A műhold neve	A műhold fellövésének dátuma	Jelenlegi állapot
TIROS	1960.04.01.	Üzemen kívül 1960.06.15. óta
TIROS - N ¹	1978.10.13.	Üzemen kívül 1981.02.27. óta
NOAA - A (6)	1979.06.27.	Üzemen kívül 1987.03.31. óta
NOAA - B ²	1980.05.29.	Üzemen kívül a fellövés óta
NOAA - C (7)	1981.06.23.	Üzemen kívül 1986.06.07. óta
NOAA - E (8) ³	1983.03.28.	Üzemen kívül 1985.12.29. óta
NOAA - F (9)	1984.12.12.	Üzemen kívül 1998.02.13. óta
NOAA - G (10)	1986.09.17.	Üzemen kívül 2001.08.30. óta
NOAA - H (11)	1988.09.24.	Egyes berendezéseit még ma is használják
NOAA - D (12)	1991.05.14.	Tartalék reggeli műhold
NOAA - I (13) ⁴	1993.08.09.	Üzemen kívül 1993.08.23. óta
NOAA - J (14)	1994.12.30.	2001.03.19. óta tartalék délutáni műhold
NOAA - K (15)	1998.05.13.	2002.10.15. óta tartalék reggeli műhold
NOAA - L (16)	2000.09.21.	2001.03.19. óta a kijelölt délutáni műhold, felváltva a NOAA-14-et
NOAA - M (17)	2002.06.24.	2002.10.15. óta a kijelölt délelőtti műhold, felváltva a NOAA-15-öt
NOAA - N	2004.10.04.	Fellövés előtti előkészületek alatt
NOAA - N ⁵	2008.	Fellövés előtti előkészületek és javítások alatt

Megjegyzések:

- ¹ A TIROS - N sorozat prototípusa
- ² Sikertelen pályáraállítás
- ³ A tovább fejlesztett TIROS - N (ATN, Advanced TIROS - N) sorozat első tagja
- ⁴ Az energiaellátó-rendszer meghibásodása miatt a fellövés után két héttel megszűnt a műhoddal a kapcsolat
- ⁵ 2003 szeptemberében a műhold a laboratóriumi előkészületek során eldőlt és súlyosan megrongálódott

1. táblázat

A NOAA és a NASA közös kvázipoláris kutató műholdjai

A NOAA-8 műhold volt az első tagja annak a továbbfejlesztett TIROS-N sorozatnak (ATN), mely több műszerrel lett felszerelve, mint elődjei. Ezek a műszerek a sorozat tagjainak fedélzetén egészen a NOAA-14 műholdig bővítés nélkül megmaradtak. Újabb fejlesztések eredményeként jött létre a NOAA-15 műholdtól kezdődően a NOAA KLM műholdsorozat, melyről a következő alfejezetben részletesebben olvashatunk. A NOAA-8 műholdtól kezdődően a műholdakat ellátták egy ún. SAR (Search And Rescue) nevű berendezéssel is, mely a bajba jutott és vészjelzést leadó hajósok és pilóták földrajzi felderítését és megmentését segíti.

A műholdak neve a sikeres pályáraállítás után változik betűről számmá. Például a NOAA-M műhold 2002. június 24. óta a NOAA-17 nevet viseli. A sikeresen pályára állított műholdak átlagos keringési magassága 833 és 870 km között váltakozik. Így a TIROS-N műhold 870 km magasan kering a Föld körül, az utoljára fellőtt NOAA-17 műhold magassága pedig 833 km. Föld körüli keringésük iránya retrográd, a pontos inklináció (a Föld egyenlítői síkjával bezárt szöge) műholdanként változó, értékük kb.: 98° - 99° . Magasságuknak megfelelően 14-szer kerülnek meg a Földet egy nap, keringési idejük 101,3 és 102,2 perc, mely idő alatt a Föld forgásából adódóan mintegy 25° -kal keletre haladnak a Föld adott szélességi körén. Egy adott térség fölé 12 óra elteltével érkeznek vissza a műhold, de ellentétes irányból, mint az előző áthaladáskor.

A NOAA kvázipoláris műholdak tervezett élettartama két év, így megközelítőleg kétévencént bocsátották fel a soron következő műholdat. A felbocsátások közötti két év az óriási költségek (műholdanként kb. 300 millió USD) és egy esetlegesen meghibásodó műhoddal járó kockázat kompromisszumaként állt elő. A kisebb-nagyobbfajta meghibásodások ellenére, a felbocsátott műholdak többségének élettartama a várható két évet jóval meghaladta, mely egyrészt a műszerek megbízhatóságának, másrészt a széles körű és alapos laboratóriumi teszteknek köszönhető.

Az aktív műholdakból álló rendszer tagjai más-más funkciókat töltenek be. A két legfiatalabb működőképes műhold tölti be mindig az elsődleges műholdak szerepét úgy, hogy közülük az egyik – napjainkban a NOAA-17 – délelőtti pályára állítva, a másik pedig – jelenleg a NOAA-16 – délutáni pályára állítva kering a Föld körül. Az alapján, hogy egy műhold nappal egy adott földrajzi pont felé közeledve helyi idő szerint mikor lépi át először az Egyenlítőt beszélünk délelőtti, vagy délutáni műholdról. A konkrét időpontok megválasztása a különböző szempontok optimalizálásával történik úgy, hogy a különféle adatok felhasználhatósága minél jobb legyen. A két operatív műhold segítségével naponta négyszer kapunk szinte teljes lefedettségű képet bolygónkról.

1.1.1. A NOAA KLM műholdsorozat

A KLM sorozat első tagját, a NOAA-15 műholdat 1998 májusában állították föld körüli pályájára, s rá két-két évvel fellöttek a NOAA-16 és a NOAA-17 műholdakat is (*1. táblázat*). Már évekkkel a felbocsátásukat megelőzően kialakult ennek a háromelemű sorozatnak a koncepciója, melyeket a soron következő betűkkel, K-val, L-lel, és M-mel jelöltek. A NOAA és a NASA közös újabb kvázipoláris műholdjuknak, a NOAA-N műholdnak a fellövését 2004 októberére tervezik, így addig a NOAA-17 műhold marad a legfiatalabb.

A sorozatot a korábbi műholdak műszereinek részben továbbfejlesztet változatával szerelték fel. Ezekkel a műszerekkel méréseket végeznek a Föld légkörére, felszínére, felhőzetére vonatkozóan (*2. táblázat*). A mérésekből olyan mennyiségek származtathatóak le, mint a felszín és felhőzet albedója és hőmérséklete, a légköri ózon és az aeroszolok mennyiségi és térbeli eloszlása, a vertikális hőmérsékleti és nedvességi profilok, proton és elektron fluxusok a műhold magasságában.

A műholdak által mért adatok kétféleképpen juthatnak el a műholdról a felhasználókhoz:

(1) A műholdon lévő háttértáron az adatok egy bizonyos része elmentésre kerül egészen addig, amíg egy a lekérdezésre jogosult állomás ezeket le nem kéri a műholdról. Két ilyen jogosultsággal rendelkező állomás (Command and Data Acquisition Station) létezik: az alaszki Fairbanks, és a virginiai Wallops-szigetek. Az így lekért adatok lehetnek globális (GAC, Global Area Coverage) és lokális (LAC, Local Area Coverage) gyűjtésűek. A GAC típusú adatok egyrészt a műhold működéséről tartalmaznak információt, másrészt két műszer méréseit tartalmazzák: az AVHRR/3 3,27 km × 5,45 km-es felbontású képeit és az AMSU vertikális szondázó műszer mért adatait. A műhold háttértára korlátozott méretű, így ebből a fajta adatokból kb. 115 percnyi tárolható. A LAC típusú adatok eredeti felbontású, maximálisan 11,5 perces AVHRR/3 méréseket tartalmaznak egy adott területről, melyet az egyéni felhasználók kérésére rögzítenek.

(2) Közvetlen rádióvétellel a műhold által mért műszerek eredményei azonnal elérhetőek a műhold pillanatnyi adóköri területén belül. Ennek a közvetlen rádióvételnek három módja van:

(2a) Az ún. nagy felbontású képtovábbítással (HRPT, High Resolution Picture Transmission) megfelelő vevőberendezéssel azonnal elérhetőek a műhold paraméterei és a mérőműszerek teljes felbontású adatai, ha a műhold az adott földrajzi ponthoz képesti horizont felett

A műszer neve	A méréshez használt csatornák	A műszer típusa és a műszer által mért fizikai paraméterek	A mérés térbeli felbontása a műhold alatt
AVHRR ¹ /3	2 látható, 2 közeli- és 2 távoli infravörös-tartomány (Σ: 6 csatorna)	Leképező műszer: a Föld felszíne és légköre által visszavert napsugárzás energiáját, és az általuk kisugárzott hőenergiát méri	1,09 km × 1,09 km
HIRS ² /3	1 látható, 7 közeli- és 12 távoli infravörös-tartomány (Σ: 20 csatorna)	Vertikális szondázó műszer: a légkör és a Föld felszíni radianciáját méri	20,3 km × 20,3 km, illetve 18,9 km × 18,9 km
AMSU ³ -A	13 + 2 mikrohullámú csatorna	Vertikális szondázó műszer: a légkör és a Föld felszíni radianciáját méri	48 km × 48 km × 48 km
AMSU ³ -B	5 mikrohullámú csatorna	Vertikális szondázó műszer: a légkör és a Föld felszíni radianciáját méri	16 km × 16 km × 12 km
SBUV ⁴ /2	6 közeli ultraibolya csatorna	Leképező és szondázó műszer: a visszaszórodott ultraibolya-sugárzás alapján az ózon eloszlást méri	–
SEM ⁵ /2	2 csatorna 0,05-20 keV energiájú részecskék, illetve 18 csatorna a 30-7000 keV energiájú részecskék mérésére	Az elektromosan töltött részecskék fluxusát méri a műhold magasságában	–
DCS ⁶ /2	401,65 MHz-es rádióadás	Adatgyűjtő berendezés, mely az adatok átjuttatásában segíti az óceáni mérőbójákat és ballonokat, illetve az elszigetelt meteorológiai állomásokat	–
SAR ⁷	121,5, 243 és 406,05 MHz-es rádióadás	Észlelő és átjuttató antenna-berendezés a vészjelzést leadó hajók és repülőgépek földrajzi helyzetének azonosítására	–

Megjegyzések:

- ¹ Advanced Very High Resolution Radiometer
- ² High Resolution Infrared Radiation Sounder
- ³ Advanced Microwave Sounding Unit
- ⁴ Solar Backscatter Ultraviolet Radiometer. Két alegysége: CCR (Cloud Cover Radiometer) és egy monokromátor
- ⁵ Space Environment Monitor. Két alegysége: TED (Total Energy Detector) és MEPED (Medium Energy Proton and Electron Detector)
- ⁶ Data Collection System
- ⁷ Search and Rescue Instruments

2. táblázat
A NOAA KLM kvázipoláris műholdakon megtalálható fontosabb mérőműszerek és adatátjuttató berendezések

helyezkedik el, vagyis rádióadása fizikailag vehető. Ekkor a vevőantenna a műhold látókörében (ún. *footprintjében*) fekszik. A műhold mindig az utoljára mért adatokat sugározza ki folyamatos adatáram formájában (melynek adatátviteli sebessége 665400 bit/másodperc), így csak azok az adatok érhetők el egy adott vevőantenna segítségével, melyeket a műhold műszerei a horizonttól horizontig tartó pályájuk során mértek. A

horizonttól horizontig ívelő pályán maximum 15,5 perc alatt halad végig a 833 km magasan keringő műhold, és maximum 16 perc alatt a 870 km magasan keringő. A maximum értékek arra az esetre vonatkoznak, amikor a műhold pontosan a vevőantenna felett halad át. A HRPT-vel érkező adatáram tartalmazza az AVHRR/3 sugárzásmérő adatait, az AMSU vertikális szondázó egység méréseit, és a TIROS információ-feldolgozó egység (TIP, TIROS Information Processor) adatait. Ez utóbbi a méréshez tartozó pontos időpontból, a műhold helyzetére és működésére vonatkozó adatokból, a HIRS/3, a SEM/2, az SBUV/2 műszerek mért adataiból, és a DCS/2 adatgyűjtő továbbított adataiból áll. A WMO felmérése alapján világszerte 628 HRPT vevőállomás volt 2000-ben (NOAA, 2002).

(2b) Ún. közvetlen nagyfrekvenciás adatátvitellel (DSB, Direct Sounder Broadcasting) külön elérhető a HIRS/3, a SEM/2 és a DCS/2 adatai anélkül, hogy a költségesebb és komplikáltabb HRPT vevőberendezést telepíteni kellene.

(2c) Az automatizált képtovábbítással (APT, Automated Picture Transmission) érkező adatokhoz szükséges a legkevésbé költséges és legegyszerűbb vevőállomás, ezért igen elterjedt: világszerte 4097 ilyen vevőállomást regisztráltak 2000-ben (NOAA, 2002). Az így elérhető adatok azonban csak az AVHRR/3 műszer által mért látható és infravörös képből készült csökkentett felbontású ($4 \text{ km} \times 4 \text{ km}$) képek, melyek szintén csak akkor vehetőek, ha a műhold a horizont felett tartózkodik.

1.2. Az Eötvös Loránd Tudományegyetem HRPT vevőállomása

Az ELTE TTK Környezetfizikai Tanszékcsoport 2002-ben telepítette HRPT vevőállomását (43. ábra), melyet egy elnyert OM nagyműszer-pályázatból finanszírozott kb. 35 millió Forint értékben. A vevőberendezés az egyetem lágymányosi épületegyütteséhez tartozó Északi tömbjének tetején (É: $47,475^\circ$, K: $19,062^\circ$), kb. 35 méter magasan került elhelyezésre. A telepített vevőberendezés Quorum típusú vevőfejjel és mozgatószerkezettel, Datatools Product antennával és Kongsberg Spacotech gyártású adatgyűjtő szoftverrel rendelkezik. Ezek segítségével az alábbi műholdak adása vehető: az amerikai NOAA-12, NOAA-14, NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, illetve a kínai Fengyun-1d. A kezdeti működési hibák óta az adatvétel gyakorlatilag problémamentes. Az így vett ún. HRPT-fájlokat elsődlegesen a Geofizikai Tanszék Úrkutató csoportja kezeli, de a Meteorológiai Tanszéknek is folyamatos hozzáférése van az utolsó 3 hónapnyi áthaladások HRPT-fájljaihoz.

2. Az antenna által vett nyers adatok előkészítése

2.1. Az adatok digitális tárolási módja

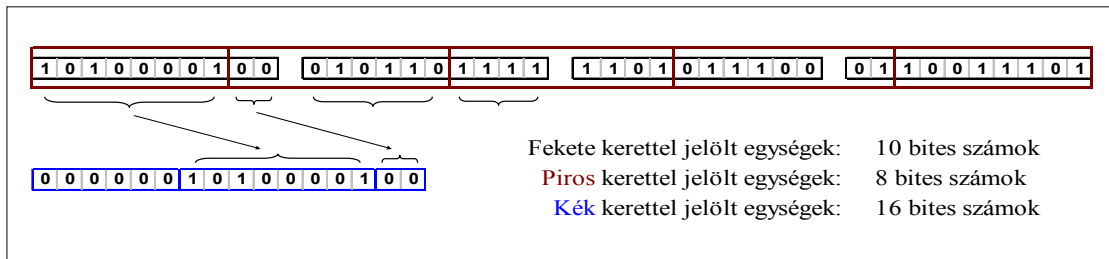
Mint minden digitális eszköznél, így a számítógépek esetében is az információ tárolása 2-es számrendszerbeli számok segítségével történik, melynek alapegysége a bit (0 vagy 1 értékkel). Így van ez ma már a műholdak adattovábbítása során is, ahol a régi analóg technológiát váltotta fel a digitális képátvitel. A digitális technikában a biteket valamilyen szabvány szerint csoportosítani szokták, ennek megfelelően alkothat 8, 10, vagy 16 bit egy egészet, amely a számítástechnikában a szó nevet viseli. A napi gyakorlatban használt számítógépek 8 bitet tekintenek egy egységnek, s ezt nevezik 1 bájtynak. A mindennapokban használt IBM kompatibilis személyi számítógépek, a UNIX alapú munkaállomások (Silicon Graphics, HP, IBM, Sun, stb.), valamint a Macintosh számítógépek is az egész vagy valós számokat a megkövetelt pontosságtól függően egy bájton, vagy annak többszörösén tárolják. A számítógépes programnyelvek (pl. FORTRAN) adattípusai egységesen ennek megfelelően lettek kialakítva (pl. az egyszeres pontosságú valós számot 4 bájton, a dupla pontosságú valós számot 8 bájton tárolunk).

A NOAA műholdakról sugárzott adatok bináris szerkezetüket tekintve 10 bites formátumúak, vagyis 10 bit felel meg egy szónak, tehát egy tízes számrendszerbeli szám 10 biten van kettes számrendszerbeliként tárolva. Például a tízes számrendszerbeli 644, 2-es számrendszerben 1010000100-ként írható. Ezen a 10 helyiértéken a 0-tól 1023-ig terjedő egész számok tárolhatóak csak el $(2^0+2^1+2^2+2^3+2^4+2^5+2^6+2^7+2^8+2^9 = 1023 = 2^{10}-1)$. Megállapodástól függően akár a -512-től 511-ig terjedő intervallum számait is tárolhatnánk ezen a 10 biten, a definiált intervallum a tárolt mennyiséghez van igazítva. A 8 biten való adattárolás ugyanezt csak 0-tól 255-ig (2^8-1) engedélyezné, a 16 bit esetében pedig 0-tól már 65535-ig $(2^{16}-1)$. Míg az első nagyon kevés információ tárolására alkalmas, addig az utóbbi már túlságosan sokra. De a műholdakon levő műszerek felbontóképessége a távolság miatt a 16 bites tárolást már nem igényli.

Az adattovábbítás rendszerének kiépítésekor egyrészt gondolni kellett arra, hogy minél rövidebb legyen az a fájl, mely a műholdról kisugárzásra kerül, másrészt pedig alkalmas legyen elegendő információ továbbítására. Így született meg az a kompromisszum, hogy egy számot 10 biten tároljanak, és így küldjék le a Földi vevőállomások felé.

Mivel a PC-k, munkaállomások és egyéb számítógépek a 8 bites információtárolási rendszeren alapulnak, ezért a nyersen érkező fájlokat át kell konvertálni a 10 bitesről 8 bites

formátumba. A közvetlen 1×8 biten való tároláskor információvesztés lépne fel, így ennek elkerülésére a 16-bites verziót kell használni. Ezzel ugyan megnő a fájl mérete, de a vevőállomáson ez már nem jelent problémát. A konverzió az 1. ábrán bemutatott módon történik. 4 darab 10 biten alapuló számot kezelünk egyszerre, mert $(4 \cdot 10) = 40$ a legkisebb közös többszöröse a 8-nak és a 10-nek. Az ábrán fekete kerettel jelölt egységek az eredeti szavak, a piros keretűek pedig a számítógéppel beolvastatott forma. Minden 16 bites egység első 6 bitje értelemszerűen 0 lesz. Az első 16 bites egység első 6 darab 0 karaktere után csatoljuk ezen túl még az első 8 bites egységet, illetve a maradék 2 bitre a második 8 bites egység első 2 bitjét tesszük. A fennmaradó 6 bitet a második 16 bites szám első 6 darab nulla karaktere után tesszük, melyet még 4 bit követ a harmadik 8 bites számból. Mire az ötödik 8 bites egység végére érünk értelemszerűen a 10 bites számok is elfogynak, előállítván így a 16 bites számokat, melyeket már tudunk kezelni.



1. ábra
A konvertálás sematikus módja

Ezzel a módszerrel minden nyers, a műholdképről érkező fájlt át kell konvertálnunk 16 bitessé az eredeti 10 bites formátumból.

2.2. A fájlok szerkezete

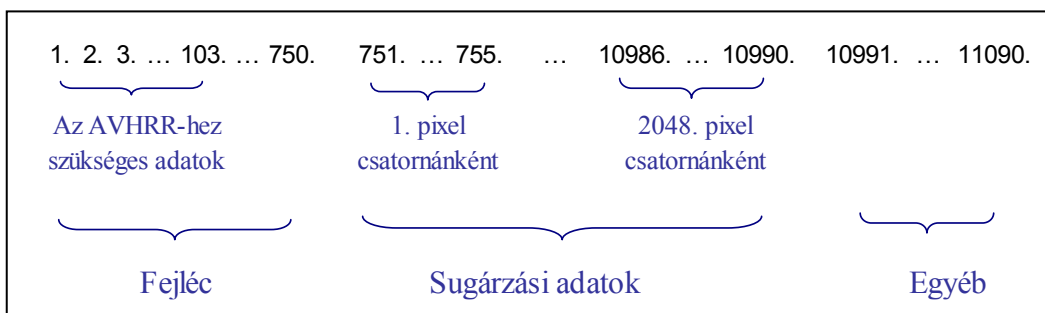
A „HRPT” módszerrel (ld. 1.1.1. alfejezetet) a Földre továbbított fájlok szerkezete minden esetben azonos. Ezekben a fájlokban a bináris értékek egymás után, mindennemű tagolás nélkül folytonosan következnek. Ahhoz, hogy a számunkra szükséges információkat kivehessük, meg kell ismernünk az adatok szerkezetét. Az AVHRR sugárásmérő műszer a műhold haladása közben soronként letapogatja a földfelszínt. Egy soron való végighaladás a másodperc tört része alatt történik (megközelítőleg 0,16 másodperc), mely időtartam alatt egyik pályaparaméter sem változik lényegesen. Így mindig az adott sor letapogatásának

kezdőidőpontját tekinthetjük az egész sorra érvényesnek, s ezt az időpontot rendelhetjük hozzá az adott sorban a műszerek által mért minden értékhez. Ugyanez vonatkozik a különböző pályaelemekre és a kalibrációs konstansokra is. Így ezen információkat elég soronként frissíteni, minek következtében minden sorkezdet esetén először egy 750 számból álló ún. *headerrel*, azaz fejléccel találkozunk. Ezen fejlécek szerkezete egységes (3. táblázat). A táblázatból kitűnik, hogy amennyiben csak az AVHRR képeit szeretnénk feldolgozni, és például a vertikális szondázás eredményeivel nem, akkor a fejlécekből csak az első 103 szóra van szükségünk.

Szó	A szavak jelentése
1 - 6	Szinkronizáló szavak
7 - 8	Az AVHRR azonosítója
9 - 12	A dátum kódja
13 - 22	Az AVHRR telemetriájára vonatkozó értékek
23 - 52	Az AVHRR kalibrációjához használt belső feketetestre vonatkozó adatok
53 - 102	Az AVHRR kalibrációjához használt külső feketetestre vonatkozó adatok
103	Szinkronizáló szó
104 - 623	A TIP (TIROS Information Processor) adatok egy része és AMSU adatok
624 - 750	Tartalék szavak

3. táblázat
A HRPT fájlok fejlécének szerkezete

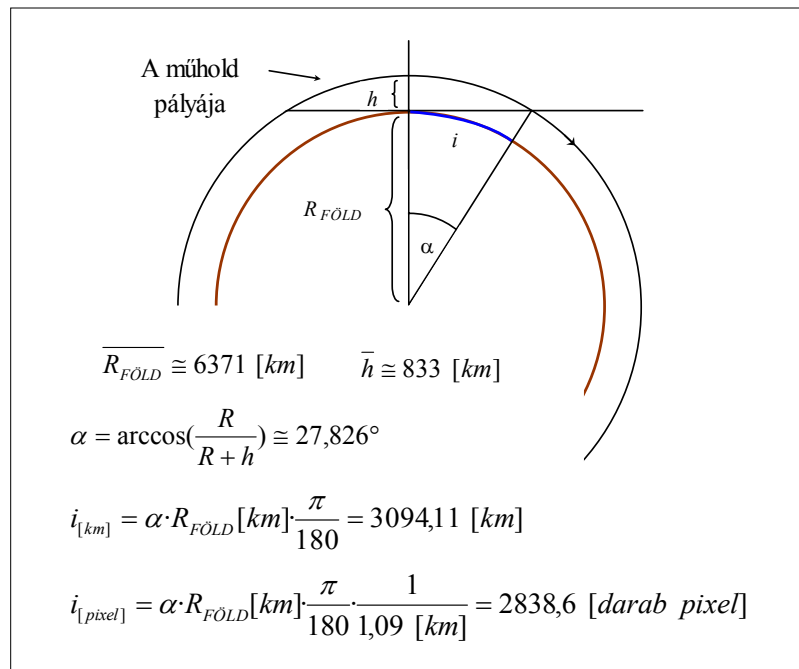
A fejléc után következnek az úgynevezett „Földadatok”, vagyis az AVHRR műszer által mért sugárzási értékek pixelenként. Egymás után nem két egymás melletti pixel értékei állnak közvetlenül, hanem pixelenként az adott pixel mind az 5 AVHRR csatornára vonatkozó értékei. Ezt hívják BIP (Band Interleaved by Pixel) tárolási módnak. Egy sor 2048 darab pixelből áll, így ez összesen $5 \cdot 2048 = 10240$ darab sugárzási érték soronként. Ezek után még 100 darab egyéb, a szinkronizációhoz szükséges szó áll. A fenti szerkezetet illusztrálja a 4. táblázat.



4. táblázat
A HRPT fájlok szerkezete (1 sorra vonatkoztatva)

Minden teljes letapogatott sor után, vagyis 11090 darab szó után 7 felesleges bájt áll, mely a vevőállomásra jellemző érték. Ezután következik az újabb sor, mely ismét a fent leírt szerkezettel rendelkezik, s a fejléccel kezdődik.

Az AVHRR műholdképek a fent vázolt struktúra alapján így mindig azonos oszlopszámúak, csak soraik száma változó. A sorok száma ugyanis függ az adattovábbítás sikerességétől, illetve attól, hogy a horizont közelében pontosan hol, hány fok közelében tűnik el a műhold a földi vevőberendezés látóköréből. Ha nem létezne sem domborzata, sem légköre bolygónknak, akkor horizonttól horizontig követhetnénk a műholdakat (NOAA-15, -16, -17), melyek AVHRR műszere átlagosan kb. 5677 (= 2·2838,6) sort tapogathatna végig (2. ábra). Lapultsággal rendelkező bolygónk esetében ez nyilván a földrajzi szélességtől függő érték.



2. ábra

A műhold által letapogatott maximális tartomány, melyről képes továbbítani az adatokat a földi vevőállomásnak

Mivel ez a feltételezés nem igaz, hiszen bolygónk rendelkezik légkörrel és domborzattal, ezért gyakorlatilag azt mondhatjuk, hogy kb. 5°-os magassági szögtől tekinthető a vétel minőségileg elfogadhatónak (Tánczer, 1988).

2.3. Az AVHRR műszerrel mért adatok nyers megjelenítése

A megismert fájlstruktúra alapján összerakhatók az AVHRR műszer által mért sugárzási értékek csatornánként egy-egy képpé. Mint a legtöbb számításunkat, így ezt a megjelenítést is egy IDL nyelven írt program segítségével hajtjuk végre. A beolvasott kép legegyszerűbb ábrázolására példa a 3. ábra. Ez a NOAA-17 2003.07.22 09:31-es áthaladásának 2-es csatornája, fekete-fehér megjelenítési módban. Jól kivehető, hogy mivel a műhold szenzora a letapogatott gömbfelületet egy síkra képezi le, ezért a kép szélén torzulás lép fel. Ezt egy egyszerű geometriai művelettel korrigálhatjuk (4. ábra, ugyanarra az áthaladásra), azonban hangsúlyoznom kell, hogy ez pusztán az ilyen jellegű megjelenítéseknel alkalmazható, mert ilyenkor a kép szélén levő pixelek torzulnak (ld. 6. ábra). A korrekció matematikai alapja egy hengerfelületnek trigonometrikus összefüggések segítségével történő leképezése. Ezeken a képeken megfigyelhető az ún. becsillanásnak nevezett jelenség is. Ez a kellően sima vízfelszínnek esetében jelentkezik, képeinken a Földközi-tenger középső, keleti részében rajzolódik ki, a Jón-tengernél, a környezetüknél világosabb pixelek formájában. A jelenség a szélcsendes időjárás hatására létrejövő szinte tükörsima vízfelszínnek köszönhetően alakul ki.



3. ábra

Nyers kép

/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31, 2-es csatorna /



4. ábra

Geometriai korrekcióval módosított,
saját színezésű kép

/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31, 2-es csatorna /

A nyers képek megjelenítéséhez tetszőleges színskálát választhatunk, akár általunk készítettet is. Ennek alapja az, hogy a pixeleken tárolt értékek tulajdonképpen nem mások, mint az AVHRR sugárzásmérő műszer által mért beütésszámok, melyekhez tetszés szerint hozzárendelhetünk bizonyos színeket. Így készült egy saját készítésű színskála segítségével a már bemutatott 4. ábra, melyen a geometriai korrekciót is szemléltettem. Az egyik szokványos, gyakran alkalmazott színezési eljárás az ún. „valódi színezéssel” készített kép (*True color*), melyet RGB színkeverési módnak (*Red-Green-Blue*) is szoktak nevezni. Ekkor 3 különböző csatorna egybevetésével úgy készül a kép, hogy mindegyik csatornához különböző színt, azaz ennek lineáris skáláját rendelik (a 0-hoz a legsötétebb árnyalatot, az 1023-hoz pedig a legvilágosabbat). Vagyis az 1-es, első látható csatornához a pirosat, a 2-es, második látható csatornához a zöldet, a 4-es, második infravörös csatornához pedig a kék színt rendeli. Majd pedig ezeket a 3 csatornából eredő színértékeket egy pixelen ábrázolják (innen a név: RGB színkeverés). Erre példa az 5. ábra, mely a korábbi ábrákon szereplő áthaladásra mutatja a geometriai korrekció utáni ún. *true color* képet. Ezzel a megjelenítéssel a zöld különböző árnyalatiban játszik a talaj, sötétkékben a szabad vízfelszín, fehérben a nimbostratus és a cumulonimbus, világos kékes-lilában a cirrus felhők és sárgában az altocumulusok. Ezentúl e megjelenítési forma a többi felhőfajta megkülönböztetésére is sokkal jobban alkalmas, mint egy egyszerű fekete-fehér színskála.



5. ábra
Geometriai korrekcióval ellátott
„True color” színezésű kép
/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31/

3. Az AVHRR műholdmezők földrajzi azonosítás

3.1. A földrajzi azonosítás célja

Az előfeldolgozás leglényegesebb momentuma a földrajzi azonosítás: a földrajzi fókusz, a hozzá kapcsolódó jellegzetes földrajzi objektumok (tengerpartok, folyók, stb.) és az országhatárok képre vitele. A cél az, hogy minden AVHRR képi pixelhez egyértelműen hozzárendeljünk egy (λ, φ) földrajzi koordinátapárt (földrajzi hosszúság és szélesség). Ez egy többlépcsős, összetett folyamat, melynek elvégzése a műholdokról érkező fájlok fejlécén kívül (ld.: 2.2. alfejezetet) bizonyos navigációs táviratok pontos ismeretét is igényli. Ilyen távirat a NOAA által kiadott ún. TBUS-távirat (TIROS Bulletin United States), mely már a műhold áthaladása előtt 2-3 nappal korábban az alábbi címen letölthető az Internetről: <http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/ptbus.html>.

3.2. A TBUS-távirat

A Kepler-törvények és a gravitációs perturbációkat leíró egyenletek segítségével elvileg egyértelműen meghatározható a műholdak mozgása, helyzete és a felszíni vetületpontok, ún. talppontok koordinátája. Ez egyrészt egy bonyolult számításokat igénylő műveletsorozat, másrészt gyakran olyan nem várt hatások is módosíthatják, mint pl. a naptevékenység, amikor a normális eltérésnél 8-10 pixellel is több előfordulhat a kép és a ráillesztendő földrajzi koordináták között (Labrot et al., 2003). Hogy a számítások a valóságot reálisan követhessék, szükség van a műholdak meghatározott időközönkénti bemérésére, és a pályaelemek ilyen módon történő korrigálására. A talppontkoordináta-számítás ezen problémáinak elkerülésére a műholdat működtető ország, jelen esetben az USA, távirati formában közli a pályaadatokat. Ezen információkat tartalmazza a NOAA által közzétett TBUS-távirat, melyben azonos formátumban egyszerre 4 meteorológiai műholdra vonatkozó pályá-paramétereket találhatjuk: NOAA-14, NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17.

Egy konkrét műholdról szóló rész 4 állandó szerkezetű szakaszból áll, melyből a földrajzi azonosításhoz csak az utolsó, negyedik rész (PART IV.) első 3 sorára van szükség. Ezt a TBUS-táviratrészt a NOAA-17-es műhold 2003. július 22-ei áthaladására az 5. táblázat, s annak dekódolását a 6. táblázat mutatja be.

PART IV

2002 032A 05580 203023906282 030722003425503 3079646
 01011641 01012248 00114028 27071046 27327094 09873965
 08928461 07189201 P004105250 M071831467 M000000001

5. táblázat

A TBUS-távirat részlete a NOAA-17-es műholdra 2003. július 22-én

2002 032A	=	A műhold nemzetközi azonosítója	
0558	=	Pályaszám (A felszállás óta megtett Föld körüli keringések száma az aznapi első felszálló pálya időpontjáig)	
203023906282	=	A nap első felszálló csomójának időpontja napokban kifejezve 9 tizedes pontossággal január 1. 00 UTC-től számítva Az év 203. napja, ahol a 0,023906282 törtrész átszámítva: 0 óra 34 perc 25,503 másodperc	
030722003425503	=	Az időpont megadása, amikortól a távirat érvényes: 2003.07.22. 00 óra 34 perc 25,503 másodperc	
3079646	=	A tavaszpontban a greenw ichi óraszög értéke (fokban): 307,9646°	
01011641	=	Anomalisztikus periódus (percben): 101,1641 perc	
01012248	=	Sziderikus keringési idő (percben): 101,2248 perc	
00114028	=	Az excentricitás értéke: 0,00114028	
27071046	=	A perigeum argumentuma (fokban): 270,71046°	
27327094	=	A felszálló csomó rektaszenziója (fokban): 273,27094°	
09873965	=	A pályahajlás - inklináció - értéke (fokban): 98,73965°	
08928461	=	Közepes anomália (fokban): 89,28461°	
07189201	=	A fél nagytengely hossza (km-ben): 7189,201 km	
P004105250	=	+ 410,5250 km	} Az epocha helyzete (km-ben), rendre x, y és z komponensek. Előjelek: P: +, M: -
M07183167	=	- 7183,167 km	
M000000001	=	- 0,0001 km	

6. táblázat

Egy példa a TBUS-távirat PART IV részének dekódolására

A pályainformációkon túl a földrajzi azonosításhoz csak azokra az időpontokra van szükségünk, melyek a HRPT fájl fejlécében találhatóak külön-külön minden leképzett AVHRR sorra vonatkoztatva. Ehhez a már megismert fejléc szerkezete alapján minden sorból 4 darab szóra van szükségünk: a 9.-re, 10.-re, 11.-re és a 12.-re. Azonban ezeket a számokat először eredeti, bináris formában kell látnunk, ezért ezt a 4 szót vissza kell konvertálnunk a kettes számrendszerbe. Ennek oka a következő: sok egyéb paraméter mellett a dátum sem úgy lett kódolva, hogy szavanként mind a 10 rendelkezésre álló karaktert felhasználták volna, hanem csak egy bizonyos, előre meghatározott részét, amennyi elég az adott információ

maximális értékének a tárolásához is. Ezért így, bináris állapotban kell a szükséges részeket meghatároznunk, és csak utána visszakonvertálni a tízes számrendszerbe. Ezt a folyamatot hivatott bemutatni a 7. táblázat a NOAA-17 2003.07.22 09:31-es áthaladás példáján. Minél pontosabb a műhold órája és minél jobban összehangolt a NOAA központ órájával, annál pontosabb a földrajzi meghatározás. Természetesen itt is lépnek fel hibák folyamatos időelcsúszás formájában. Ezért a NOAA állandóan közzéteszi az órahibák aktuális értékét az Interneten (<http://noaasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/status.html>), a műholdak belső óráját pedig adott időközönként lenullázza.

9. szó:	0 1 1 0 0 1 0 1 1 0	Piros karakterek: állandó értékek
10. szó:	1 0 1 0 1 0 0 0 0 0	Fekete karakterek: a nap sorszáma január elsejétől
11. szó:	1 0 1 1 1 1 1 0 1 1	A kék karakterek egyesítve: az ezredmásodpercek értéke
12. szó:	0 1 1 1 0 1 0 1 1 1	
(0 1 1 0 0 1 0 1 1 2) ₂ = (203) ₁₀		
(0 1 0 0 0 0 0 1 0 1 1 1 1 1 0 1 1 0 1 1 1 0 1 0 1 1 1) ₂ = (34270679) ₁₀		
34270679 / 1000 / 3600 = 9,5196. óra a nap folyamán		
⇒ 203. nap 9 óra 31 perc 10,679 másodperc		

7. táblázat

A dátum soronkénti értékének meghatározása a fejlécben tárolt szavak alapján

Az adott áthaladás során érkező adatokból ezzel a módszerrel előállítunk egy olyan, időpontokat tartalmazó fájlt, melyet a földrajzi azonosítás első részét elvégző segédprogram, az ún. műhold-navigációs program használ fel.

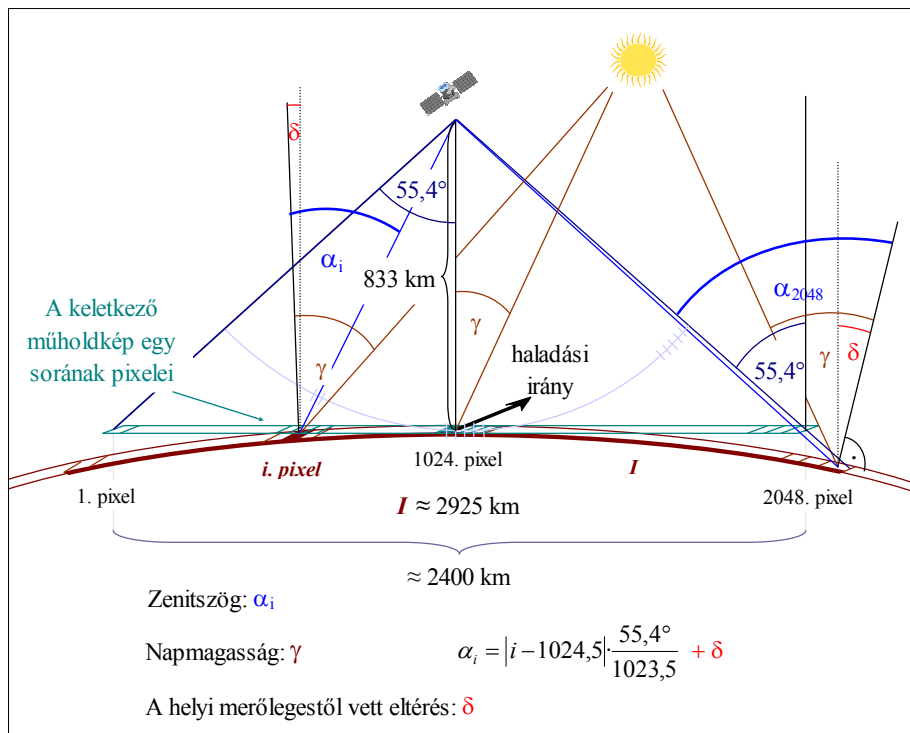
3.3. A műhold-navigációs program

A műholdak talppont-koordinátáinak meghatározására szolgáló több lehetséges módszer közül mi az ún. Brouwer-Lyddane eljárást választottuk. A modell algoritmus a műholdak mozgását leíró egyenletek analitikus megoldása egy leegyszerűsített, perturbált potenciálmezőben, mely Brouwer és Lyddane nevéhez fűződik. Lyddane (1963) módosította Brouwer (1957) modelljét azért, hogy zéró excentricitás és 0°-os inklináció esetén is alkalmazható legyen az eljárás. Az így született módszerrel ±3 pixelnyi pontossággal lehet a műhold földrajzi helymeghatározását elvégezni, feltételezve a műhold belső órájának minél

nagyobb pontosságát, s az általa generáló időpontok helyességét, melyek a HRPT fájl fejlécéből vehetők ki.

A program több száz soros forráskódja a szubrutinokkal együtt az Interneten több helyen is megtalálható (pl. <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/podug/html/f/app-f.htm>, <http://stratus.oce.orst.edu/docs/pod/ncdcpodf.pdf>). Ezek mind általánosított verziók, hogy a felhasználók a saját igényeiknek megfelelően dolgozhassanak vele.

Az általunk választott navigációs program forráskódja FORTRAN nyelven íródott. Bemelő információként kéri a HRPT fájl fejlécéből kinyert soronkénti időpontokat, a dátumot, illetve az arra a napra, s az adott műholdra vonatkozó, már említett TBUS-távirat megfelelő részét. Ezeket egy, az IDL nyelvén megírt saját program segítségével vesszük ki a HRPT-fájlból. A számításhoz szükséges konstansokat a program tárolja, és felhasználja. Ezek segítségével 3 fájlt kapunk eredményül. Az első, és legfontosabb a (λ, φ) földrajzi hosszúság és szélesség koordináta-párokat tartalmazza a műholdkép minden pixelére. A másik két fájl pedig ugyanígy pixelenként tartalmazza a zenitszög és a napmagasság értékeit. (Napmagasság: az adott pixelből látott Nap és a zenit – helyi merőleges – által bezárt szög. Zenitszög: az adott pixelből látott műhold és a zenit által bezárt szög.) Ezt a két szöget mutatja be többek között a 6. ábra.



6. ábra

A zenitszög és a napmagasság szögének szemléltetése

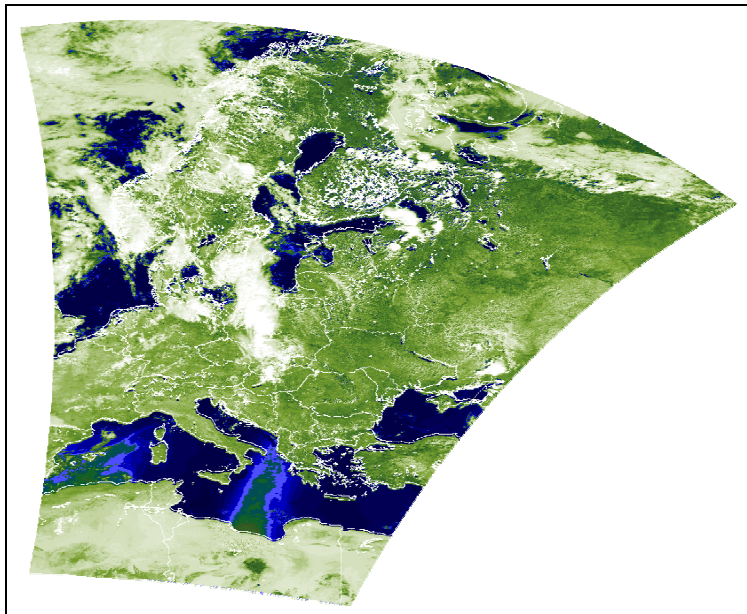
A NOAA műholdak földrajzi azonosításhoz olyan állapotba kell hoznunk a rendelkezésre álló FORTRAN nyelvű programot, hogy az a műholdképeinkkel és az Internetről letöltött TBUS-fájlokkal kompatibilis legyen. A program a HRPT fájlokból csak a fejlécekben található időpontokat használja fel, s így a TBUS-távíratok segítségével számolja ki, majd írja fájlba minden pixelhez a (λ, φ) földrajzi koordináta-párokat (az előzőekben ismertetett Brouwer-Lyddane módszerrel). Ugyanígy meghatározza minden pixelhez a napmagasságot és minden oszlophoz a zenitszög értékét. A zenitszög az időtől és a Föld alakjától független változó, pusztán síkgeometriai fogalom, így elég azt az első sorra kiszámolni.

Mivel a vétel kezdete és vége az optikailag vastagabb légkörön való áthaladás miatt pontatlanabb, ezért ekkor az adatok hibával terheltebbek, mint a vétel középső szakaszán. A rádiós vételek eme hibaforrásával először a letapogatások időpontjait vizsgálva talákoztunk. Ugyanis a NOAA-15, -16, -17 műholdaknál bármely kép készítésekor a sorok közötti időkülönbség normális esetben 166,6 ezredmásodperc. A kép két szélén ettől azonban jelentős eltérések mutatkoznak. Ezért erre egy olyan korrekciós áthidaló megoldást kellett bevezetni, hogy nagy eltérések esetén a program módosítsa az idősort, mégpedig a már felfedezett időhányadosoknak megfelelően. Az eredeti program ezt a korrekciót az első sorhoz igazítva végzi el, vagyis, ha már a 2. sor időpontja nem 166-167 másodperccel későbbi, akkor azt kijavítja az általa helyesnek vélt értékre. De a fájl vételének kezdete és vége a korábbiakban említett pontatlansággal bír, ezért gyakran előfordul, hogy a legelső sor is rossz, így hibás időponthoz igazítjuk a teljes képet. Ez a magyarázata annak, hogy olyan áthaladásokkal is talákoztunk, amikor a kép és a hozzáillesztett fokhálózat az azonosítás eredményeként több, mint száz sorral volt eltolva. Ez elfogadhatatlanul nagy hibának számít, hisz az eltolódás átlagos értéke 6-7 sor. Ez a programhiba egyszerűen kiszűrhető, ha mi magunk előre kijavítjuk a bemenő időpontokat, s az időpontok program általi módosítására nem adunk lehetőséget. Az idősortnak ezt a korrekcióját célszerű úgy elvégezni, hogy a kép közepéről egy jónak vélt időponthoz képest extrapolálunk mindkét irányba a helyes 166,6 ezredmásodperces különbséggel. Ezekkel a korrekciókkal nem viszünk hibát a földrajzi helymeghatározás pontosságába, sőt ellenkezőleg, javítjuk a hibákkal tűzdelt állapotához képest.

Ugyanezt a hibaforrást igyekszünk elkerülni, amikor a felhasználandó TBUS-távírat nevének előállításához (pl. ptbus203.txt vonatkozik 2003. július 22-re, azaz az év 203. napjára) szükséges Juliánusz-naptár szerinti dátumot nem a kép elejéről vesszük ki, hanem a közepéről, s onnan is csak akkor, ha előtte és mögötte is ugyanaz a Julián nap áll. Az általunk írt program automatikusan felismeri, melyik NOAA műhold HRPT fájlja az, melyet épp

beolvasunk, és ennek megfelelően keresi ki a TBUS-távirat megfelelő, arra a műholdra vonatkozó részét (az 5. táblázatban bemutatott 3 sort). Ezt egy meghatározott nevű szövegfájlba kiírja a műhold-navigációs program számára. Ezen kívül átadunk ennek a FORTRAN programnak egy fájlt, mely tartalmazza a sorok számát, az évszámot, az idősort és a megfelelő TBUS-fájl nevét.

Az eredményül kapott szélességi koordináták alapján egyértelműen eldönthető, hogy felszálló (dél-északi áthaladású), vagy leszálló (észak-déli áthaladású) pályán haladt-e a műhold, amikor a felvétel készült. Ezt az eredményt szintén felhasználjuk a továbbiakban. Azt tekintjük alapértelmezettnek, amikor leszálló a pálya, és ha felszálló, akkor a teljes képi pixeleket csatornánként, a napmagasság értékeit, a λ és a φ tömböket középpontosan szimmetrikusan tükröznünk kell. Ezen tömbök beolvasása után már lehetőség nyílik egy IDL-



7. ábra

A műhold-navigációs program által elért geolokalizáció megjelenítése Mercator-féle térképvetületben
/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31, 2. csatorna /

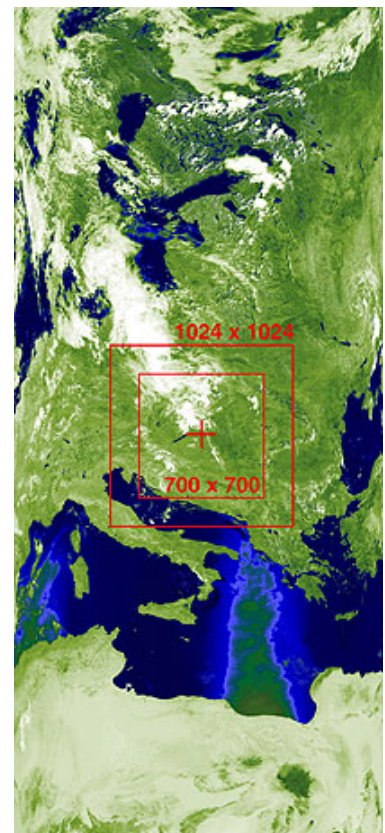
ben megírt térképező program segítségével a képszerű megjelenítésre. A 7. ábrán láthatjuk a földrajzi azonosító program eredményét és a pontosságát (azaz inkább pontatlanságát), amire ez a rutin képes. A kép a NOAA-17 korábban már bemutatott 2003. július 22-ei áthaladáskor készült. A képi pixelek és a térképi partvonalak közötti szemmel látható több pixelnyi eltérés ennél a navigációs eljárásnál úgymond természetes

(ez a módszer pontossága), de ennek ellenére korrigálni kell. Ehhez azt feltételezzük, hogy az eltolás a 7. ábra minden pontján azonos. Így ha a kép egy pontján kézzel a megfelelő pixelpontosságig továbbigazítjuk a partvonalakat, akkor ez alkalmazható a kép többi pontjánál is. Ez a feltételezés a kivágat méretének növekedésével egyre kevésbé helytálló, azaz az eltolás nem marad állandó. Számunkra azonban ez nem jelent túl nagy problémát, ugyanis nem kívánjuk megőrizni a teljes képet, hanem csak egy bizonyos, jóval kisebb kivágatát, ahol pedig a módszer kielégítő pontosságú földrajzi azonosítást tesz lehetővé egyetlen állandó eltolási értéket használva (ld. a későbbiekben bemutatásra kerülő 14. ábrát).

3.4. A közép-európai kivágatok elkészítése

Az ELTE TTK Környezetfizikai Tanszékcsoportja által vásárolt vevőberendezés segítségével az alábbi műholdak adása vehető: az amerikai NOAA-12, NOAA-14, NOAA-15, NOAA-16, NOAA-17, illetve a kínai Fengyun-1d. Ezek közül a NOAA-12 képeinek földrajzi azonosítása nem végezhető el. A műhold ugyanis már nem az eredetileg tervezett időpontokban halad át sem Amerika, sem Európa felett. A mozgását leíró Kepler-egyenletekben szereplő harmadrendű és annál nagyobb rendű tagok összeadódása a hosszú évek alatt mára már jelentőssé vált (a felbocsátás dátuma: 1991. május), ezért a földrajzi azonosítását már nem lehet megfelelő pontossággal elvégezni. Ezért nem is adnak már ki TBUS-távíratot erre a műholdra. Számításba kell venni a műholdak műszereinek előregedését is, ami miatt a NOAA közel 2 évenként új műholdakat bocsát fel. A NOAA-14-es műholdról érkező adatok műszerhiba miatt állandóan zajosak és hibával terheltek, ezért ezen képek feldolgozása sem lehetséges. Tekintve, hogy a Meteorológiai Tanszék elsődlegesen a NOAA műholdképek feldolgozását tervezte el, így a kínai FY-1d műholddal egyelőre nem foglalkozunk.

Figyelembe véve a 16 bites NOAA HRPT fájlok méretét (~100 MB áthaladásonként), a használható napi áthaladások számát (műholdanként 2-3 darab) és hogy mindez a hozzáférhető műholdak közül teljesül arra a háromra, melyekkel dolgozni kívánunk (NOAA-15, -16, -17), meglehetősen nagy méretű háttértárra lenne szükségünk, ha ezt a hatalmas adatmennyiséget nyers formában szeretnénk tárolni. Számunkra igazán csak a Közép-Európai térség fontos annyira, hogy a beütésszámokat tartalmazó eredeti képfájlokat is megőrizzük. Így született a döntés, hogy a Tanszék nem fogja a teljes képeket az eredeti formában megőrizni, hanem csak egy adott kivágatot, a Kárpát-medencét, és szűk környezetét tartalmazó adatokat tároljuk. Azért, hogy kompatibilisek legyünk az Országos Meteorológiai Szolgálat által feldolgozott 1024×1024 pixeles kivágatokkal, mi is ekkora kivágatokat készítünk a térségről (8. ábra). Ezeket úgy határozzuk meg, hogy középpontnak a



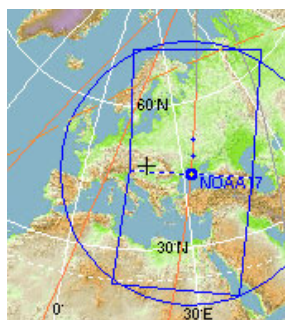
8. ábra

A kivágatok aránya
/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31,
2. csatorna /

(19°, 47°)-es koordinátpontot, vagyis a 19. keleti hosszúsági és a 47. északi szélességi kör metszéspontját választjuk. Ez a pont megközelítőleg Dunaújváros magasságában, de a Duna másik, keleti oldalán található, melyet a 8. ábra közepén vörös kereszt jelöl. Mivel a műholdak mindig nem ugyanazon pont felett repülnek át, s mivel ezen a 47. szélességi körön két egymást követő áthaladás közötti távolság ~1950 km, és egy kép pedig $2048 \cdot 1,09 \approx 2230$ km széles, ezért ugyanúgy megeshet az, hogy a számunkra legjobb áthaladás szélén vagyunk, mint az, hogy a közepén. Míg az utóbbi igen kedvező esetet jelent, addig az előbbi, vagyis amikor a leképezés szélére esünk, nem túl szerencsés, és ilyenkor egyáltalán nem tudjuk az 1024×1024 -es kivágatokat elkészíteni. Szintén nem készíthető el a kivágat, ha az adás ugyan fogható, de a képen a vevőantenna helye (jelen esetben Budapest) már nincs rajta. Ezt a három esetet szemlélteti a 9. ábra. A 9/a ábra egy olyan áthaladást mutat, ahol a műhold pontosan a kívánt koordináta (fekete kereszttel jelölve) felett halad át, a 9/b ábra olyan esetet, amikor a (19°, 47°)-es pont két áthaladás közé esik félútra, a 9/c ábra pedig azt az esetet, amikor már a képen nincs rajta a kivágat közepét jelentő koordinátpont. Ezen a három ábrán a narancssárga vonalak a soron következő áthaladásokat, a halvány szürke vonal a 9/a ábrán az előző áthaladást, a kék kör a műhold rádióadója által elérhető területet, az ezt metsző kicsit torz kék téglalap pedig azt a területet szemlélteti, melyről az AVHRR műszer által készített felvételhez a budapesti vevőantenna hozzáfér. A 9/a és 9/b ábra segítségével érthetővé válik, hogy bizonyos esetekben miért nem tudjuk elkészíteni az 1024×1024 -es kivágatokat. Ezért szükség esetén létrehozunk egy másik, kisebb kivágatot is (700×700 pixel), hogy megtarthassuk azon áthaladásokat is, melyeken a (19°, 47°)-es földrajzi koordinátájú pont a kép periferiáján található. E két különböző kivágat viszonyát is szemlélteti a már bemutatott 8. ábra. Sajnos így is előfordulnak olyan áthaladások, melyeken ezt a kivágatot sem lehet elkészíteni, azonban ennél még kisebbet választani több szempontból sem lenne célszerű.



9/a ábra



9/b ábra

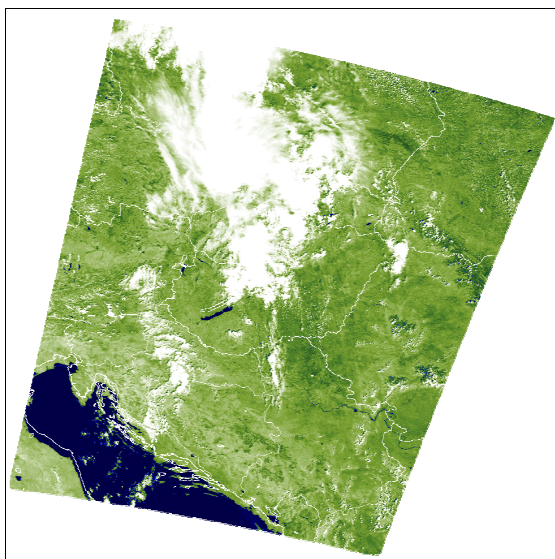


9/c ábra

A Kárpát-medencét tartalmazó kivágat elkészítésére alkalmas (9/a ábra),
és alkalmatlan áthaladások (9/b és 9/c ábra)

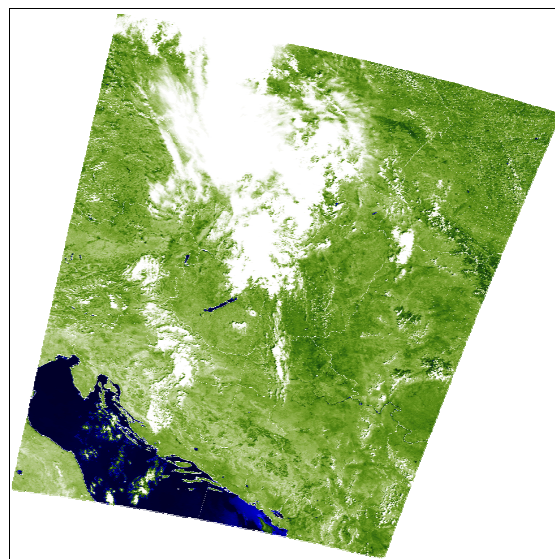
Egyrészt azért, mert azon már nem lenne rajta a teljes Magyarország, másrészt pedig minél jobban a kép szélén vagyunk, annál jobban torzul a leképezés, használhatatlanná téve így a pixeleket. Erre akkor is figyelniük kell, amikor a kivágat még éppen, hogy elkészíthető, azaz ha ennek kerete túl közel esik a kép széléhez (az általunk megengedett minimális pixeltávolság: 20 pixel). Az így elkészített kivágatok esetén a kivágathoz automatikusan készül egy szöveges fájl, melyben megtalálható a keret szélétől vett távolság is, jelezvén, mennyire ajánlott a szélső pixelek felhasználása. Tehát amikor csak lehet, elkészül az 1024×1024-es kivágat. A 700×700-as kép csak akkor készül el, ha a nagyobb nem készíthető el, de a kisebb még igen. Értelemszerűen van olyan áthaladás, amikor egyik kivágat sem készülhet el.

A kivágatok elkészítésekor először megkeressük azt a párt a rácsponti (λ , φ) koordinátapárok közül, amelyik legközelebb áll a (19° , 47°)-es koordinátájú ponthoz. Ennek környezetében fogjuk a (λ , φ) párokat kivágni. Mivel ekkor az illesztendő partvonalak még nem illeszkednek tökéletesen, ezért a képi pixeleket ténylegesen csak a korrekciós eltolás után vágjuk ki. Ennek az eltolási vektornak a megkeresése nem automatikus, hanem külső beavatkozást igényel. A már elkészült 1024×1024-es, avagy 700×700-as kivágatú térképhálózaton addig tologathatjuk az eredeti műholdképet (ld.: *10. és 11. ábra*), amíg az a számunkra megfelelő pontossággal nem illeszkedik. Ez az ún. vizuális illesztés. Az utolsó ilyen értékpárt tekinthetjük a keresett eltolási vektor végpontjának, s ennek segítségével már megtörténhet a kivágás a képi pixeleket és a napmagasságokat tartalmazó tömbökből is.



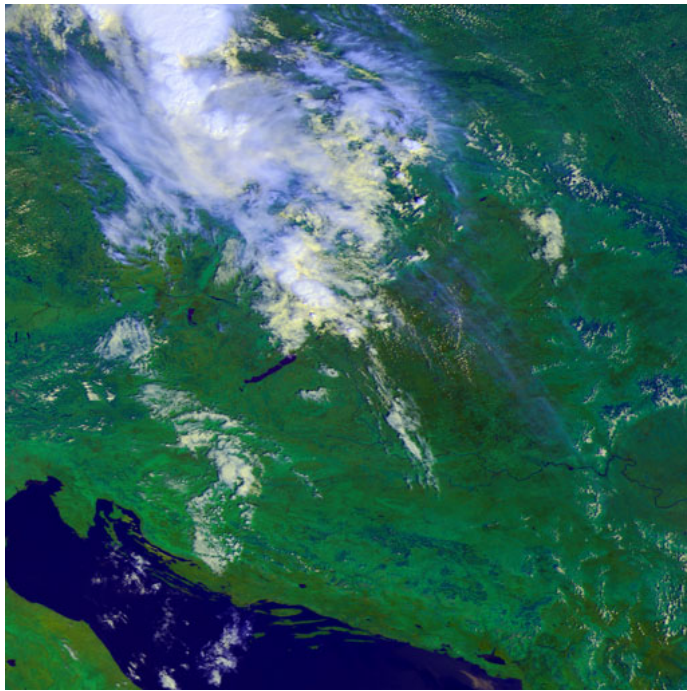
10. ábra

Kárpát-medence és térsége a kontúrok
finomillesztése előtt
/ NOAA-17. 2003.07.22 09:31. 2. csatorna /



11. ábra

Kárpát-medence és térsége a kontúrok
finomillesztése után
/ NOAA-17. 2003.07.22 09:31. 2. csatorna /



12. ábra
A már illesztett és korigált Kárpát-medence
méretű kivágat
/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31/

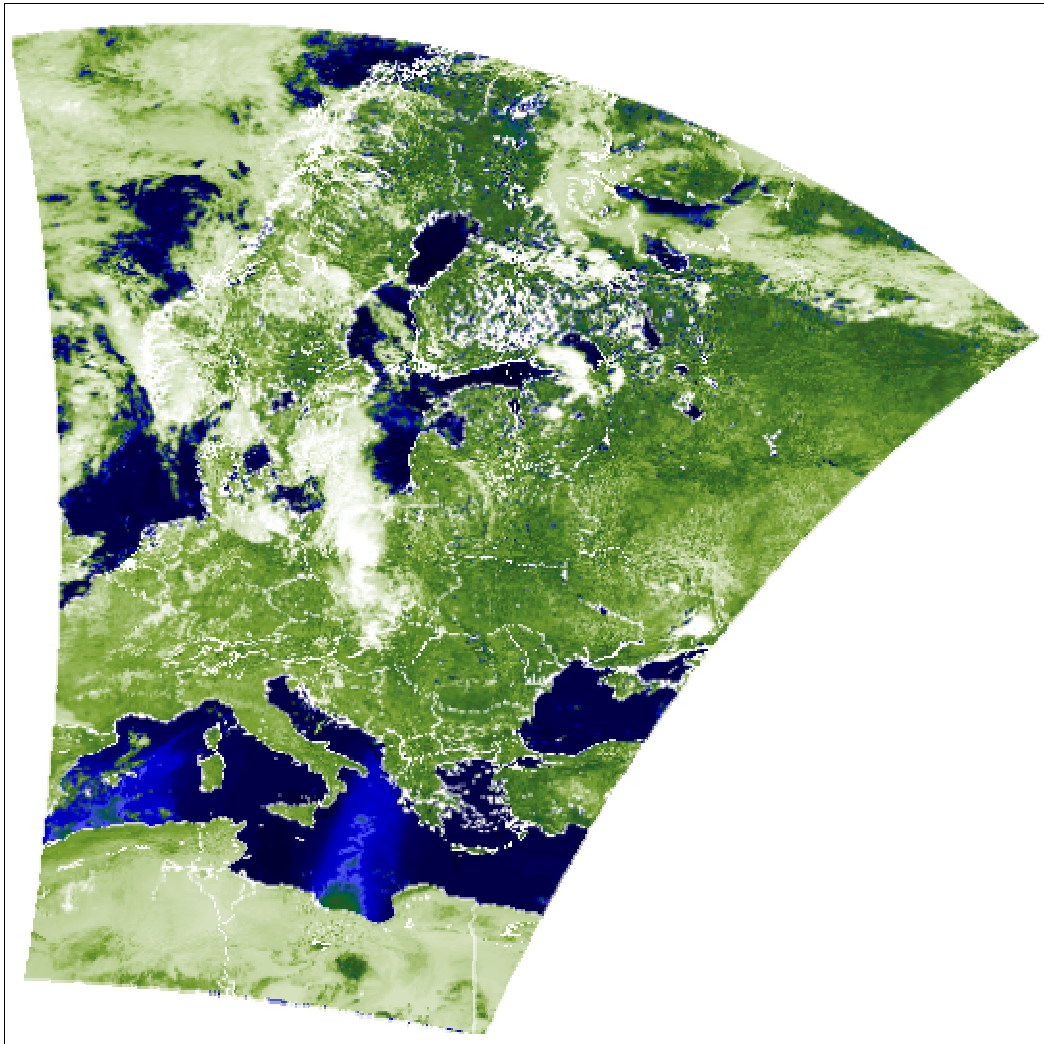
Ezeket a kivágatokat a további felhasználáshoz csatornánként fájlba írjuk. A *12. ábrán* a NOAA-17-es műhold 2003.07.22 09:31-es áthaladásának végleges, a Kárpát-medencére vonatkozó kivágata látható az ún. valódi színezéssel (True color).

Minden esetben – még akkor is, amikor kivágat nem készíthető el – a teljes képről csatornánként egy-egy nagy, eredeti felbontású, földrajzilag azonosítatlan kép készül, mely csak vizuális célokat szolgál. Ezen képek nem foglalnak túl sok helyet, azonban egyrészt információt adnak az

Európában uralkodó aktuális időjárási helyzetről, másrészt segítségül szolgálhatnak valamilyen speciális kutatási, oktatási célú képkereséshez. Tekintve, hogy az AVHRR szenzor 3-as csatornája két alternatív csatornát takar (ld. *8. táblázat*), ezért a képek legyártásakor a fájlnev erre is utal. E csatorna a NOAA-17 és NOAA-15-ös műholdnál napszaktól függően vált, a NOAA-16-nál pedig 2003 május elseje óta a kapcsoló meghibásodása miatt állandóan az éjszakai, ún. 'b' hullámhossz tartomány üzemel.

Így értük el egyik célunkat, vagyis sikerült megbízhatóan azonosítani műholdképeink pixeleit a földrajzi fókálózatban. Ennek eredményét mutatja be a *13. ábra* egy teljes, a NOAA-17-es műhold 2003.07.22 09:31-es áthaladásra vonatkozóan. Természetesen ilyen kép csak akkor készül automatikusan, ha a Kárpát-medencére vonatkozó kivágat a korábban ismertetett szempontok alapján elkészíthető. A *14. ábrán* az 1024×1024-es a kivágra vonatkozó földrajzi azonosítás eredménye látható, „True color” színezéssel. Az adatok további felhasználása céljából a kivágatok mellett a hozzájuk kapcsolódó információkat tartalmazó fejléceket is eltároljuk. Az így nyert fájlok 1024×1024-es kivágatok esetén áthaladásonként körülbelül 24 MB tárhelyet igényelnek, hisz az 5 kép és a fejléc-fájl 2 bájtos tárolással, a λ , a φ és a napmagasság értékek pedig 4 bájtos tárolással készülnek, így képezve 5 db 2048 kB-os, egy 1500 kB-os és 3 db 4096 kB-os fájlt. Ez a tárigény mindössze ¼-e az

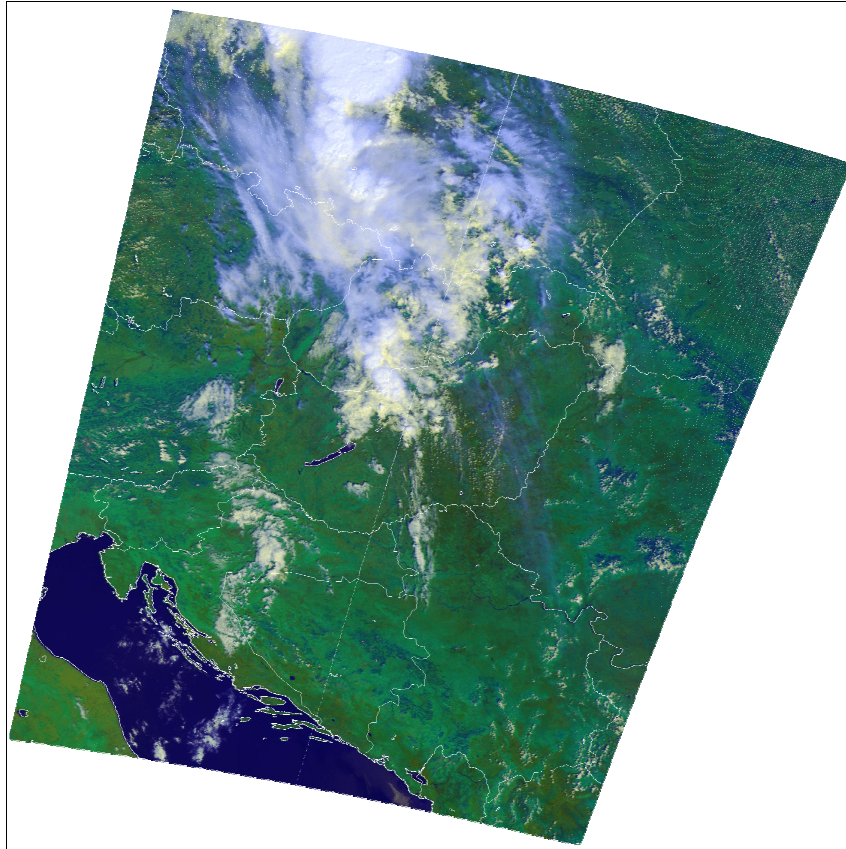
eredeti 16 bites formátumra átkonvertált fájlnak, mely még a földrajzi koordinátákat és a napmagasság értékeit nem tartalmazza.



13. ábra

A földrajzi azonosítás eredménye a Brouwer-Lyddane módszerrel a teljes képre
/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31, 2-es csatorna /

Megfigyeléseink szerint az esetek többségében az y irányú eltolás jelentősebb mértékű, mint az x irányú, vagyis a szélességi körök menti. Ez csak azt bizonyítja, hogy az azonosítás során fellépő pontatlanság elsődlegesen valóban a műhold belső órájának hibájából ered, és ezért ezt utólag már nehezen lehet korrigálni. Kovács és Szenyán (1996) a NOAA-11-es műhold képeit vizsgálva hasonlóan arra a következtetésre jutott, hogy a nappali és éjszakai áthaladások órahibából eredő pontatlanság állandónak tekinthető, melyet figyelembe véve a földrajzi azonosítás már megfelelő minőségben elvégezhető.



14. ábra

A földrajzi azonosítás eredménye a Brouwer-Lyddane módszerrel
a Kárpát-medence méretű kivágotra
/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31/

3.5. Egyéb módszerek az AVHRR mezők földrajzi azonosítására

A másik igen gyakran használt navigációs távirat a NORAD (North American Air Defense Command) által kibocsátott két soros távirat, melyet a NORAD SGP4 (Simplified General Perturbation) modellből állítanak elő. Ehhez a távirathoz szintén létezik földrajzi azonosító program. További ismert navigációs eljárás az ún. Clift modell, melyet az ausztrál CSIRO (Commonwealth Scientific & Industrial Research Organisation) Óceánográfiai Intézete fejlesztett ki. Egyes helyeken inkább ezt használják az általunk bemutatott Brouwer-Lyddane módszer helyett, s ezt inkább csak tartalék módszerként alkalmazzák abban az esetben, amikor a Clift modellhez nem áll rendelkezésre a szükséges bemenő információ. Elméletileg a Brouwer-Lyddane modell eredménye tovább pontosítható lenne, ha a műhold belső óráját is kezelné. Sajnos azonban a NOAA műholdak órája állandó pontatlanságot mutat, s ezért sokszor kell őket központi irányítással újraindítani.

4. Az AVHRR/3 sugárásmérő műszer rövid bemutatása és kalibrációja

4.1. Az AVHRR/3-műszer

Az AVHRR (Advanced Very High Resolution Radiometer) nagy felbontású sugárásmérő műszer harmadik verzióját a meteorológiai célú NOAA-műholdak közül a NOAA-15, -16, -17-re, vagyis a „KLM” sorozathoz tervezték a Föld felszínének és felhőzetének tanulmányozására. Az AVHRR/3 típusú sugárásmérő pusztán a csatornák számában különbözik a korábbi két változattól, melyeket még a mai napig is használnak a gyakorlatban. Az AVHRR/2 öt csatornája közül a középső, 3-as csatornát úgy fejlesztették tovább, hogy az két különböző hullámhossz-tartományban is képes legyen mérni napszaktól függően (8. táblázat). Ezt a két, alternatív csatornát „3A” (nappali) illetve „3B” (éjszakai) csatornának nevezik. Az AVHRR/3 tehát egy hat csatornás műszer (melyből mindig csak öt üzemel), ahol az első három csatorna a látható illetve a közeli infravörös tartományban, míg a további három csatorna az infravörös tartományban található.

Csatornaszám	Hullámhossztartomány [μm]	A hullámhossztartomány megnevezése	Az aktív üzemelés időszaka
1	0,58-0,68 μm	Látható	Állandóan
2	0,725-1,10 μm	Látható	Állandóan
3A	1,58-1,64 μm	Közeli infravörös	Csak nappal
3B ¹	3,55-3,93 μm	Közeli infravörös	Csak éjszaka
4	10,30-11,30 μm	Infravörös	Állandóan
5	11,50-12,50 μm	Infravörös	Állandóan

Megjegyzések:
¹ Meghibásodás miatt a NOAA-16 műholdon 2003 májusa óta állandóan csak az éjszakai időtartamra tervezett 3B csatorna működik, a nappali 3A nem.

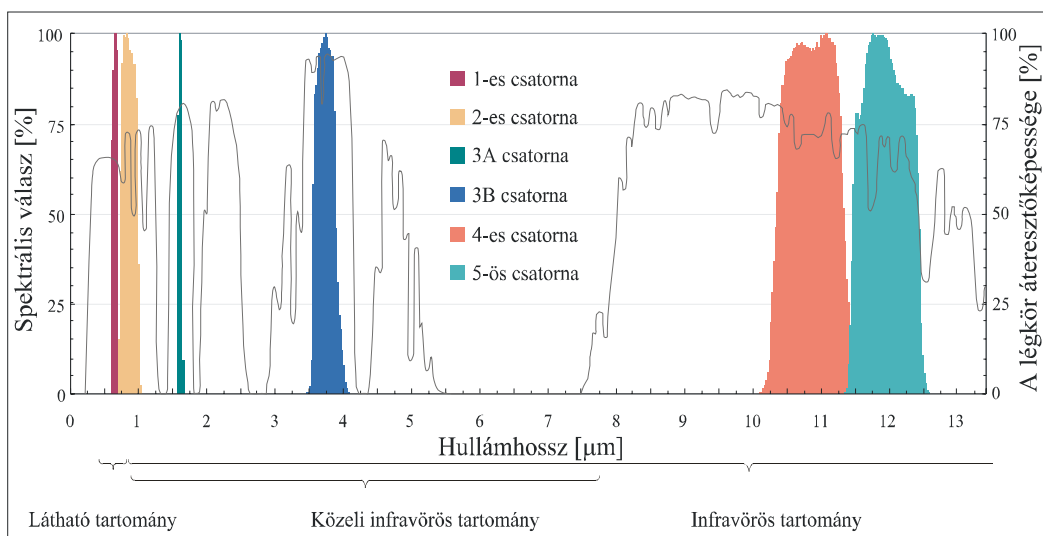
8. táblázat

Az AVHRR/3 sugárásmérő csatornáinak hullámhossztartománya

Érdekességgéppen megjegyezzük, hogy a műszer neve több szempontból sem a legmegfelelőbb (Cracknell, 2001). A legfontosabb ilyen szempont a felbontására vonatkozik, ugyanis a két csatornás VHRR (Very High Resolution Radiometer), az AVHRR elődje, az 1978-ban felbocsátott TIROS-N műholdon nagyobb, 0,8 km \times 0,8 km-es felbontással rendelkezett, mint az 1,09 km \times 1,09 km felbontású „tovább fejlesztett” AVHRR/3. Ennek ellenére az általa nyújtott információk az egyik legértékesebb adatforrássá váltak az elmúlt évek során a nem meteorológiai környezeti kutatások területén.

A műszer valójában egy forgótükörrel felszerelt leképező rendszer. Az ún. forgótükörös leképezés értelmében a műhold haladása közben vékony sávonként végigpásztázza, úgymond soronként letapogatja a földfelszínt. Egy adott sor közepe a műhold nadírjában, azaz pontosan a műhold alatt helyezkedik (ld. 6. ábra). Egy ilyen sor, mely merőleges a műhold haladására, 1×2048 pixelből áll, földfelszíni torzult mérete pedig mintegy $1,09 \text{ km} \times 2925 \text{ km}$. A Föld felől érkező sugárzást a folyamatosan forgó tükör vetíti a műszer szenzorára. A tükör forgási sebessége úgy lett megválasztva, hogy egy sor letapogatása pont annyi időt vegyen igénybe, mint amennyi idő alatt a műhold pályáján ezt az $1,09 \text{ km}$ -t megteszi. Ez az idő $0,16$ másodperc.

Földünk felszíne és légköre által kisugárzott vagy visszavert sugárzás nem tudja teljes mértékben elhagyni bolygónk légkörét. A légköri gázok bizonyos hullámhosszú összetevői részben, míg mások teljesen elnyelődnek. Az utóbbi hullámhossz-tartományokban nem lehet műszerekkel sugárzást érzékelni a légkörön kívülről. A műszerek mérőcsatornáit ezért úgy választják meg, hogy kihasználhassák azokat a tartományokat (ún. légköri ablakokat), ahol a légkör sugárzásáteresztő képessége maximális. Az AVHRR/3 műszer hat csatornája az adott légköri ablakoknál különböző szélességű sávokban képes érzékelni az elektromágneses hullámok adott részét (15. ábra). A csatornák hullámhossz szerinti érzékenységet fejezi ki a spektrális relatív válaszfüggvény, azaz hogy a műszer az érzékelőjébe érkező sugárzást adott hullámhosszon hány százalékban képes felfogni (15. ábra). Ez csatornánként és műholdanként változik, minden AVHRR műszernek a saját, egyedi tulajdonságai közé tartozik.



15. ábra

A NOAA-15 műholdon lévő AVHRR/3 sugárzásmérő berendezés csatornáinak spektrális relatív válaszfüggvényei (színes görbék, bal oldali skála) és a légkör sugárzásáteresztőképessége a hullámhossz függvényében (folytonos fekete vonal, jobb oldali skála)

4.2. Az AVHRR/3 sugárzásmérő műszer kalibrálása

A műholdak sugárzásmérő berendezéseinek kalibrációja azoknak az átviteli függvényeknek meghatározásából áll a műszer minden leképező csatornájára, melyek a beütésszám, vagyis a mért és a tényleges sugárzási értékek spektrális eloszlása között létesítenek kapcsolatot. Az átviteli kapcsolat függ a sugárzásmérést végző rendszer hőmérsékletétől és a kalibrálni kívánt csatorna hullámhossztartományától. Az a hullámhossztartomány, melyben a leképezés történik, alapvetően meghatározza a matematikailag lezármaztatható fizikai paraméterek körét. A látható és közeli infravörös tartományból származó adatokból a Föld felszínének illetve a felhőzetnek az albedója számítható, míg a távolabbi infravörös tartományból ezek hőmérsékletére következtethetünk vissza (Tánczer, 1988). A kalibráció minden mérőberendezés esetén három fő részből áll:

- (1) A műhold fellövése előtti ún. előkalibráció, mely során előkészítik a rendszert a folyamatos és operatív működésre. Ebben a szakaszban minden csatornára meghatározzák a kalibráció pontosságát, a műszer érzékenységét, a korrekciós tényezőket, valamint a kalibrációhoz szükséges lineáris és nem-lineáris paramétereket. Az AVHRR berendezéseket a műhold felbocsátásáig rendszeresen kalibrálják, legalább évente egyszer. A legutolsó kalibrációt közvetlenül a pályára-állítás előtt végzik.
- (2) A fellövés utáni, világűrbeli működés közben végzett folyamatos kalibráció, mely során pontosítják az előkalibrációt.
- (3) Műszaki kiértékelés, mely során a működés közben tapasztalt problémákra és szokatlan értékekre keresnek magyarázatot.

A látható csatornák kalibrálása halogén lámpák segítségével történik a műhold fellövése előtt, és közel állandó reflektanciájú területek (pl. sivatagok) felett mért sugárzási adatok folyamatos nyomon követésével a műhold pályára állítása után. A sugárzási spektrum infravörös tartományában különböző hőmérsékletű abszolút fekete testek alkalmazásával hajtják végre a kalibrációt mind a földi laboratóriumban, mind a világűrben. Mivel a műhold tényleges működési környezetét a földfelszíni laboratóriumi feltételekkel nem tudják tökéletesen előállítani, így az előkalibrációval meghatározott sugárzástani karakterisztikák nem lesznek megfelelő pontosságúak a fellövés után. Így válik szükségessé, hogy működés közben alkalmazott módszerekkel módosítsák a kalibrációt.

Ahogy a műholdakról származó sugárzástani információk egyre fontosabbá válnak a kutatásokban, úgy nő az igény a műszerek minél pontosabb kalibrációjára (Cracknell, 2001).

Ezen a pontosságon erősen múlik például a légkör energiaháztartásának feltérképezése, a légköri ózon és aeroszol mennyiségének megállapítása vagy a globális éghajlatváltozással járó felszíni hőmérsékletváltozások meghatározása.

Az általunk alkalmazott és a következőkben bemutatott kalibrációs eljárás a NOAA-KLM *User's Guide* legfrissebb verzióján (Goodrum et al., 2004) alapszik. A számításokhoz szükséges konstansokat részben ebből a dokumentációból, részben egyéb még ennél is frissebb internetes forrásokból használtuk fel (NOAASIS, 2004). Az eljárást beprogramoztuk, így az bármely képre alkalmazhatóvá vált.

4.2.1. A látható és a közeli-infravörös csatornák kalibrálása

Elsőként az AVHRR/3 műszer 1-es, 2-es és a 3A jelű csatornájára vonatkozó kalibrációt részletezzük. Az 1-es csatorna méréseit a felhőzet azonosítására és az albedó meghatározására használjuk. A 2-es csatorna adatai a felhőzet azonosításán kívül a szárazföld és az óceán szétválasztására alkalmazhatóak. A 3-as csatorna kizárólag nappal üzemelő változatának (3A) segítségével a hó- és jégtakarót tudjuk elkülöníteni a felhőzettől, valamint az aeroszolok koncentrációjának meghatározásra nyílik lehetőség. Mivel a fenti csatornákhoz tartozó hullámhossz-tartományokban az operatíván működő műszer csak a Föld által visszavert napsugárzást képes érzékelni, ezek a számítások kizárólag a nappali mérésekre végezhetők el, vagyis azokra, melyeket azon áthaladások során mért a műszer, amikor a felszínt a Napból érkező direkt vagy szórt sugárzás érte.

Ezen csatornák kalibrációját két szakaszra bontjuk az alapján, hogy a műszer üzembe állítása, vagyis a műhold fellövése előtt vagy után történik-e a műveletsorozat.

4.2.1.1. Kalibráció a műhold fellövése előtt

Az említett három csatornát a műhold pályára állítását megelőzően egy több, mint húsz év alatt kidolgozott eljárásnak megfelelően kalibrálják. A kalibrációhoz egy 102 cm átmérőjű mérőgömböt használnak, mint fényforrást. Ez a gömb több különböző teljesítményű égővel van felszerelve, melyek gyűrű formában helyezkednek el. A gömböt elhagyó sugárzás

erőssége három nagyságrendű tartományban változtatható az égők különböző kombinációját alkalmazva. A különböző csatornában érzékelő szenzorok mindegyikét megvilágítják a gömbből kilépő sugárzás különböző fokozataival, majd a sávzélességeknek megfelelően integrálják a beérkező sugárzást.

Ha a maximálisan sugárzó gömbről R_{v_0} értékű állandó radiancia (sugársűrűség) érkezik, a különböző mértékben sugárzó gömbökről pedig R_{v_r} nagyságú, akkor egy egyszerű analógiát feltételezve kiszámolható a Föld felszíni reflektanciája: a laboratóriumi méréseknek a világűrben mért értékeket feleltetjük meg. Ekkor R_{v_0} megfelel annak a Napból eredő, rövidhullámú direkt és szórt sugárzásnak, mely a Föld felszínét (avagy a felhőzet tetejét) eléri, és R_{v_r} képviseli ennek azt a részét, melyet a felszín és a felhőzet illetve a levegőrészecskék vernek vissza. A meteorológiai értelemben használt albedó fogalom a napsugárzásra, mint egy nagy sávzélességű (0,3-3 μm) elektromágneses sugárzásra vonatkozik, ahol a beeső sugárzásáram a teljes felső, a visszavert sugárzásáram pedig a teljes alsó térfélelől ered. Ez a planetáris albedó definíciója (Péczeley, 1979). Ezzel szemben a sugárzásmérő műszerek csatornái csak egy korlátozott sávban mérnek, és amit érzékelnek, az csak az egy adott irányba (a műhold irányába) visszaverődő sugársűrűség. Ebből csak a reflektancia számolható, ha más hatásokat nem tekintünk. Ha a felszín ún. Lambert-i visszaverő, vagyis az általa visszavert sugárzási áramsűrűség irányfüggetlen, továbbá feltételezzük, hogy a mérés hullámhossztartománya reprezentatív a napsugárzás felszín által visszavert részére, csak akkor lesz a meteorológiai albedó és a π -vel, vagyis 180° térszöggel megszorított reflektancia egyenlő. (A műholdképeket feldolgozó kutatók gyakran élnek ezzel az egyszerűsítő feltételezéssel, s albedónak nevezik megtévesztően azt a reflektanciát, melynek számítását a következőkben leírtak szerint végezhetjük el.) A ρ reflektancia (%) a következő képlet segítségével számolható ki:

$$\rho = 100 \frac{R_{v_r}}{R_{v_0}} \quad (1)$$

A műszer által felfogott, a mérőgömből érkező sugárzás jeleit rögzítik és 10 bites rendszerbe átkonvertálják. Rendszerint az AVHRR jelei nagyon közel állnak egymáshoz, ha az azt kiváltó sugárzás a teljesen kivilágítatlan gömbről és az űrt utánzó célról (mely lényegében abszolút fekete testként fogható fel) jut a műszerbe. A gömb spektrális jeleit bizonyos időközönként szintén rendszeresen kalibrálják, melynek bizonytalansága így nem haladja meg

az 5 %-os nagyságrendet. Az AVHRR fellövés előtti kalibrációjának körülményeiről közöl további részleteket Rao (1987).

Az így nyert kalibrációs eredményeket a NOAA egy egyszerű lineáris regressziós kapcsolat formájában adja meg a pixelenként mért 10 bites AVHRR jel (beütésszám) (C_{10}) és a reflektancia (ρ) között a megvilágítottság különböző szintjeiben. Ezt fejezi ki (2), ahol S a lineáris egyenes meredeksége, vagyis reflektancia/beütésszám, I pedig az ordinátatengellyel képzett metszéspont:

$$\rho = SC_{10} + I \quad (2)$$

Az S és az I konstansok (csakúgy, mint minden további konstans) csatornánként mindegyik működő NOAA műholdra hozzáférhetők (Goodrum et al., 2004). Ezeknek a konstansoknak és a (2) képletnek a használata operatíván működő műholdak esetében azzal a feltételezéssel jár, hogy a laboratóriumokban megállapított kalibrációs konstansok igazak a már a pályáján haladó műhold műszerére is. Ezeknél a rövid hullámhosszú csatornáknál annál nagyobb a beütésszám, minél nagyobb a hozzátartozó célterület reflektanciája, azaz a sugárzás visszaverődését kifejező együttható.

Az AVHRR/3 sugárzásmérő műszer egyik lényeges tulajdonsága, hogy a látható és a közeli infravörös tartományban az alacsonyabb reflektancia-értékeket finomabb felbontásban képes érzékelni, mint a magasabb reflektanciákat, vagyis a skála nem egyenletes felosztású. A 9. táblázatból leolvasható, hogy az 1-es és a 2-es csatorna esetében például ugyanannyi beütésszám jut a reflektancia-tartomány első $\frac{1}{4}$ -ének kifejezésére, mint a maradék $\frac{3}{4}$ -ére.

A csatorna jele	Reflektancia-tartomány (%)	Beütésszám
1 és 2	1 - 25	0 - 500
	26 - 100	501 - 1000
3A	1 - 12,5	0 - 500
	12,6 - 100	501 - 1000

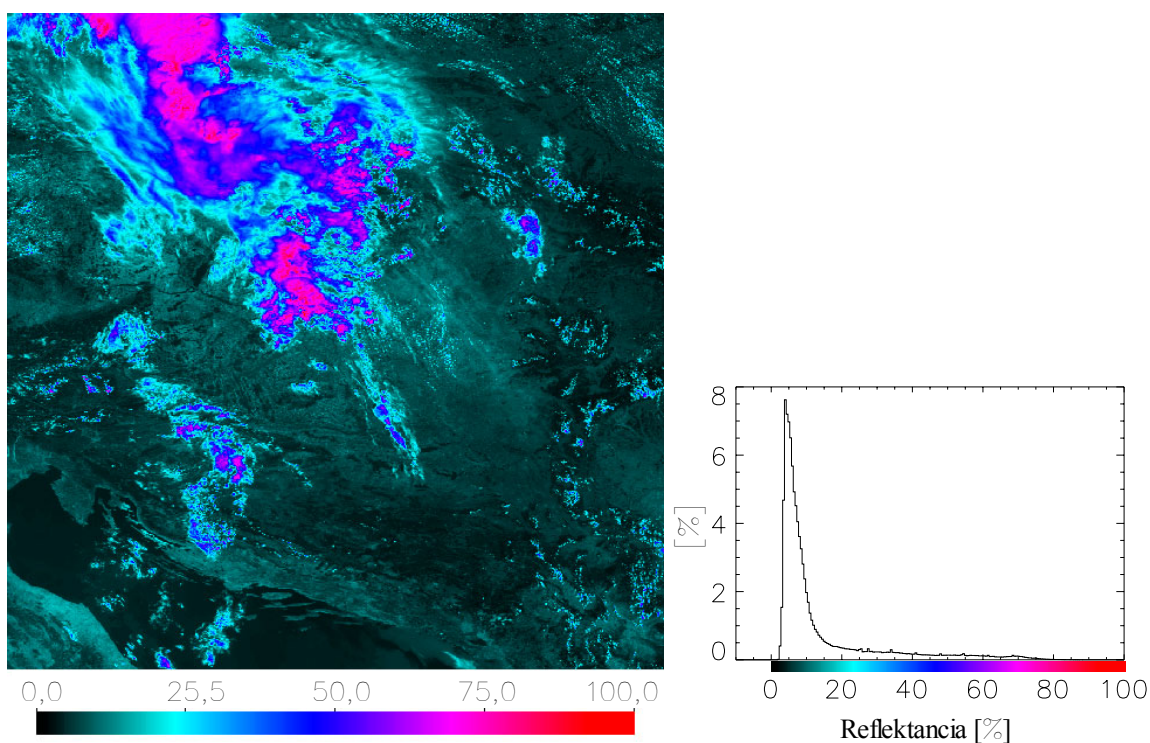
9. táblázat

Az AVHRR/3 sugárzásmérő műszer reflektanciára vonatkozó érzékenysége

Ez a tény szükségessé teszi, hogy a két tartományt külön-külön kezeljük, vagyis csatornánként más S és I konstansokat használjunk a kicsi (≤ 500) és a nagy (> 500) beütésszámokhoz. Ez az 500-as beütésszám-határ csak egy kerekített, elméleti érték, a pontos értékek műholdankénti meghatározása a műhold fellövése utáni kalibráció tárgykörébe tartoznak, melyről a következő alfejezetben olvashatunk.

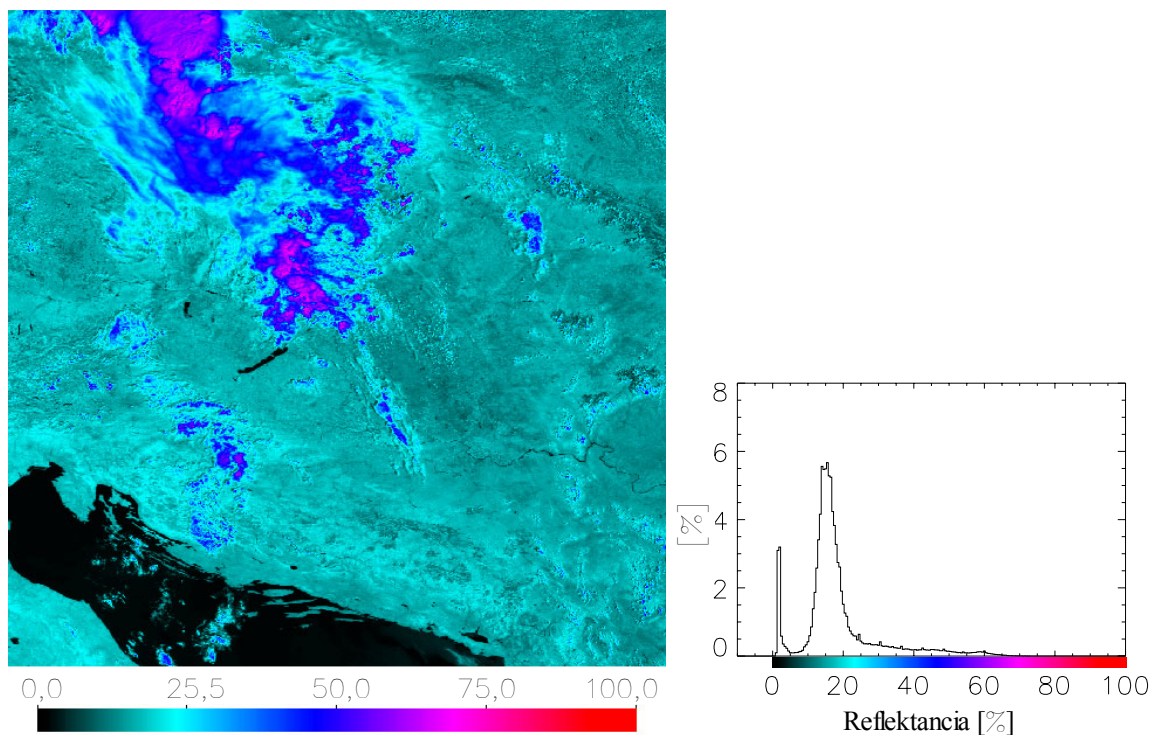
A reflektanciaszámítás eredményeként előálló képek (%-ban kifejezve) és a hozzájuk tartozó hisztogramok láthatók a következő ábrákon, csatornánként a NOAA-17-es műhold 2003. július 22-ei 09:31 órás áthaladására (16-18. ábra). A hisztogramokon az adott képi pixelek 0,5 reflektancia-értékenkénti csoportosításban kerültek ábrázolásra relatív gyakoriságuk (%-ban kifejezve) függvényében. Azért, hogy a képek egymással összehasonlíthatóak legyenek, ugyanolyan skálabeosztással kerültek ábrázolásra. Az ábrák segítségével tanulmányozható a műszerek érzékenysége. Az 1-es csatorna képe a felhőzet túlnyomó részét megjeleníti azáltal, hogy az ebből a csatornából származtatott értékek állnak legközelebb a tényleges reflektancia-értékekhez, így a sugárzást leginkább visszaverő képi elem, a felhőzet könnyen elkülöníthető. A szabad vízfelület és a szárazföld legjobb elkülönítésére a 2-es, és a 3A csatorna szolgál. Tekintve, hogy a példaként bemutatott felvétel nyáron készült, ezért nem alkalmas arra, hogy a 3A csatorna felhőzet és hótakaró elkülönítő-képességét tanulmányozhassuk.

A műholdas távérzékelési mérések nagymértékben függenek a Nap, a felszíni célpont és a sugárzásmérő szenzor egymáshoz viszonyított geometriai elhelyezkedésétől, hiszen a legtöbb felszíntípus anizotrop sugárzásvisszaverő (Kriebel, 1978; Kimes et al., 1984; Kimes and Sellers, 1985; Middleton, 1991). Az AVHRR sugárzásmérő $\pm 55,5$ fokban mérhet a nadírhoz képest, s ennek következtében az áthaladástól függően ugyanaz a célpont sok



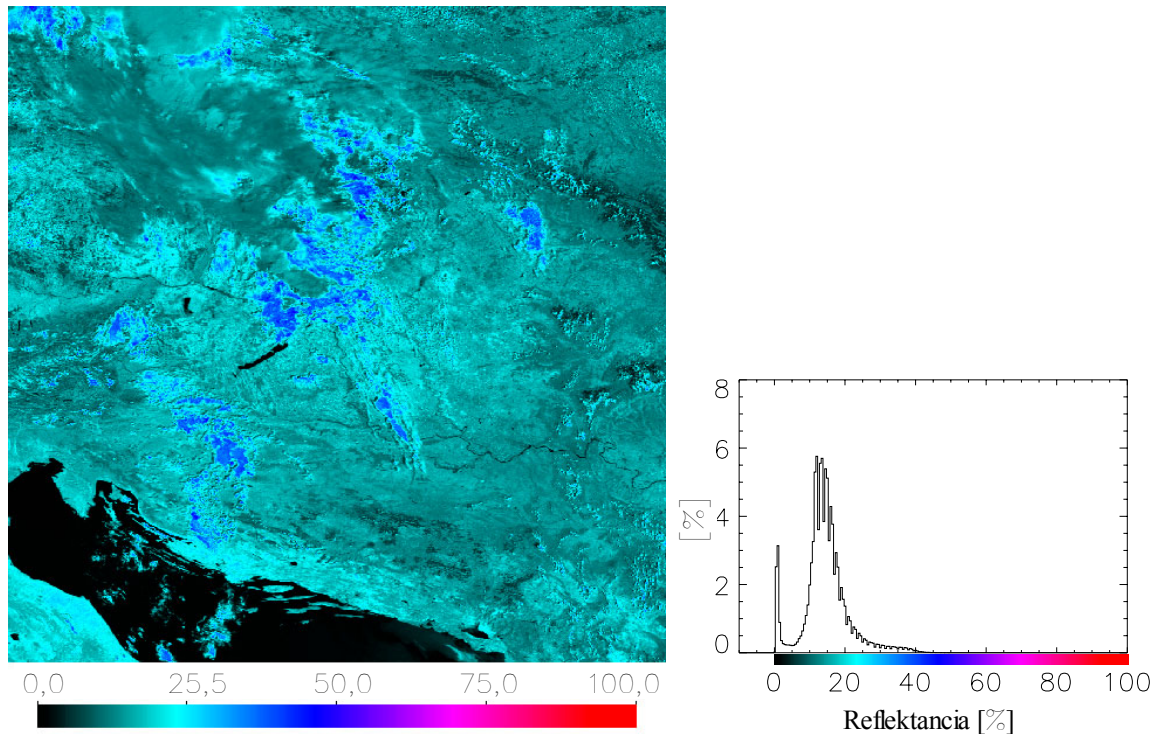
16. ábra

Kalibrációval kapott reflektanciakép az AVHRR 1-es, látható csatornájából ($0,58-0,68 \mu\text{m}$) és a hozzátartozó hisztogram / NOAA-17, 2003.07.22 09:31, 1-es csatorna /



17. ábra

Kalibrációval kapott reflektanciakép az AVHRR 2-es, látható csatornájából ($0,725-1,00 \mu\text{m}$) és a hozzá tartozó hisztogram / NOAA-17, 2003.07.22 09:31, 2-es csatorna /



18. ábra

Kalibrációval kapott reflektanciakép az AVHRR 3A, közeli infravörös csatornájából ($1,58-1,64 \mu\text{m}$) és a hozzá tartozó hisztogram / NOAA-17, 2003.07.22 09:31, 3A csatorna /

különböző szögből lehet látható. Így az anizotropitás hatása miatt ugyanakkora besugárzás esetén különböző mértékű visszaverődő sugárzásokat detektál, mely lényegesen befolyásolja egy kiszemelt cél időbeli fejlődésének nyomon követését (Gutman, 1991).

Ha a felszín sugárzástani szempontból nem izotróp, akkor az előzőekben bemutatott módszerrel kiszámított reflektancia csak abban az esetben tekinthető a tényleges albedónak, ha a Nap és a műhold a méréskor a zenitben volt és a Nap-Föld távolság pontosan egy csillagászati egység (149,6 millió km). Ez a három feltétel ritkán teljesül akár együtt, akár külön-külön, ezért felétlenül szükséges olyan módszerek kidolgozása, melyekkel a három feltétel módosító hatása kiküszöbölhető, vagy javítható.

A felszíni célpont, a Nap és a műhold műszere közötti geometriai kapcsolatot (ld. 6. ábra) megadó „kétirányú reflektancia eloszlás-függvény” (Bidirectional Reflectance Distribution Function, BRDF) segítségével a Nap és a műhold helyzetétől függetleníthetővé tehető a reflektancia-számítás. Ez a BRDF függvény nagymértékben függ a felszín borítottságától illetve a vegetáció tulajdonságaitól (például egy erdő a fák és a Nap magasságától függően vetít árnyékot a mellette levő alacsonyabb növényállományra, vagy akár a csupasz földre). Mivel a célterület környezete – a szomszédos pixelek – szintén meghatározó, ezért a függvény pontos meghatározása gyakorlatilag csak nagyobb homogén területekre lehetséges. Adott célterületre vonatkozó reflektancia-számításokat a BRDF függvény meghatározásával is végezhetünk (pl. Wu et al., 1995). Bizonyos származtatott mennyiségek sokkal kevésbé függnnek a mérés geometriai tulajdonságaitól, mint a látható és a közeli infravörös csatorna reflektanciái. Ilyen például a normalizált vegetációs index, az NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) abban az esetben, ha a képpont teljesen felhőmentes volt (Kimes et al., 1984; Holben et al., 1986; Cihlar et al., 1994).

A reflektanciából levezethető az a radiancia-érték, amely a Napból eredő rövidhullámú sugárzás felszínről visszaverődő része. Ennek kiszámításához egyrészt ismernünk kell a mérőműszer adott csatornájára vonatkozó hullámhossztartomány szélességét, másrészt azt a Napból eredő sugárzási áramsűrűséget (irradiancia), mely a felszínt eléri. A hullámhossztartomány szélességét az ω ekvivalens szélességgel adhatjuk meg, melyet a következő képlettel definiálunk:

$$\omega = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \tau_{\lambda} d\lambda \quad (3)$$

ahol τ_λ a relatív válaszfüggvény λ hullámhosszhoz tartozó értéke (%-ban), λ_1 és λ_2 pedig rendre az alsó és a felső levágási hullámhosszak (μm), melyek megadják a teljes hullámhossztartományt. A spektrális relatív válaszfüggvény fejezi ki, hogy a sugárzásmérő műszer az érzékelőjébe érkező sugárzást adott hullámhosszon hány százalékban képes felfogni (15. ábra).

Az F irradianciát (Wm^{-2}), vagyis a felszint elérő, Napból eredő sugárzási áramsűrűséget, az F_λ monokromatikus irradiancia ($\text{W m}^{-2} \mu\text{m}^{-1}$) teljes tartományra történő kiintegrálásával állíthatjuk elő, ahol a súlyozás a relatív válaszfüggvény (τ_λ) felhasználásával történik.

$$F = \int_{\lambda_2}^{\lambda_1} F_\lambda \tau_\lambda d\lambda \quad (4)$$

Ekkor a R_{λ_e} ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$) radiancia – vagyis az egységnyi idő alatt, egységnyi felületet elhagyó sugárzási energia a műszer által egységnyi térszögből érzékelve – a következő képlet segítségével számolható ki:

$$R_{\lambda_e} = \frac{\rho F}{100\pi\omega} \quad (5)$$

ahol ρ jelöli a (2) alapján kiszámolt reflektanciát (%) egy adott pixelre, F a (4) szerint kiintegrált, és a spektrális válaszfüggvénnyel súlyozott irradianciát (W m^{-2}), ω a spektrális válaszfüggvény ekvivalens szélességét (μm). Az így kapott radiancia monokromatikus tulajdonságú, vagyis úgy tekinthető, mintha a sugárzást visszaverő felszín egy adott hullámhosszához tartozna ez az érték, nevezetesen az effektív hullámhosszhoz (λ_e). Ez az effektív hullámhossz a műszer mérési csatornájára jellemző érték, mely a hullámhossz tartomány közepén található. Pontos helyzetét az újonnan bevezetett mennyiségek segítségével a következő képlet adja meg:

$$\lambda_e = \frac{\int_{\lambda_2}^{\lambda_1} \lambda F_\lambda \tau_\lambda d\lambda}{F} \quad (6)$$

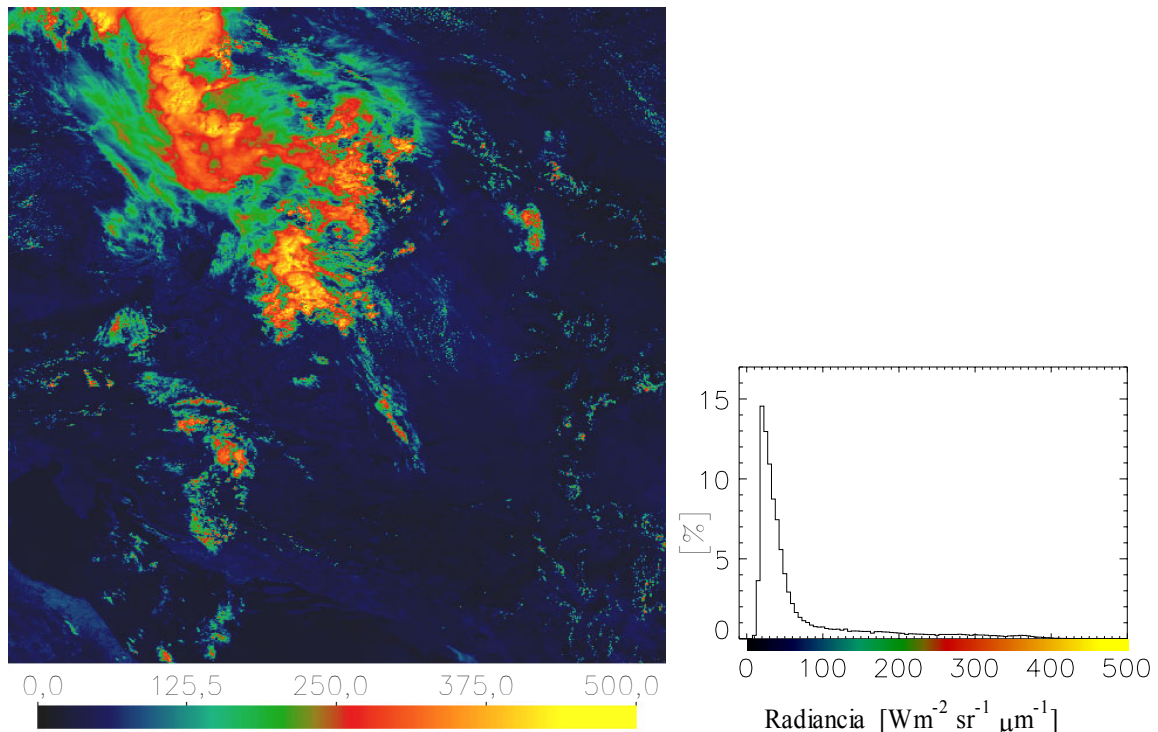
Példaként a 10. táblázatban a NOAA-15 műhold AVHRR/3 műszerére vonatkozó λ és ω értékeket mutatjuk be.

Csatornaszám	Hullámhossztartomány [μm]	Effektív hullámhossz, λ_e [μm]	Ekvivalens szélesség, ω [μm]
1	0,58-0,68 μm	0,632	0,084
2	0,725-1,10 μm	0,843	0,228
3A	1,58-1,64 μm	1,607	0,044

10. táblázat

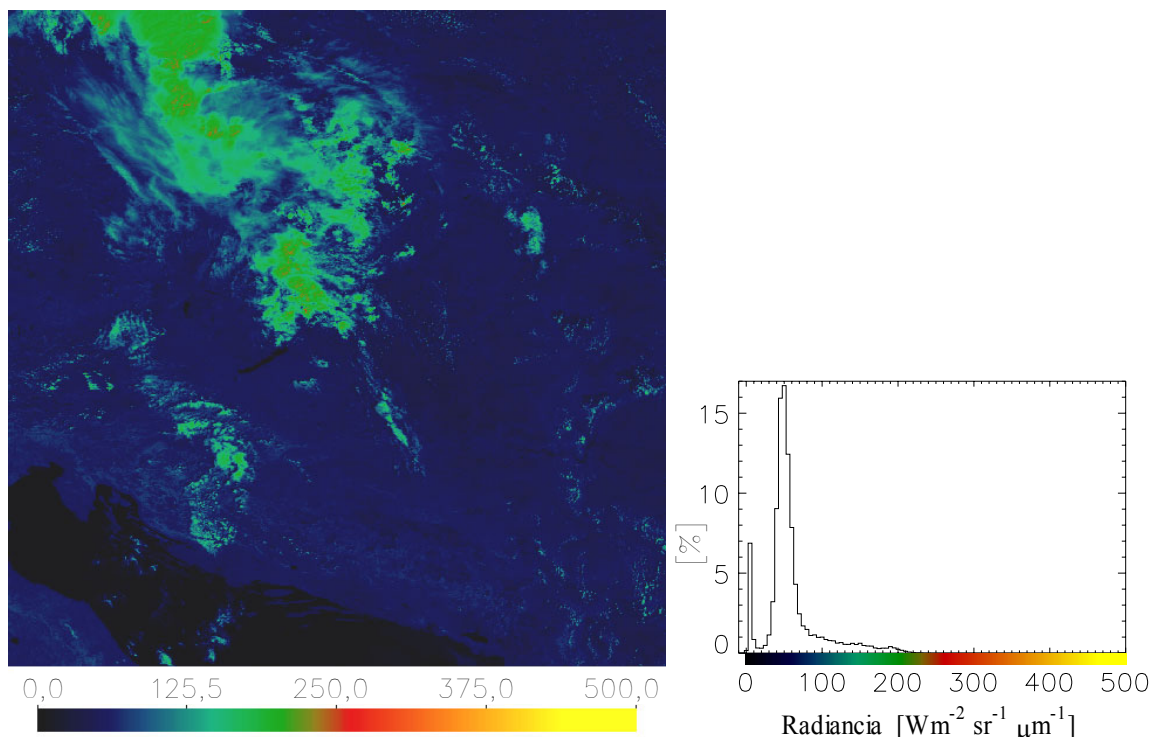
A NOAA-15 műhold első három csatornájára vonatkozó spektrális értékek

A fenti radianciaszámítás eredményeként előálló képeket és hisztogramokat az 19.-21. ábrákon mutatjuk be a NOAA-17-es műhold 2003. július 22-ei áthaladására. A hisztogramokon az adott képi pixelek $5 \text{ Wm}^{-2}\text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$ -ként lettek csoportosítva, az előfordulásuk gyakoriságát pedig %-ban adtuk meg. A képek egymással való összehasonlíthatóságát szem előtt tartva a skálabeosztáson nem változtattunk, melynek következtében azonban a 2-es és a 3-as csatorna képei túlságosan sötétek lettek. A hisztogram tanulmányozásakor figyelembe kell venni az alábbiakat is: Tekintve, hogy ezek a Kárpát-medencét tartalmazó kivágatok 1024×1024 pixelesek, az egész kép 1024^2 , azaz 1 048 576 képi adatból áll. Így ahhoz, hogy a hisztogramon egy csoport már láthatóvá váljon, el kell,



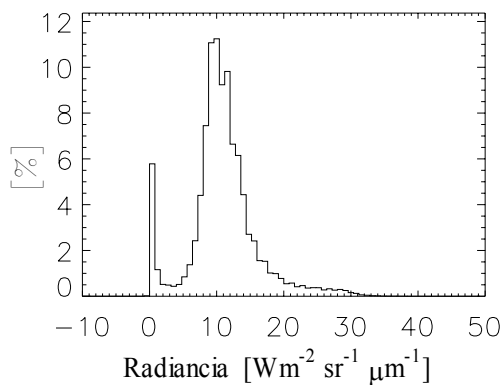
19. ábra

Kalibrációval kapott radianciakép [$\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$] az AVHRR 1-es, látható csatornájából (0,58-0,68 μm) és a hozzátartozó hisztogram / NOAA-17, 2003.07.22 09:31, 1-es csatorna /



20. ábra

Kalibrációval kapott radianciakép [$\text{Wm}^{-2} \text{sr}^{-1} \mu\text{m}^{-1}$] az AVHRR 2-es, látható csatornájából (0,725-1,00 μm) és a hozzá tartozó hisztogram / NOAA-17, 2003.07.22 09:31, 2-es csatorna /



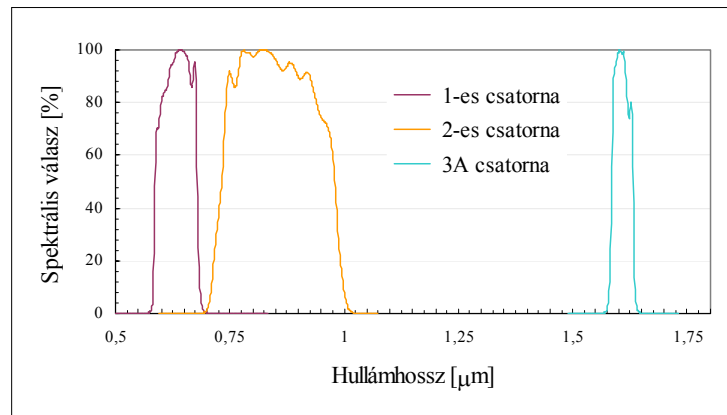
21. ábra

A 3A közeli infravörös csatorna kalibrációjából nyert, radianciára vonatkozó hisztogram / NOAA-17, 2003.07.22 09:31, 3A csatorna /

hogy érje a kb. 0,1 %-t, vagyis abban az adott tartományban legalább 1048 értéknek kell esnie. A képeken látható, hogy leginkább a kis reflektanciájú területek vannak túlsúlyban, melyek csak kevés sugárzást vernek vissza. A 3A közeli infravörös csatorna szűk érzékenységi spektruma miatt (22. és 15. ábra) csak nagyon keskeny tartományban ad radiancia-értékeket (21. ábra). Ezért ez a kép az előző színezési skálával gyakorlatilag

teljesen sötét és értelmezhetetlen lenne (a kalibrációval kapott képet így nem mutatjuk be).

A műholdas mérések kutatási célú felhasználásához még további, ún. légköri korrekciós eljárásokra van szükség, melyek a légköri hatásokat, valamint a felszín, a Nap és a műszer egymáshoz viszonyított elhelyezkedését veszik figyelembe.



22. ábra

A NOAA-15 műhold AVHRR/3 sugármérő berendezés két látható és egy az egyik infravörös csatornájának spektrális relatív válaszfüggvényei

4.2.1.2. Kalibráció a műhold fellövése után

Eredetileg az AVHRR sugármérők rövidhullámú (1-es és 2-es) csatornáit kizárólag a felhőzet detektálásához tervezték azzal a céllal, hogy az aktuális időjárási helyzet kiértékelését és előrejelzését megkönnyítsék. Ennek következtében a műszert nem szerelték fel olyan eszközökkel, melyekkel működése közben rutinszerűen elvégezhető lenne ezeknek a csatornáknak a kalibrációja. Csak később alakult ki az igény arra, hogy ezekből a mérésekből következtetni lehessen a felszín albedójára és vegetációjára is. A mérésekből származtatható értékek pontossága több tényezőtől múlik, melyek együttesen az AVHRR által mért jel gyengülését okozzák. Ez az ún. effektív jelgyengülés három hatás eredőjeként áll elő (Koslowky, 1997a):

(1) Az első a műszer fokozatos elöregedéséből ered, mely műholdanként és csatornánként változik, és általában évi 1-8 %-os jelgyengülést jelent évente (Rao et al., 1996, Koslowky et al., 2001). Közvetlenül a műholdak fellövése után a műszerek érzékenységében egy kisebb mértékű csökkenés következik be, mely a műszer optikájára kicsapódó vízpárának és a rakéta üzemanyagából hátramaradó szennyezőanyag lerakódásának a következménye.

(2) A második tényező alatt értjük a légkör sugárzásgyengítő hatását, melyet a különböző vastagságú légköri metszetek jelentenek a Nap látszólagos elhelyezkedését jellemző zenitszögétől függően. Még ha a felszíni célponthoz képest azonos zenitszögű áthaladásokat is tekintünk, az idő múlásával akkor is felfedezhető egy trendszerű viselkedés, mely az AVHRR által felfogott sugárzás változását idézi elő. Bár a kvázipoláris műholdak pályája napszinkron, vagyis a Naphoz viszonyított helyzetük állandó, mégis egy év alatt kb. fél óra

késés jelentkezik pályájukon. Ez különösen az ún. délutáni műholdak esetében mutatkozik meg (melyek áthaladásai helyi idő szerint mindenhol délutánra esik), s nem csak az AVHRR-t érő sugárzás csökkenését jelenti, hanem hatással van a kétirányú reflektancia eloszlásfüggvényre is. Egyéb légköri hatások is befolyásolhatják a sugárzásmérést (pl. vulkánkitörés okozta légköri aeroszol-többség, Pinatubo, 1991). E pontatlanságokat légköri korrekciós eljárásokkal kell kiküszöbölni.

(3) A harmadik hatás a felszín anizotropitásából ered, s az évszakosan bekövetkező periodikusan változó megvilágítottság hatására áll elő. Az említett hatások miatt a fellövés előtt megállapított kalibrációs együtthatók már nem alkalmazhatók az operatíván működő műszerre.

A látható és közeli infravörös csatornák műholdon zajló kalibrációjához szükséges eszközök hiánya olyan helyettesítő eljárások fejlesztését eredményezte, melyek a műhold fellövését követően is elvégezhetők. A kidolgozott helyettesítő eljárásokkal (Mitchell et al., 1996; Rao és Chen, 1995) a TIROS-N műholddal (1978) kezdődő NOAA műholdsorozat AVHRR műszereinek két látható csatornájának működése jellemezhető és az így kapott eredmény kivetíthető a KLM sorozat AVHRR/3 műszereire is. A helyettesítő eljárások általában valamilyen külső referenciaméréseken alapulnak, melyekhez felhasználhatnak sugárzásmérésnél viszonylag stabil földfelszíni célokat, csillagászati célokat, kalibrált sugárzásmérőket vagy modellezett radianciákat. Stabil földi célként a módszerekben sivatagokat alkalmaznak. Ennek legfontosabb oka, hogy a nagy kiterjedésű és hosszú ideje létező sivatagok albedója több tízéves időskálán állandónak tekinthető, továbbá a sivatagos területek felett általában kisebb a földfelszín takaró felhőzet mennyisége, mely meggátolná a felszínre vonatkozó reflektancia-számításokat (Rao et al., 1999). Csillagászati célként egyes csillagok látható tartományba eső sugárzását vagy a Hold által visszavert napsugárzást lehet alkalmazni a kalibrációhoz. Ezt a módszert az AVHRR esetén még nem alkalmazzák, tesztelése a jövőbeli kutatási tervek közé tartozik. Kalibrált sugárzásmérőként a Terra műhold MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectrometer) sugárzásmérő műszere által mért sugárzási adatok használhatóak fel (Heidinger et al., 2002). Az elsődlegesen alkalmazott utókalibrációs eljárásokban sivatagi célterületeken mért sugárzási értékek segítségével végzik el a kalibrációt azonos helyzetű áthaladások segítségével, hogy így kövessék a műszer állapotának változását az idő előrehaladtával. A NOAA laboratóriumaiban Rao és Chen (1995), illetve Rao et al. (1999) által kidolgozott módszerekkel végzik el a NOAA meteorológiai műholdak AVHRR műszereinek utólagos kalibrációját. Az általuk kidolgozott eljárás a Líbiai-sivatag dél-keleti részének egy kicsiny területét (Északi szélesség: 21-23°,

Keleti hosszúság: 28-29°) veszi alapul. Számításaik során annak a spektrális válaszfüggvénynek az időbeli változását követik nyomon, mely a műszer reakcióját fejezi ki az adott területről érkező sugárzásra. Az ausztrál CSIRO intézetben Mitchell et al. (1997) a dél-ausztrál Strzelecki-sivatagot használják fel ugyanerre a célra.

Elsőként a NOAA-15 műholdat szerelték fel az újabb fejlesztésű AVHRR/3 műszerrel, melynek válaszfüggvényének tanulmányozásához fontosak voltak a korábbi AVHRR berendezések segítségével szerzett tapasztalatok. Ellentétben az AVHRR/2 sugárzásmérővel, az AVHRR/3 reflektancia számítása két lineáris részből tevődik össze a beütésszám nagyságától függően ezért a két tartományra külön-külön kell megállapítani a (2) egyenlethez szükséges együtthatókat. Továbbá ezekkel az utókalibrációs technikákkal az érzékenységhez szükséges beütésszám-határok pontos értékei is megfelelően módosíthatóak. A reflektancia-számításra vonatkozó együtthatók havonkénti frissített értékei 1996 óta folyamatosan megtalálhatóak az Interneten (NOAASIS, 2004).

A NOAA-16 műhold esetében az utólagos kalibrációt a Líbiai- és a Takla Makán-sivatag (mely az ázsiai Tien-San-hegységtől délre fekszik) segítségével végzik el (NOAASIS, 2004). A műszerek törvényszerű elöregedése ellenére a NOAA-16 1-es és 2-es csatornájára még a fellövés előtt megállapított együtthatókat ajánlják, melyekkel a számított reflektancia közelítőleg megegyezik a valóssal. Mivel a 3A csatorna új a KLM-sorozat műholdjain, s így nincsenek erre vonatkozó korábbi mérésekből származó empirikus együtthatók, ezért ennél a csatornánál inkább a MODIS mérésekből számolt konstansokat ajánlják a reflektancia kiszámításához. Becslések szerint a MODIS mérésekből számolt reflektancia-értékek a ténylegesnél magasabbak. A különböző módon megállapított reflektancia-értékeket a *II. táblázatban* hasonlítjuk össze.

Csatorna	Felszállás előtt megállapított reflektancia [%]	MODIS- számításokon alapuló reflektancia [%]	Valósnak hitt reflektancia [%]
1	38,3	39,2	37,8
2	40,5	46	42,6
3A	66,7	64,5	Nem ismert

II. táblázat

A Líbiai-sivatagra vonatkozó reflektancia-értékek összehasonlítása NOAA-16 látható és közeli infravörös csatornáinak illetve MODIS mérések segítségével

A NOAA-17 műhold utókalibrációi még nem teljesek, s így nem is publikáltak, hiszen fellövése óta szűk két év telt csak el.

4.2.2. A termális infravörös csatornák kalibrálása

A termális infravörös csatornák kalibrációja az AVHRR/3 műszerek esetében a 3B, a 4-es és az 5-ös csatornák kalibrációját jelenti (8. táblázat). Az AVHRR/3 3B csatornája megegyezik a korábbi AVHRR változatok (AVHRR/1, AVHRR/2) 3-as csatornájával, hisz azokon a sugázmérőkön ez a csatorna állandóan üzemel, az AVHRR/3 esetében azonban csak éjszaka. A termális csatornákkal az infravörös sugárzási tartományban mérnek, azaz nem a visszavert napsugárzást érzékelik, hanem azt a hosszuhullámú sugárzást, melyet a vizsgált felszíni célpont és a felette elhelyezkedő légréteg bocsát ki hőmérsékletüktől függően. Így a kalibráció után a 3B csatornán mért adatokból éjszakai felhőészlelésre, a 4-es és 5-ös csatorna adataiból pedig a felhőzet azonosítására és a felszínhőmérséklet számítására nyílik többek között lehetőség.

A termális csatornák beütési száma és a kalibrált fekete test sugárzása közötti kapcsolatot megadó átviteli függvény, mint látni fogjuk, csak a 3B csatornára lineáris, így a 4-es és az 5-ös csatorna esetén nem-lineáris korrekciók alkalmazása is szükséges.

A kalibráció elméleti hátterét a Planck-függvény képezi:

$$R_\nu(T) = \frac{2hc^2\nu^3}{e^{\frac{hc\nu}{kT}} - 1} = \frac{c_1\nu^3}{e^{\frac{c_2\nu}{T}} - 1} \quad (7)$$

melynek invertálásával az adott ν hullámszámhoz (m^{-1}) tartozó monokromatikus radianciából ($R_\nu(T)$) ($\text{W m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{m}^{-1}$) a vele ekvivalens hőmérséklet (T) kiszámítható. Az egyenletben szereplő univerzális állandók:

$$h = 6,62606876 \cdot 10^{-34} \text{ J s, Planck-állandó}$$

$$c = 2,99792458 \cdot 10^8 \text{ m s}^{-1}, \text{ Vákuumbeli fénysebesség}$$

$$k = 1,38065030 \cdot 10^{-23} \text{ J K}^{-1}, \text{ Boltzmann-állandó}$$

$$c_1 = 1,1910427 \cdot 10^{-5} \text{ mW m}^{-2} \text{sr}^{-1} \text{cm}^4$$

$$c_2 = 1,4387752 \text{ cm K,}$$

ahol c_1 és c_2 a (8) és a (9) egyenletekkel áll elő:

$$c_1 = 2hc^2 \quad (8)$$

$$c_2 = \frac{hc}{k}. \quad (9)$$

4.2.2.1. Kalibráció a műhold fellövése előtt

Az előkalibrációt az űrbeli sugárzási körülményeket szimuláló vákuumkamrában végzik. A sugárzásmérőt egymás után három abszolút fekete testre irányítják: (1) egy hideg célra, mely 95 K hőmérsékletével a világűrt képviseli, (2) egy laboratóriumi fekete testre, mely a Föld sugárzását utánozza, s (3) egy meleg fekete testre, mely a belső kalibrációs célt képviseli (12. táblázat). Mind a belső, mind a külső hőmérsékleteket platina ellenállás-hőmérőkkel (Platinum Resistance Thermometers, PRT) mérik. A mért hőmérsékletekből kiszámolják a sugárzási értéket minden termális csatornára vonatkozóan úgy, hogy az AVHRR kimenő jelei (a beütésszámok) 10 bites formátumúak legyenek, 0-tól 1023-ig terjedő tízes számrendszerbeli értékekkel. A skála fordított irányú, vagyis kisebb beérkező sugárzás (alacsonyabb hőmérséklet) esetén kapunk nagyobb kimenő jelet.

Az egész előkalibrációs ciklust többször (3-5 alkalommal) megismétlik. Mindegyik alkalommal a műszert egy másik hőmérsékletre állítják be a PRT-k segítségével 10 és 30 °C között. Ez a hőmérsékleti tartomány megegyezik azzal a tartománnyal, amit a pályáján haladó műszerben a belső kalibrációs cél felvehet. Ez utóbbit elektromos fűtőszálakkal 15 és 20 °C közötti hőmérsékleten próbálják tartani, melyet a PRT-vel pontosan megmérnek. A hőmérsékleti teszt sorozatok során a laboratóriumi fekete test hőmérsékletét – mely a Földi célt képviseli – 15-17 különböző szintre állítják be 180 K és 335 K között, mely így lefedi azt a hőmérsékleti skálát, melyet a műszer a Földre tekintve valaha mérhet. Ezen kalibrációs fekete testeknek az összefoglalása látható a 12. táblázatban.

Földi laboratóriumi körülmények között:	Hideg cél (≈95 K)	Laboratóriumi fekete test (180-335 K)	Belső kalibrációs fekete test (283-303 K)
Valóságban:	Világűr (≈3-4 K)	Föld (180-335 K)	Belső kalibrációs fekete test (≈290 K)

12. táblázat

A laboratóriumi kalibrációhoz felhasznált fekete testek megfeleltetése a tényleges céloknak

4.2.2.2. Kalibráció a világűrben

Az eltérő körülmények miatt a laboratóriumi mérések alapján meghatározott kalibrációs függvények és együtthatók csak részben alkalmazhatók a sugármérő űrbeli működése során. A felbocsátás után folyamatos referencia-mérésekkel kontrolálják a kalibrációt. Ehhez a világűr (mint abszolút fekete testet) és egy belső kalibrációs fekete testet használnak fel úgy, hogy állandóan mérik a sugárzásukat és az utóbbi hőmérsékletét. Ezen referencia-mérésekkel mindegyik termális csatornára meghatároznak egy kalibrációs görbét, melyből utána bármelyik beütésszámhoz megállapítható a hozzá tartozó sugárzásérték. Ezt a kalibrációs folyamatot mutatjuk be a következőkben.

Az AVHRR szenzora minden egyes földfelszíni sáv letapogatásakor elsőként a világűrbe tekint ki (ennek sugárzásából előállít csatornánként tíz darab 10 bites beütésszámot), majd a 2048 pixeles (vagyis 2048 beütésszámból álló) földfelszíni letapogatott sáv után a belső kalibrációs test sugárzására vonatkozó értékek következnek (újabb tíz darab 10 bites beütésszám csatornánként). Az AVHRR műszer tükrének folyamatos forgásának következtében a következő földfelszíni sor letapogatása előtt újból a világűrre vonatkozó méréssel kezdődik a ciklus. A letapogatás során mért értékek kalibrációjához azért használatos ez a két kalibrációs fekete test, mert sugárzási értékeik közé egyértelműen kifizítható a Föld felszínéről 2048 pixelen érzékelt teljes sugárzási spektrum.

A világűr hőmérséklete ismertnek és állandónak tekinthető (12. táblázat), a belső fűtött kalibrációs fekete test hőmérsékletét (T_{BB}) négy ellenállás hőmérővel (PRT) mérik, melyek az AVHRR műszerbe vannak beágyazva. A felszíni vevőkhöz továbbított információk fejlécében minden sor (mely egy adott letapogatott sávra vonatkozik) 18., 19. és 20. eleme a négy beépített PRT közül az egyikhez tartozó három különböző mérés eredménye. Négy soron keresztül mindig másik PRT méréseit adják meg, majd az ötödik sorban nullával jelzik a ciklus végét. Jelöljük C_{PRT_i} -vel az egy sorban található i . PRT-re vonatkozó három leolvasás átlagát. Ekkor egy negyedfokú képlet segítségével kiszámolható az adott platina ellenállás-hőmérő T_{PRT_i} hőmérséklete:

$$T_{PRT_i} = d_0 + d_1 C_{PRT_i} + d_2 C_{PRT_i}^2 + d_3 C_{PRT_i}^3 + d_4 C_{PRT_i}^4 \quad (10)$$

A d_0 , d_1 , d_2 , d_3 és a d_4 együtthatók értékei hőmérőnként és műholdanként csak nagyon kismértékben térnek el egymástól. A NOAA-15 és -17 műhold esetén a d_3 és d_4 értékei nullával egyenlők. A négy hőmérő méréseiből előálló T_{PRT1} , T_{PRT2} , T_{PRT3} , T_{PRT4} hőmérsékletek

számtani közepével adható meg a belső kalibrációs fekete test T_{BB} hőmérséklete, melynek mértékegysége Kelvin:

$$T_{BB} = \frac{T_{PRT1} + T_{PRT2} + T_{PRT3} + T_{PRT4}}{4} \quad (11)$$

A belső kalibrációs fekete test így kapott T_{BB} hőmérsékletéből meghatározható a rá vonatkozó N_{BB} radiancia, mely az adott csatornához tartozó spektrális válaszfüggvénnyel súlyozott Planck-függvény átlagos értéke. Ezt a számítást azonban jelentősen le lehet egyszerűsíteni a következő módon. A spektrális válaszfüggvényt minden egyes csatornára előre megállapítják kb. 200 darab hullámhossztartomány segítségével, mely alapján minden csatornára külön-külön táblázatban (energia-táblázat) megadják a 180 K és 340 K közötti 0,1 K-fokkonkénti hőmérsékletekhez tartozó radiancia-értékeket. A (12) és (13) egyenletek kielégítő pontossággal visszaadják az energia-táblázatokban szereplő hőmérsékleteket a 180-340 K tartományban:

$$T_{BB}^* = A + BT_{BB} \quad (12)$$

ahol T_{BB}^* az effektív fekete test hőmérséklete, A és B pedig csatornától és műholdtól függő együtthatók.

$$N_{BB} = \frac{c_1 \nu_c^3}{\frac{c_2 \nu_c}{e^{T_{BB}^*} - 1}} \quad (13)$$

ahol a c_1 illetve c_2 pedig az úgynevezett első és második univerzális sugárzási állandó, melyek a (8) és a (9) egyenlet alapján számolhatóak, ν_c pedig az adott csatornához tartozó súlyozott hullámszám. Ennek (ν_c) reciproka megközelítően az adott termális csatorna hullámhossztartományának középértéke.

A két kalibrációs céltest (a belső kalibrációs fekete test, és a világűr) szolgál arra, hogy sugárzási beütésszámuk és a hozzájuk tartozó mért hőmérsékletek ismeretében lineáris becsléssel pixelenként kiszámítsuk a Földi sugárzási beütésszámokhoz tartozó hőmérsékleteket. Minden leképezési sor végén az AVHRR szenzora a belső kalibrációs fekete testre néz, és ekkor mind a három termális csatornához tíz-tíz beütésszámot mér, melyek a HRPT fájl fejlécének 23. és 52. szava között kerülnek tárolásra. Amikor pedig a műszer a

világűr felé néz, mind az öt AVHRR csatornával szintén tíz-tíz beütésszámot mér. Ezek foglalják el a fejléc 53. és 102. szavai közötti helyeket (13. táblázat).

A szó sorszáma	A szavak jelentése
1 - 6	Szinkronizáló szavak
7 - 8	Az AVHRR azonosítója
9 - 12	A dátum kódja
13 - 17	Az AVHRR kalibrációjához szolgáló csatornánkénti 1-1 ellenőrző szó
18 - 20	Egy adott platina ellenállás-hőmérő három leolvasási értéke
21 - 22	Egyéb tartalék szavak
23 - 52	Az AVHRR termális csatornához tartozó 10-10 kalibrációs beütésszám a belső kalibrációs feketetestre vonatkozóan
53 - 102	Az AVHRR mind az öt csatornához tartozó 10-10 kalibrációs beütésszám a külső kalibrációs feketetestre, azaz a világűrre vonatkozóan
103	Szinkronizáló szó

13. táblázat

A HRPT leképezési soraihoz tartozó fejlécek kalibrációs része

A csatornánként mért tíz-tíz kalibrációs érték átlagával a váratlanul fellépő zajokat simíthatjuk ki. A látható és közeli infravörös csatornákra vonatkozó értékekre és átlagaikra a kalibrációs eljáráshoz nincs most szükség. A belső kalibrációs fekete test átlagos beütésszámát (C_{BB}), radianciáját (N_{BB}), valamint a világűr átlagos beütésszámát (C_S) és radianciáját (N_S) felhasználva csatornánként előállítható a lineáris radiancia (N_{LIN}):

$$N_{LIN} = N_S + (N_{BB} - N_S) \frac{(C_S - C_E)}{(C_S - C_{BB})} \quad (14)$$

ahol C_E jelöli az AVHRR műszer által mért beütésszámot a 2048 földi pixel valamelyikére vonatkozóan. Mivel minden egyes sorban a négy platina ellenállás-hőmérő közül csak az egyik hőmérő által megmért hőmérsékletek találhatóak meg, s így a belső kalibrációs fekete test hőmérsékletének meghatározásához (mely átlagolással történik) négy sorra van szükség, továbbá mivel minden ötödik sorban 0 értékek állnak a platina-ellenállás hőmérők számára fenntartott helyeken, így erre az öt sorra kell kiterjeszteni a korábbiakban megállapított N_{BB} radiancia-értéket.

Az adatsorokban időnként előforduló hibák miatt a HRPT-fájl felépítése nem mindig ilyen szabályszerű. Vételi vagy egyéb hiba miatt kimaradhat egy vagy akár több teljes sor is, mely az AVHRR mérési eredményeken túl a fejléceket, s bennük a kalibrációhoz szükséges értékeket, így a platina-ellenállás hőmérők adatait is tartalmazná. Ezen PRT-vel mért

hőmérsékletek hiányában nem lehet a megszokott pontossággal megadni a belső kalibrációs fekete test hőmérsékletét az adott pár sorra vonatkozóan. Ilyenkor az előtte és mögötte lévő átlagolt hőmérsékletek alapján interpolációval pótoljuk hozzá a csonkított tömbhöz a szükséges hőmérséklet-értékeket. Ez a probléma legtöbbször a teljes műholdkép elején és végén jelentkezik (ld. az 5.1. alfejezetet), de tapasztalataink alapján előfordulhat a kép közepén is, vagyis akár abban a kivágatban, melyet az eredeti képből archiválás és feldolgozás céljából rutinszerűen kivágunk. Így ennek a hibaforrásnak a folyamatos ellenőrzése is indokolt.

Az AVHRR 3B csatornájának indium-antimon érzékelője (Labrot et al., 2003) lineárisan reagál a bejövő sugárzásra, így nincs szükség nem-lineáris korrekciókra, s az N_S radiancia értéke erre a csatornára nullával egyenlő. Ezzel ellentétben a 4-es és az 5-ös csatorna higany-kadmium-tellurid érzékelői a bejövő sugárzásra nem-lineáris választ adnak, s így az N_S radianciák értékei nullától eltérőek lesznek. A fellövés előtti laboratóriumi mérések alapján állíthatjuk, hogy a mérni kívánt földfelszíni cél radianciája az AVHRR betűszámaikat leíró négyzetes függvény a lineáristól csak kis mértékben tér el. E függvénynél a nem-linearitás mértéke az AVHRR működési hőmérsékletétől függ. Feltételezték, hogy ez a nem-lineáris viselkedés a pályáján haladó műhold esetében is megmarad, ezért a következő korrekciós módszert alkalmazhatjuk. Először az N_{LIN} lineáris becslést kell kiszámolni a (14) egyenlet alapján az adott csatornához tartozó a világűrre vonatkozó N_S radianciával. Majd pedig eme nem-lineáris radiancia segítségével a következő négyzetes korrekciót alkalmazva előállítható az N_{COR} nem-lineáris korrekciós érték:

$$N_{COR} = b_0 + b_1 N_{LIN} + b_2 N_{LIN}^2 \quad (15)$$

ahol a b_0 , b_1 és b_2 négyzetes együtthatóinak értékei csatornától és műholdtól függő konstansok. A Földi pixelről az érzékelőbe jutó N_E sugárzás értékét a fenti két érték (N_{LIN} és N_{COR}) összegeként állíthatjuk elő:

$$N_E = N_{LIN} + N_{COR} \quad (16)$$

Így a nem-nulla úrsugárzás bevezetése (N_S) egy elméleti eszköz, melyet két dolog indokol. Egyrészt alkalmazásával csatornánként csak egyetlen egy négyzetes korrekciós egyenletre van szükség, hiszen a négyzetes együtthatók függetlenek az AVHRR működési hőmérsékletétől. Másrészt pedig ezzel a módszerrel nagyon jól rekonstruálhatjuk a fellövés előtti méréseket, a

négyzetes középérték különbségek a mért és az illesztett adatok között kb. 0,1 K mind a 4-es és az 5-ös csatornára.

Végül a fentiek alapján kapott N_E pixelenkénti sugárzási értékeket átalakítjuk a velük egyenértékű T_E fekete test hőmérsékletekké, melyeket a Planck-függvény invertálásával kapott T_E^* effektív hőmérsékletekből számolhatunk minden termális csatornára (17) és (18) alapján:

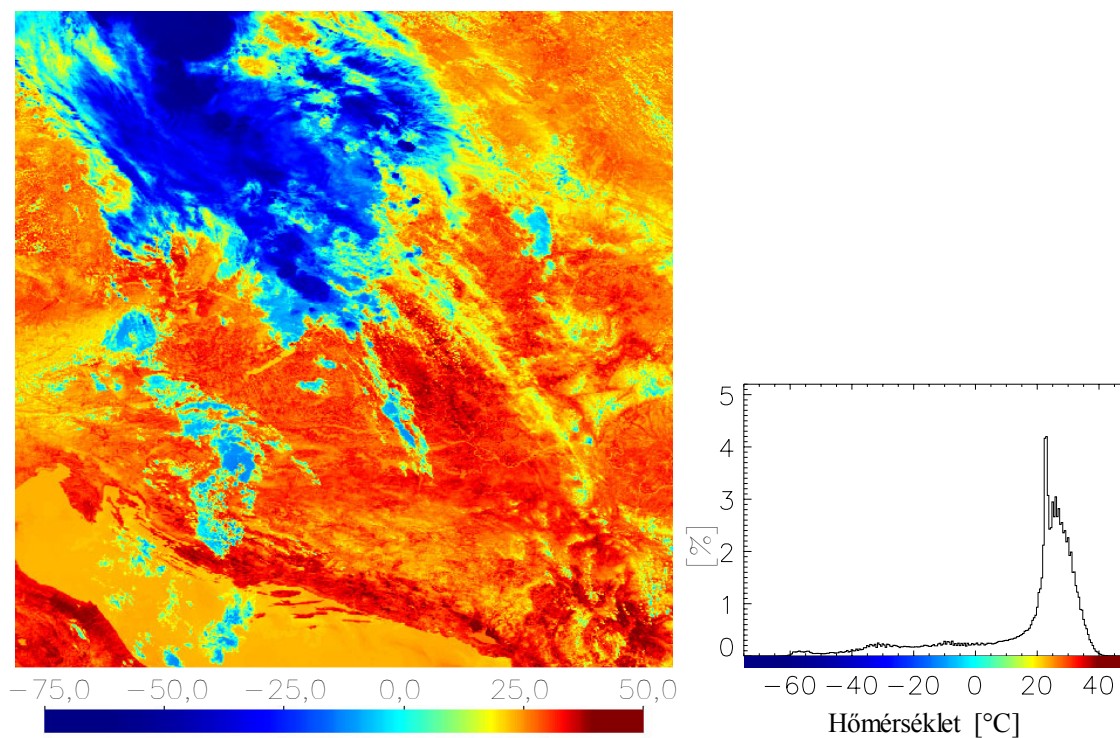
$$T_E^* = \frac{c_2 \nu_c}{\ln\left[1 + \left(\frac{c_1 \nu_c^3}{N_E}\right)\right]} \quad (17)$$

$$T_E = \frac{T_E^* - A}{B} \quad (18)$$

ahol a c_1 , c_2 univerzális állandók, ν_c , A és B együtthatók pedig a korábbiakban szerepelt műholdtól illetve csatornától függő állandók.

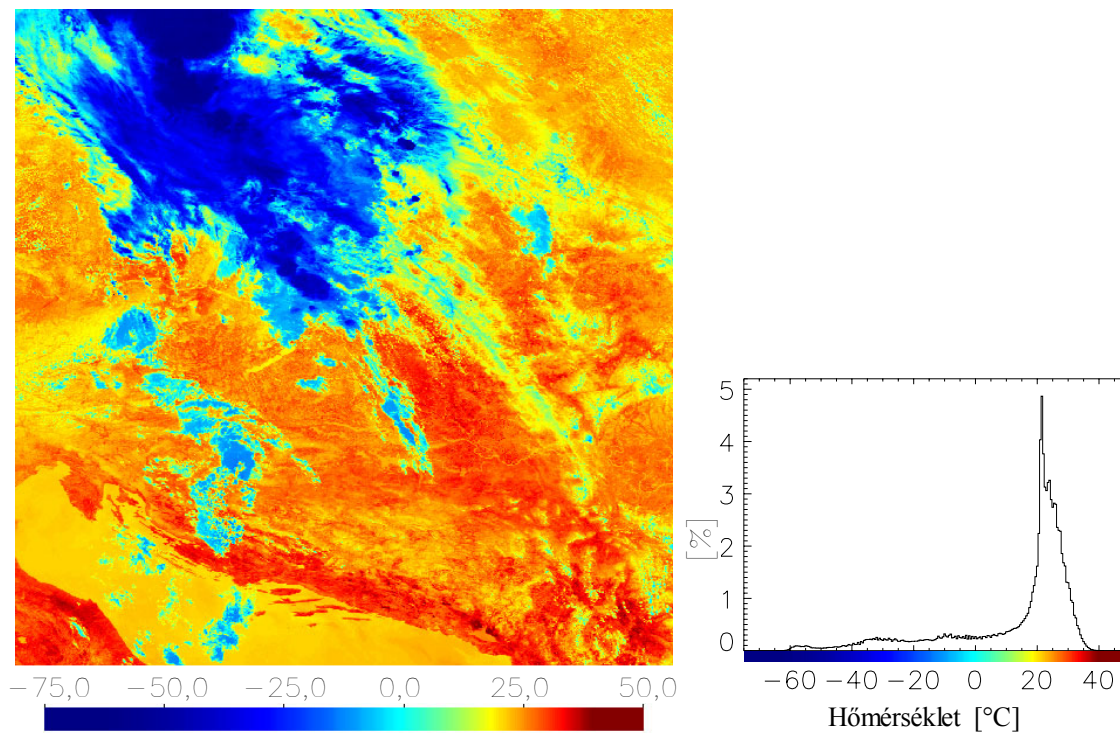
A (18) egyenlettel megkaptuk az adott csatorna képi pixeleihez tartozó hőmérsékleteket. A fentiekben ismertetett felszíni hőmérsékletet számító algoritmus eredményeit mutatjuk be a 23-25. ábrákon a NOAA-17-es műhold 4-es és 5-ös csatornájának mérései alapján a 2003. július 22-ei áthaladása esetére. A hisztogramokon az adott képi pixelek 0,5 °C-onként lettek csoportosítva, s az előfordulásuk gyakoriságát %-ban adtuk meg. Az összehasonlításra alkalmas megjelenítéshez a két csatornából számított hőmérsékleti értékeket egy azonos skálára kellett lenormálni. Ennél a műholdképnél, amint az a 25. ábrán is látszik, a pixelek nagy többségénél a 4-es csatornából származtatott felszíni hőmérséklet magasabb volt az 5-ös csatornához képest, átlagosan 2-2,5 °C-kal. A magasabb felhőtetők esetében kisebb eltérés adódott a két csatornából számolt hőmérsékleti értékek között, mint a talajfelszínnek esetén, a legmagasabb felhőtetők egy részénél az is előfordult, hogy az 5-ös csatornából számolt érték volt a magasabb.

A termális csatornák sugárzási értékeiből előállított hőmérsékleti értékeket erősen befolyásolják a felszín és a légkör állapotán túl a mérés hullámhossz-tartománya és a műszer egyedi tulajdonságai. Ennek következtében a kiszámított földfelszíni hőmérsékletek nem egyeznek meg sem a különböző csatornákra, sem a tényleges földfelszíni hőmérsékletekkel. Általában a kalibrációval nyert hőmérséklet-értékek alábecslik a tényleges földfelszíni



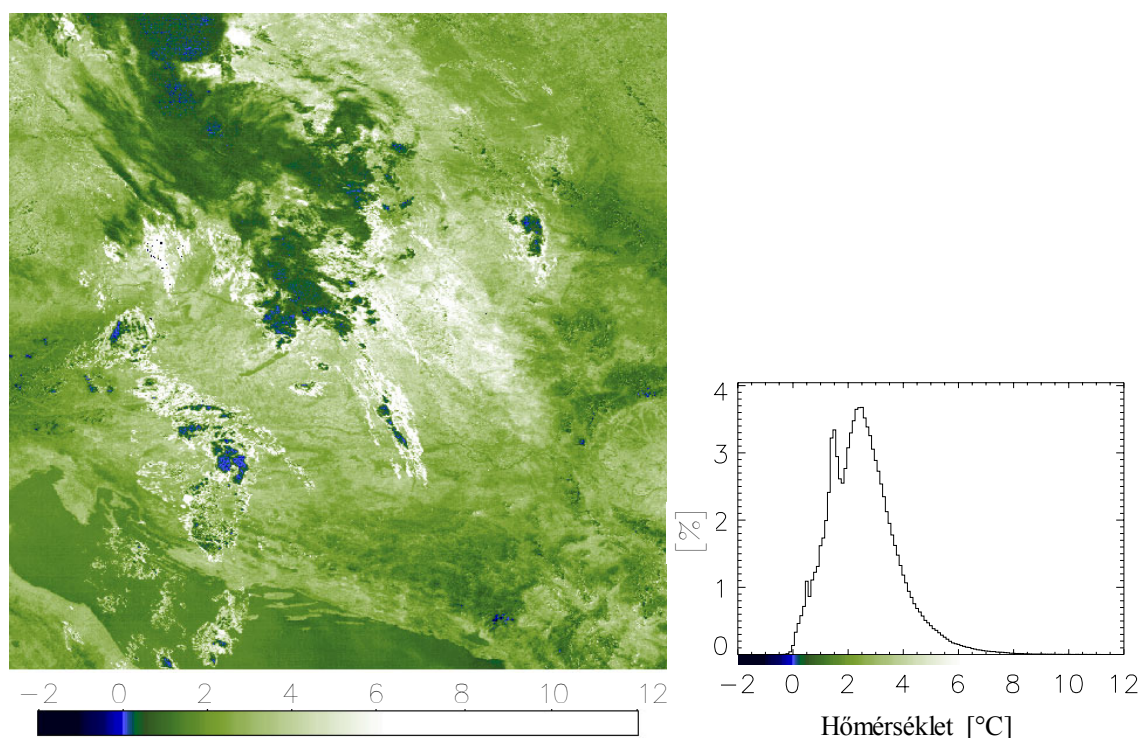
23. ábra

Az AVHRR 4-es, infravörös csatornájának méréseiből a kalibráció után kapott hőmérsékleti mező és a hozzá tartozó relatív gyakorisági hisztogram
/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31, 4-es csatorna/



24. ábra

Az AVHRR 5-ös, infravörös csatornájának méréseiből a kalibráció után kapott hőmérsékleti mező és a hozzá tartozó relatív gyakorisági hisztogram
/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31, 5-ös csatorna/



25. ábra

Az AVHRR 4-es és 5-ös infravörös csatornájának méréseiből a kalibráció után kapott hőmérsékletek különbségi mezője illetve a hőmérséklet eltérésnek relatív gyakorisága
/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31/

hőmérsékleteket, melynek az az oka, hogy a légkör tetején mért sugárzásnál a tényleges felszíni értékekhez a légkör hatása is hozzáadódik (elnyelésként vagy a felszín felé történő visszaverődésként). A légköri abszorpció (sugárzáselnyelés) és emisszió (kisugárzás) illetve a talaj emisszivitása (sugárzóképesége) csökkenti a korrelációt a felszín által kibocsátott sugárzás és a műholdon levő sugárzásmérőt ténylegesen elérő radiancia között, megnehezítve a felszínre vonatkozó hőmérsékletek kiszámolását. A levegőben történő sugárzás-elnyelésért és újra kibocsátásért a vízgőz és a légköri gázok közül elsősorban a CO₂ felelős azokban a légköri ablakokban is, melyet az AVHRR/3 infravörös csatornáit méréseikhez használnak. A felszín hatása pedig az, hogy az egyáltalán nem tökéletes hősugárzás-kibocsátó (azaz nem tökéletes fekete test) és ez a tökéletlenség is erős változékonysággal bír.

Ennek a problémának a megoldására az AVHRR sugárzásmérő berendezés adataiból a Föld felszíni hőmérsékletének minél pontosabb becslésére már számos módszer született (Becker és Li, 1990; Kerényi és Putsay, 2000; Sobrino et al., 1993; Ulivieri et al., 1992), de egyik eljárás sem használható univerzálisan. Ezen algoritmusok alapja az ún. *split window* módszer: a két egymáshoz közeli infravörös csatorna a légköri gázok különböző

sugárzáselnyelését érzékeli, így a felszín hőmérséklete a két csatorna valamilyen lineáris kombinációjaként becsülhető meg:

$$T_S = a_0 + \sum_{i=1}^n a_i T_i \quad (19)$$

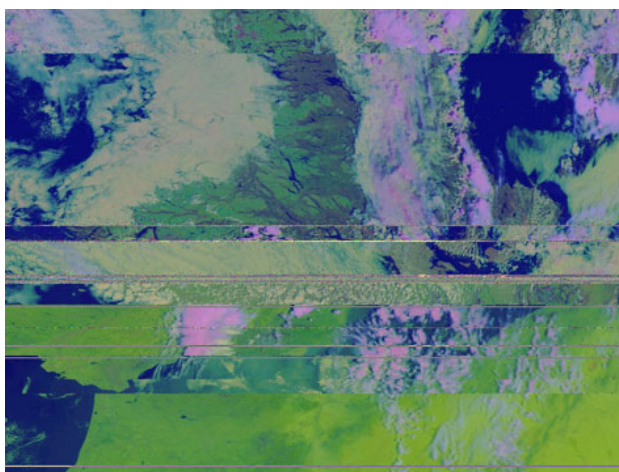
Ebben az egyenletben egy adott pixelre T_S jelöli a felszíni hőmérsékletet, T_i a kalibrációval meghatározható fényességi hőmérsékletet. Az a_0 és a_i együtthatók a légkör állapotától és a felszín emisszivitásától függenek. Időnként ezekre az együtthatókra bizonyos konkrét értékeket javasolnak, de ezek jelentős hibákat vonhatnak maguk után. A felszíni hőmérséklet előállításához tehát mindenképpen szükség van az infravörös csatornákra vonatkozó, a felszín emisszivitását valamilyen módon kifejező együtthatókra. Ezek lehetnek közvetlenül maguk az adott csatornához tartozó felszíni emisszivitási tényezők, de megadható másként is. Összesen öt különböző módszer ismert ezen emisszivitási együtthatók meghatározására. De tekintve, hogy ennek a problémának az ismertetése és megoldása már nem tartozik a dolgozat témakörébe, ezért tovább ezt nem részletezzük.

5. Az AVHRR/3 mezők felhasználásához szükséges további vizsgálatok, lépések

5.1. Hibaforrások az adatsorokban

A műholdakról érkező HRPT fájlok hibákkal terheltek. Ezen hibák mennyisége annál nagyobb, minél több olyan légköri részecske kerül a rádiósugárzás útjába a vétel során, mely ezt a sugárzást szórja. Ilyen részecskék lehetnek az aeroszolok, és a különböző csapadékelemek. Mivel a vétel kezdetekor és végén a műhold a horizont közelében tartózkodik, s így jóval vastagabb légrétegen kell az információt hordozó rádiósugárzásnak áthatolnia, ezért a műholdról vett kép elején és végén jelentkezik a hibák túlnyomó része. (Bár ez vastagabb légkör a képek közepén fekvő Kárpát-medencét is tartalmazó 45° és 50° északi szélességek közötti térséget nem érinti, mégis fordulhat elő hiba ezekben a kivágatokban is, ha a vevőantenna és a műhold közötti légrétegben nagy mennyiségben fordulnak elő az előbb említett a rádiósugárzást szóró részecskék.) Az észlelt hibákat jellemzőik alapján az alábbiak szerint csoportosíthatjuk:

(1) Alapvető hibatípusként említhetjük az adathiányt. Ez a HRPT fájlok esetén úgy jelentkezik, hogy bizonyos sorok teljesen hiányoznak. (ld. 4. táblázat) Ez a hiba leggyakrabban a műholdkép két végénél jelentkezik a fent említett vételi zavarok következtében, mégis előfordulhat akár a kép közepénél is (26. ábra), így az általunk készített kivágatokban is. A hiányzó sorokról meggyőződhetünk vizuálisan, de egyértelműen igazolja őket a meglévő sorokhoz tartozó időpontok közötti nagyobb ugrás, illetve a platina-ellenállás



26. ábra

Egy RGB színezésű nyers, hiányos műholdkép
egy részlete
/ NOAA-17, 2003.07.05 10:53/

hőmérők adatainak folytonosságában bekövetkező szakadás (ld. a 4.2.2.2. alfejezetet). Az időpontokban bekövetkező nagyobb ugrás esetén a szabályszerinti 166-167 ezredmásodperces időkülönbség helyett ennek többszörösével találkozunk úgy, hogy a következő sorokban nem kerül sor ennek automatikus kijavítására. Ha ez a probléma érinti az általunk készített kivágatot, feltétlen pótolni kell a hiányt a kimaradt sorok helyének beszúrásával. A hibák megjelenési formájában nem létezik

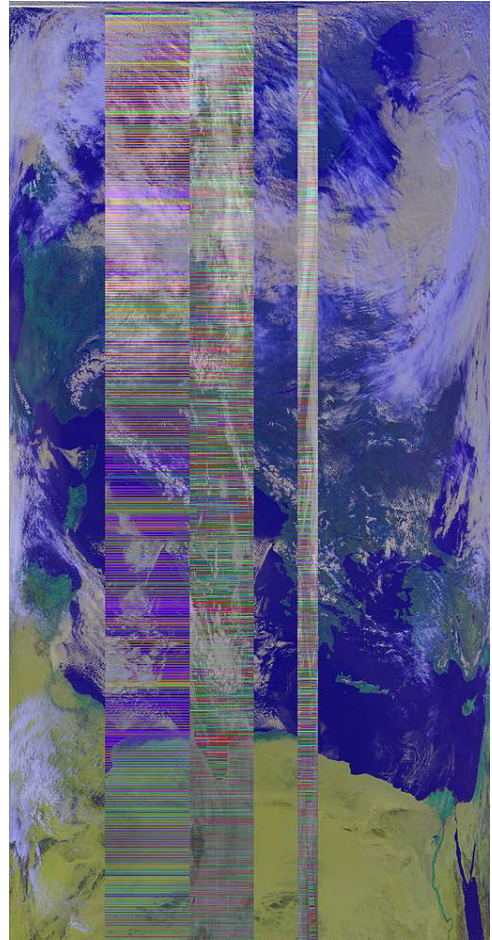
alapvető szabályosság, így felismerésük nem egyszerű feladat. Tekintve, hogy a sorbeszúrással járó képpontok alkotta mátrixok tologatása nagy memóriájú és gyors processzorú számítógépek esetén is lassú folyamat, ezért csak a Kárpát-medencét tartalmazó kivágatra érdemes lefuttatni az általunk kidolgozott eljárást, a teljes, kb. 5000 km hosszú képre nem. A hiányzó sorok száma a képek középső részében általában csak egy-kettő, de előfordulhat több száz is, ahogy azt a 26. ábra is szemlélteti. A sorbeszúrást minden pixelhez ugyanazt az értéket (adathiány-kódot) rendeljük. Erre a célra a beütésszámok skálájának felső határát, vagyis 1023-at (melyhez a látható tartományú képeken a fehér szín tartozik) választottuk, ugyanis a kép további feldolgozásánál a felhősűrűséssel ezeket a hibás sorokat így biztosan kiszűrjük. Az adathiányos sor beszúráására azért van szükség, hogy a rákövetkező sorok koordinátái ne váljanak hamis értékűvé az eltolódás következtében.

(2) A fejlécben szereplő információk sérülésének számít az, amikor a sorok közötti időkülönbségeknél előfordul egy nagyobb (több ezer másodperces) érték. A következő sorban legtöbbször már a helyes időpont áll, mégis ezen hamis időpontok miatt ilyenkor a földrajzi azonosításhoz szükséges soronkénti időpontokat nem a fejlécekből vesszük ki egyenként, hanem a kép közepének egy megbízható része alapján számítjuk ki a teljes képre.

(3) „Só és bors” (Salt and pepper) nevet viseli az a tipikus hiba, amikor az AVHRR sugárzásmérő műszer által mért pixelenkénti valós beütésszámok helyett hamis értékeket észlelünk. Ezek ugyanúgy 0 és 1023 közötti számok, mint a többi pixel esetén, de értékeik semmilyen szabályosságot nem mutatnak. Kiszűrésükre több módszer létezik. Először meg kell adnunk azt a feltételt, amely alapján egy adott értéket a továbbiakban hibának tekintünk, majd helyettesíteni kell a hibás értéket egy olyannal, mely a szűk környezetére a leginkább jellemző. Ez lehet az adott pixel körüli nyolc másik pixelhez tartozó értékek átlaga vagy mediánja. Míg az előbbi módszernél egy közvetlen szomszédságú szintén hibás érték jelentősen eltolja az átlag értékét, addig a mediánnal való közelítéskor ez nem következhet be, ezért mi is ezzel helyettesítettük a hibásnak tekintett értékeket. Ennek a hibafajtának a kiszűrését megnehezíti, ha a képen nem homogén szerkezetű, hanem éles kontrasztú határokkal rendelkező szemcsés felhőzet figyelhető meg. Problémát okoznak például a kicsi, 1 km²-es nagyságrendű gomolyfelhők is, melyek csak egyetlen egy pixel beütésszámát befolyásolják, így gyakorlatilag eldönthetetlené válik, hogy az adott pixelhez tartozó kiugró értéket hiba vagy gomolyfelhő eredményezi. A digitális felvételek előfeldolgozásához tartozik ez a fajta zajszűrés, amikor a nem kívánatos zavaró effektusokat próbáljuk eltávolítani a képi jelekről.

(4) Szisztematikus hibaként jelentkezik egyes műholdak képein az a típusú hiba, melyre példa a 27. ábra. Ezt a hibát korábban csak a NOAA-14 műhold AVHRR mezőire tapasztaltuk, azonban 2004 márciusától időszakosan előfordul a NOAA-16 műhold esetében is. Ezáltal a NOAA-16 műhold képeinek nagy része szinte teljesen felhasználhatatlanná válik azokban az időszakokban, amikor ez a típusú hiba megfigyelhető.

Nagy mennyiségű hibás érték esetén a kép felhasználhatatlanná válik, ezért a felszíni vagy felhőzeti mező meghatározása céljából sem a sok sorhiánnyal rendelkező, sem pedig a képpontonkénti zavarokkal erősen terhelt áthaladásokkal nem foglalkozunk a továbbiakban.



27. ábra
A NOAA-16 műhold 2004. március
16-ai áthaladása (12:25)

5.2. A felhőzet azonosítása az AVHRR/3 mezőkön

Ahhoz, hogy számításokat végezhessünk akár a felszíni, akár a felhőzetre vonatkozó AVHRR adatokból, meg kell határozni az ún. felhőmaszkot, vagyis azon képpontok összességét, melyek részben vagy teljesen felhővel fedettek. Ezt a műszer különböző hullámhossztartományban mérő csatornáival végezhetjük el. A különböző felhők különböző optikai és termális tulajdonságokkal rendelkeznek, ezért pár egyszerű feltétellel nem lehet az összes felhős képpontot egyértelműen azonosítani, az egyedi módszerek kombinációjára van szükség. A problémát tovább bonyolítja, hogy a felhők eme tulajdonságai időben nem állandók, és hogy az AVHRR által észlelt sugárzási értékeket jelentősen befolyásolja a Nap, a felszíni célpont, és a műhold egymáshoz viszonyított geometriai elhelyezkedése, mely a méréskor fennáll. A feladat összetettségét jellemzi, hogy gyakorlatilag nem létezik olyan feltételrendszer, mely az év bármelyik napján kiszűrné az összes felhős és ködös képpontot. A kellően vastag felhőket egyszerű azonosítani. A felhőszűrés nehézségei nem itt rejlenek, hanem abban, hogy felismerjük és kiszűrjük a képpontnál kisebb méretű gomolyfelhőket, vagy felhőfoszlányokat, mely épp oly nehéz feladat, mint a vékony áttetsző cirrusz felhőzet, a kondenzcsíkok vagy akár a ködök azonosítása. Ha a szűrőkritériumokat túl szigorúra választjuk, akkor alig marad pár felhőmentes képpontunk. Ha túl gyengére, akkor járulékos zaj maradhat a képpontjainkon, mely hatására a belőlük származtatott értékekből hamis következtetéseket vonhatunk le a felszínre s a vegetációra. Az utóbbi eset nagyobb fajsúly miatt célszerű egy kétséges pixelt erősebb feltétellel inkább felhőmentesnek minősíteni. Ugyanígy kritikus még a jég- és hótakaró azonosítása, viszont a nyári félévben ez a probléma a közepes szélességeken (kivéve a hegyvidékeket) csekély jelentőséggel bír. A földfelszín feletti felhőfelismerés jóval nehezebb, mint a nyílt vízfelszín feletti, ugyanis a szárazföldek felszíne jóval inhomogénebb, mint a vízfelszíneké és ez a reflektanciában és a hőmérsékletben egyaránt megmutatkozik. Ezt a nehézségbeli különbséget tovább növeli, hogy a felszín domborzattal szabdalva, mely a napsugárzás visszaverődését a műhold irányába különbözőképpen módosítja.

5.2.1. A felhőzet azonosítására szolgáló módszerek

Számos kutató foglalkozott már a felhőazonosítás problémájával anélkül, hogy sikerült volna egy általános érvényű feltételrendszert kidolgozni, mely automatikusan használható lenne a Föld bármelyik pontján és az év bármelyik napján. A kifejlesztett eljárásokat 3 csoportba sorolhatjuk be. (1) A statisztikus megközelítések az adott kép hisztogramjainak vizsgálatán alapulnak (Phulpin et al., 1983). Akár a reflektanciát, akár a hőmérsékletet vizsgáljuk, meghatározott csoportbeli értékek tartoznak a felhőzethez, a szárazföldre és a vízfelszínre (ld. 16., 17., 23. és 24. ábra). A jó felhőszűrés ilyenkor azon múlik, hogy a csoportok közötti határt hogyan állapítjuk meg. Ez azonban minden áthaladásra más és más lehet, hiszen függ a levegő hőmérsékletétől, vagyis az évszaktól és a légkör aktuális állapotától. Továbbá függ még a mérés geometriai helyzetétől, ugyanis ha a Nap pontosan a műhold irányából világítja meg a felszínt, akkor akár kétszerese is lehet a reflektancia annak az értéknek, amit az árnyékos esetekben mér (Heiner Billing, 2004, személyes kommunikáció). Ezeket a hatásokat a már említett BRDF függvény szűri ki, ennek alkalmazásától a függvény bonyolultsága miatt mi most eltekintünk. (2) Az AVHRR csatornáinak bizonyos kombinációjához rendelt rögzített küszöbértékekkel megadható a felhőmentes képpont feltételrendszere (Saunders és Kriebel, 1988a; Saunders és Kriebel, 1988b; Stowe et al., 1991; Derrien et al., 1993). Ezt a típusú felhőazonosítást alkalmazzák a leggyakrabban, mi is egy ilyen módszert alkalmazunk a feladat megoldására. (3) A mintafelismerés módszere a 10000 km² vagy nagyobb kiterjedésű területek ismert felületét, szerkezetét veszi alapul (Garand és Weinman, 1986; Ebert, 1987), s felhősnek ítél meg egy pixelt, ha ettől bizonyos formában eltér az aktuálisan mért érték. Ezeket túl meg kell még különböztetnünk a globális, a regionális és a csak adott körülmények között működő eljárásokat.

A több évtizede fennálló műholdas laboratóriumokban legtöbbször olyan saját fejlesztésű metódusokat, ún. dinamikus küszöbérték módszereket használnak, melyek egy adott képhez egyéb, időben és térben változó információkat használnak fel, mint bemenő paraméterek. Ilyen lehet időjárási vagy klímamodellek hőmérsékleti mezeje, vagy folyamatos képfeldolgozás esetén a referenciaértékek (reflektanciára, NDVI-ra, stb.), melyeket az előző áthaladásokból számítanak ki (Koslowky, 1997b).

Más módszerekre van szükség nappal, amikor a látható tartományokban a műszer képes érzékelni a Föld által visszavert sugárzást, és más módszerekre éjszaka, amikor a számítások csak a termális csatornák mérésein alapulhatnak.

5.2.1.1. A felhőzet azonosításához használt feltételek és küszöbérték

A következőkben bemutatjuk a nyílt vízfelszín- és felhőazonosításhoz leggyakrabban használt feltételeket és a hozzájuk tartozó küszöbértékeket. Ezekben a képletekben ρ_1 , ρ_2 és ρ_{3A} jelöli rendre az 1-es, a 2-es és a 3A csatornákból kalibráció során a (1)-(2) egyenlettel származtatott reflektanciákat; T_{3B} , T_4 és T_5 pedig a 3B, a 4-es és az 5-ös csatornákból az (10)-(18) egyenletekkel kiszámolt hőmérsékleteket. A felhőazonosításkor célszerű egyben a nyílt vízfelszínekhez tartozó képpontokat is meghatározni. Ehhez bevezetjük az ún. NDVI-t, a normalizált vegetációs indexet:

$$NDVI = \frac{\rho_2 - \rho_1}{\rho_2 + \rho_1} \quad (20)$$

ahol ρ_1 és ρ_2 jelöli szintén az 1-es és a 2-es csatornához tartozó reflektanciákat. Ennek az indexnek az értéke minden körülmények között -1 és +1 között változhat, a vegetációt általában pozitív értékű NDVI jellemzi.

Először az általunk használt felhőszűrő feltételrendszert mutatjuk be, melynek eredményeit két áthaladásból készített kivágaton szemléltetjük. Az első, a dolgozat folyamán végig vitt NOAA-17 műhold 2003. július 22-ei 09:31-es áthaladása. A 28. ábrán látható ennek az áthaladásnak (mely RGB színezéssel a 12. ábrán volt látható) a kalibrált reflektanciáiból készített NDVI-képe.

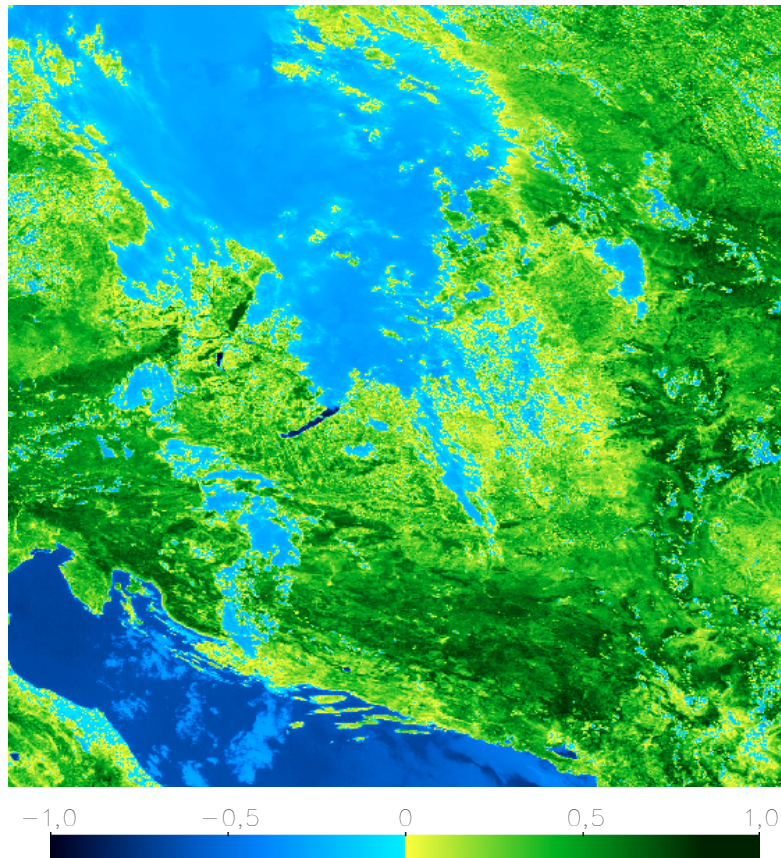
5.2.1.1.1. Vízfelszín- és felhőszűrő kritériumok nappali képekre

Nyílt vízfelszínek és vastag felhők esetén az 1-es csatornával érzékelt sugársűrűség egyenlő, vagy nagyobb, mint az, amit a 2-es csatorna érzékel, s ennek következtében az NDVI negatívvá válik. Ez az egyik feltétele a vízfelszínek azonosításának, de szükség van még egy továbbiára is, nevezetesen hogy a szintén negatív NDVI értékekkel jellemezhető felhőket kiszűrjük. Ez a második feltétel a vízfelszínek reflektanciájára vonatkozik, mely a 2-es csatorna esetén jóval alacsonyabb, mint a felhőké (ld. 17. ábra). Az ún. vízmaszkot ezzel a két küszöbértékkel határozhatjuk meg:

$$NDVI < 0 \quad \text{és} \quad \rho_2 < 15\% \quad (21)$$

Földfelszín esetén, még ha a talaj kopár is, általában a 2-es csatornával mért értékek a nagyobbak, s így az NDVI pozitív lesz. Azonban a talaj reflektanciája sosem emelkedik 40% fölé, így ezzel a további szigorítással együtt definiálhatjuk az ún. földmaszkot:

$$NDVI > 0,1 \quad \text{és} \quad \rho_2 < 40\% \quad (22)$$



28. ábra

NDVI-kép a NOAA-17 műhold 2003. július 22-ei 09:31-es áthaladásából készített kivágratra

A két látható csatorna méréseinek az összehasonlítása így nem csak az egyik főkritérium a felhőmaszk meghatározásában, hanem egyben egy eszköz arra is, hogy a talajt a vízfelszíntől megkülönböztessük. Az előbbi két feltétel azonban nem minden földrajzi területen működik tökéletesen. Ilyen térségek például Spanyolország és Észak-Afrika egyes területei, ahol biztosan felhőmentes esetekben is kaphatunk a száraz talajfelszínre negatív NDVI értékeket. Ennek oka az altalaj vöröses színeződése, mely magasabb reflektancia-értékeket ad az 1-es csatornával érzékelve, mint a 2-essel, s így az NDVI negatívvá válik. Ezt csak érdekességképpen jegyeztük meg, a Kárpát-medence térségében nem kell erre számítanunk.

A felhők sokszínűsége miatt azonosításukhoz sokkal több feltételre van szükségünk, ahol egy-egy feltétel csak egy adott, bizonyos tulajdonságokkal rendelkező részét ismeri fel a

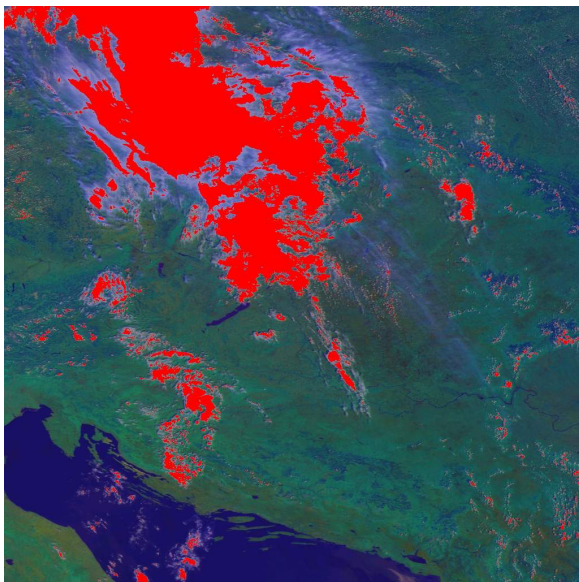
különböző felhőtípusoknak. Szinte a legáltalánosabban használt feltétellel élünk, ha akkor tekintünk egy képpontot felhősnek, ha annak reflektanciája meghalad egy bizonyos küszöbértéket, azaz például:

$$\rho_1 > 30\% \quad (23)$$

Ez az érték önkényesen választott, de a nagy vastagságú felhők jelentős részét kiszűri (29. ábra). Szintén reflektancia értékeken alapul a következő feltétel, mely Hu et al. (2000) munkájához fűződik. Egy képpontot felhősnek tekinthetünk, ha igaz rá, hogy:

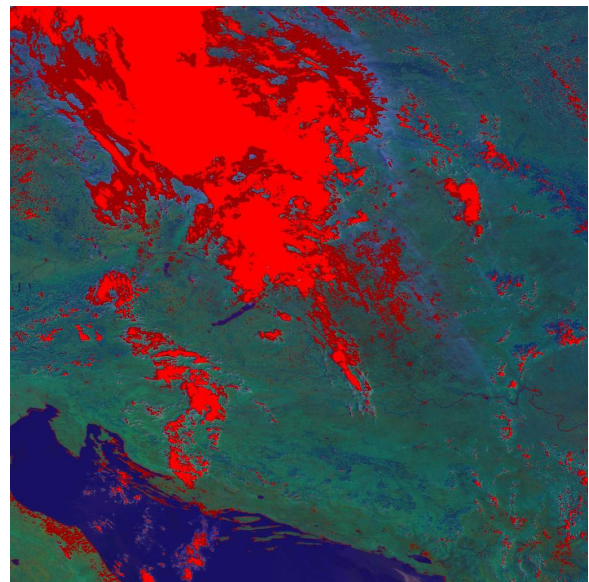
$$0,8 < \frac{\rho_2}{\rho_1} < 1,25 \quad (24)$$

Ez a két határoló érték megfeleltethető annak, mintha az NDVI értékeket korlátoznánk be -0,11 és +0,11 közé.



29. ábra

A (23) felhősűrítő feltétel eredménye (piros színezéssel) az eredeti RGB színezésű képen / NOAA-17, 2003.07.22 09:31/



30. ábra

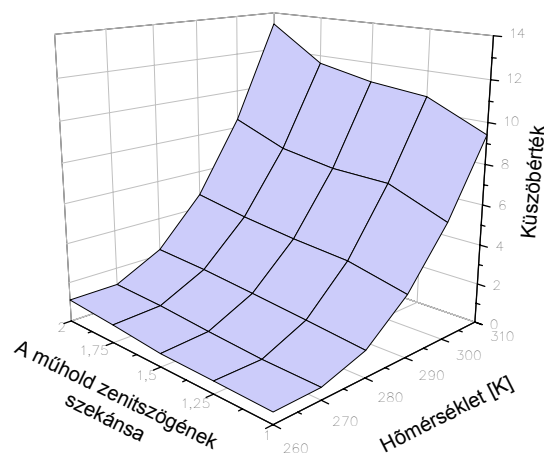
A (24) felhősűrítő feltétel eredménye az előző (23) feltétel mellett (sötétpiros színezéssel) / NOAA-17, 2003.07.22 09:31/

Az egyik legnehezebben felismerhető és kiszűrhető felhőfajta a vékony cirrusz felhőzet. Ez a felhő vékonysága és áttetszősége miatt nem mindig látszik a reflektancia-képeken (16-18. ábra), csak a hőmérsékleti mezőkön vehető észre (23-24. ábra összevetve a 12. ábrával). Legjobban a 4-es és az 5-ös csatorna hőmérsékleteinek különbsége (T_4-T_5) alkalmas a felismerésükre (25. ábra), ugyanis általában magasabb T_4-T_5 jellemzi a cirrusz felhőzetet, mint a felhőmentes területeket. Egy adott hőmérsékleti intervallummal mégsem

lehet egy pixelről egyértelműen eldönteni, hogy van e rajta fátyolfelhőzet, ugyanis a mért értékeket nagymértékben befolyásolja az, hogy a műhold hány fokos szög alatt látta a felhőzetet, vagyis az adott képponthoz hány fokos műholdzenitszög (vagy annak szekánsa) tartozik. Saunders és Kriebel 1988-ban publikálta azt az eljárást, mely jobb híján a mai napig használatos ezen típusú felhők kiszűrésére. Sugárzás átviteli törvénnyel állapították meg azt a felületet és annak markánspontjait (31. ábra), mellyel minden pixelhez egyenként meghatározható az a küszöbérték (Th), mely felett fátyolfelhőzettel borított képpontról beszélhetünk:

$$T_4 - T_5 > 3 \cdot Th \quad (25)$$

A konkrét küszöbértéknek a meghatározásához minden pixelhez szükséges továbbá a 4-es csatorna által érzékelt T_4 hőmérséklet, és a műhold zenitszöge, mely minden sorra ugyanaz, így elég csak egyszer kiszámolnunk. Számítása egy sor összes pixelére a 6. ábra alapján történik. A δ helyi merőlegestől vett eltérés maximálisan $\pm 13,645^\circ$ lehet, s így a maximális műholdzenitszög $\pm 69,045^\circ$. A két szélsőértékű zenitszög között bizonyos trigonometrikus egyenletekkel előállítható minden pixelhez a hozzátartozó műholdzenitszög. Megjegyezzük, hogy a módszer maximálisan csak $\pm 60^\circ$ -os műholdzenitszöget enged meg (ld. a 31. ábrát, ahol szekánsa csak 2-ig megy), vagyis nem értelmezhető az áthaladások szélén lévő torzult pixelekre, melyekre mi már eleve el sem készítjük a kivágatainkat (ld. 3.4. alfejezetet). A módszer hátránya, hogy bizonyos tulajdonságú, de biztosan felhőmentes képpontokat is (a

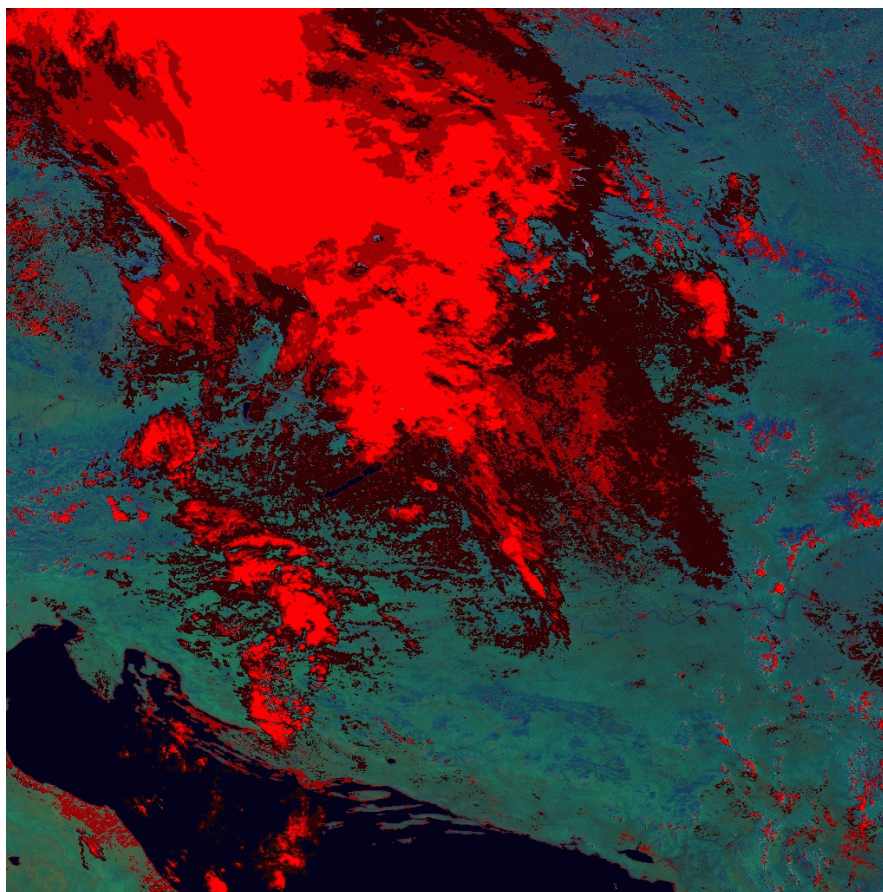


31. ábra

A vékony fátyolfelhők kiszűrésére használt hőmérséklettől és a műhold zenitszögétől függő kétdimenziós küszöbérték Saunders és Kriebel (1988) nyomán

korábbiakban említett vörös talajukat) hibásan felhővel borítottak ítéli meg, de Magyarország térségére ez a talaj s így ez a hiba sem jellemző. Ennek a cirrusz-szűrő feltételnek az eredményét láthatjuk a 32. ábrán, ahol egyben összefoglaljuk az általunk használt vízfelszín- (21) és felhőszűrés (23)-(24)-(25) eredményét. Érdeemes összehasonlítani az így kapott felhőmaszkot a kiindulási 12. ábrával.

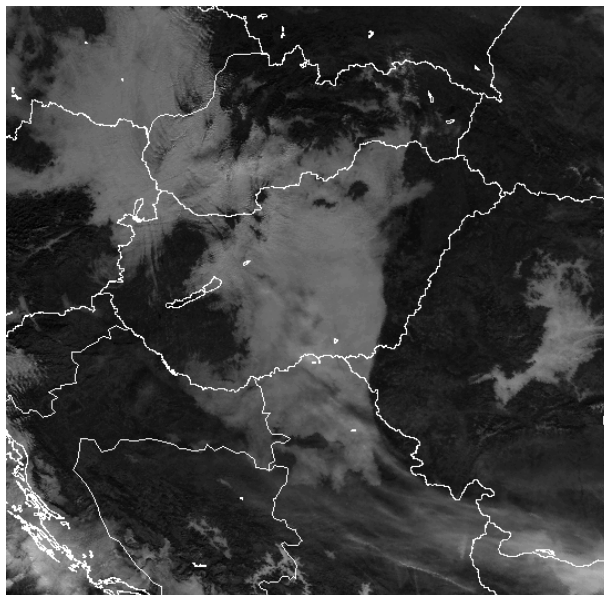
Léteznek feltételek a felhők árnyékával fedett pixelek meghatározására is (pl. $\rho_2 < 2,2\%$), de megközelíthető a probléma egy másik oldalról is, melynek alkalmazása ugyanolyan hatásosnak bizonyul. Ezért nappali felhőazonosító eljárásunk utolsó mozzanatként a kapott maszkot egy-egy képponttal eltoljuk fel, le, jobbra és balra, s ezen eltolásoknak az unióját tekintjük a végleges maszknak. Számunkra pusztán az egyesített maszk érdekes, ahol a különböző felhőszűrések eredményezte részmaszkokat különböző számokkal (a 2 hatványaival) tároljuk el binárisan, így a kisméretű fájl bármikor egyszerűen és gyorsan felhasználható lesz.



32. ábra

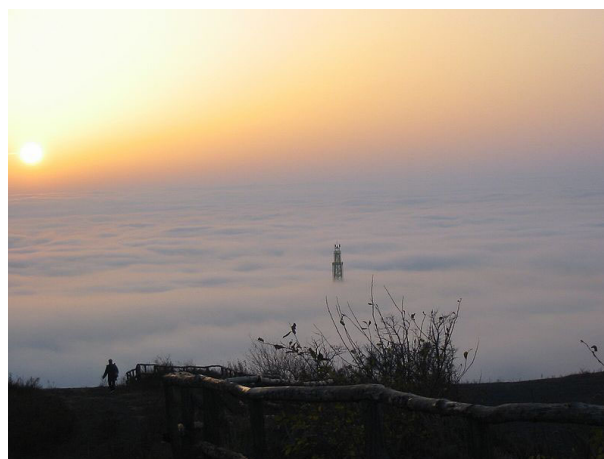
A (21) vízmaszk kritérium (sötétkék) és a (23)-(24)-(25) felhőmaszk feltételrendszer eredménye (rendre piros, sötétpiros és barna színezéssel) / NOAA-17, 2003.07.22 09:31/

Számos, különböző évszakbeli nappali áthaladásra lefuttattuk a felhősűrű programunkat, és az esetek többségében kielégítően adta vissza a felhőmaszkot. Kivételként említhető a NOAA-17 műhold 2003. november 22-ei 09:50-es áthaladása (a 34. ábrán látható a 2-es csatornából származtatott reflektanciakép). Az akkori szinoptikus helyzetet alapján a Közép-Európa felett uralkodó anticiklon és a gyenge légáramlás hatására a Kárpát-medencében inverzió alakult ki, mely két napon át a Medence középső részében megült ködöt eredményezett. A köd magassága 600-700 méter alatti volt mindkét nap, ugyanis hazánk magasabb hegycsúcsai a sztrátusz felhőzet teteje fölé emelkedtek. Ez egyrészt kivehető a NOAA-15, -16 és -17 műhold ekkor készített képeiből, másrészt egy Mátrai kirándulás során készült fotók egyértelműen igazolják az aktuális időjárási helyzetet (33. ábra). Az előbbi módszerrel ezekre az áthaladásokra valótlán felhőazonosításhoz jutunk, amit a 35. ábrán mutatunk be. Az eredeti talaj a képen középkek színű. Elvileg sötétkek csak a nyílt vízfelszín lehetne, ennek ellenére a sztrátusz felhőzet majdnem teljesen ebbe a kategóriába esett. Ennek oka az, hogy reflektanciája nem érte el a 15%-ot és hogy az (24) feltétel kritériumai alól is kiesett. Utóbbi a két küszöbérték módosításával lehet javítani, s így alkalmazni a 0,7 és 0,95 alsó és felső határfeltételt. Ezzel már az eddigiekben még nem azonosított (a képen fehér színezésű) felhőket is detektálni lehet (36. ábra).



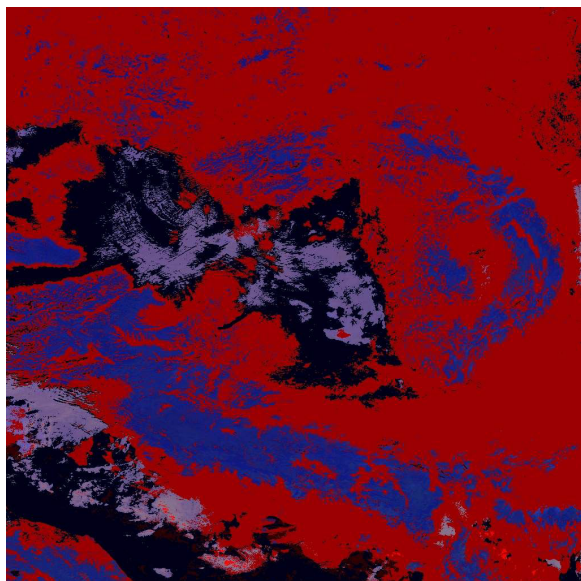
34. ábra

A NOAA-17 műhold 2003. november 22-ei 09:50-es áthaladásakor a 2-es csatorna által mért sugárzási értékekből átszámított reflektanciakép



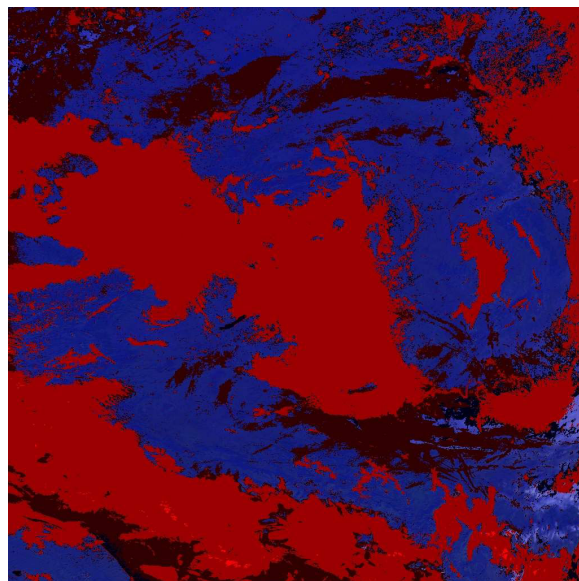
33. ábra

Kilátás a Mátrából nyugatra 2003. november 22-én, délután (háttérben a Sástói kilátó)



35. ábra

Téves felhőszűrés eredménye a NOAA-17 műhold 2003. november 22-ei 09:50-es áthaladására (Kék és fehér: az eredeti kép RGB színezéssel; sötétkék: vízmaszk; piros, sötétpiros és barna: rendre a (23)-(24)-(25) feltételrendszer eredménye)



36. ábra

A módosított küszöbökkel elvégzett felhőazonosítás eredménye a NOAA-17 műhold 2003. november 22-ei 09:50-es áthaladására (Kék és fehér: az eredeti kép RGB színezéssel; sötétkék: vízmaszk; piros, sötétpiros és barna: rendre a (23)-(24)-(25) feltételrendszer eredménye)

5.2.1.1.2. Felhőszűrő kritériumok éjszakai képekre

Alacsony szintű vízfelhők éjszakai azonosítására használhatjuk fel a $T_4 - T_{3B}$ hőmérsékletkülönbséget. Ennek a módszernek a hatékonysága azon alapszik, hogy a vízfelhők emisszivitása alacsonyabb a $3,7 \mu\text{m}$ -ű 3B csatornánál, mint a $11 \mu\text{m}$ -ű 4-es csatorna esetén (Hunt, 1973). Így a hőmérsékletkülönbség nagy a kis cseppméretű felhők esetén, míg az óceáni vagy kontinentális felszínre (kivéve Afrika sivatagos területeit) közel nulla. Küszöbértéknek nem a nullát kell választanunk, hanem a 3B csatorna $1,5$ Kelvines alapzaját:

$$T_4 - T_{3B} > 1,5 K \quad (26)$$

A $T_{3B} - T_5$ hőmérsékletkülönbséggel éjszaka érzékeltetni lehet a féligáteresztő jégkristályokból álló felhőket és a képpontoknál kisebb méretű hideg felhőket, ugyanis ezek a felhők a sugárzás 3B csatornának megfelelő hullámhosszú összetevőit jobban átengedik, mint az 5-ös csatorna által érzékelhető nagyobb hullámhosszú részeit. A különbség így nagyobb

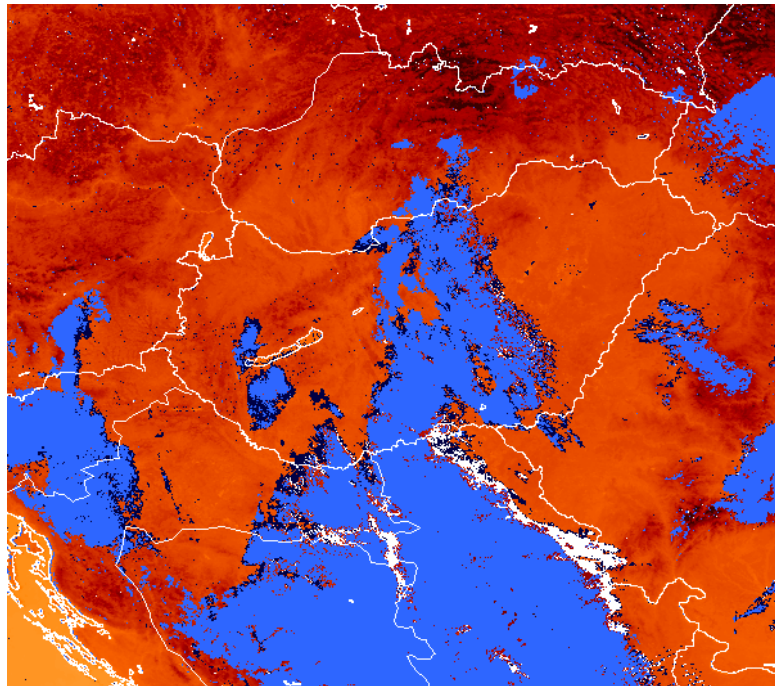
válí, mint amekkora az szárazföldfelszíni vagy óceáni felszín esetén lenne. A rávonatkozó határfeltétel a következő:

$$T_{3B} - T_5 > 3 K \quad (27)$$

Ezen túl alkalmazni lehet az éjszakai képekre is a korábbiakban bemutatott (25) cirrusz-szűrő feltételt, mely szintén a hőmérsékleti értékeken alapszik.

A 37. ábrán láthatjuk a (25)-(26)-(27) feltételrendszer eredményét a NOAA-17 műhold 2004. március 5-ei 20:17-es áthaladására. Az ábra a 4-es csatornából számolt hőmérsékletek (vörös színezéssel) és a felhőszűrés eredményének (mélykék, középkek és fehér színezéssel rendre a (25)-(26)-(27) feltételekre) kompozit-térképe.

Természetesen léteznek további kritériumok az éjszakai felhőszűréshez, de ezek általában olyan további információt igényelnek az összehasonlításokhoz, amelyek nem állnak rendelkezésünkre állandóan. Ilyen lehet egy előrejelző modellnek az eredménye, például a 700 hPa-os szint hőmérsékleti mezejére (Putsay et al., 2001).



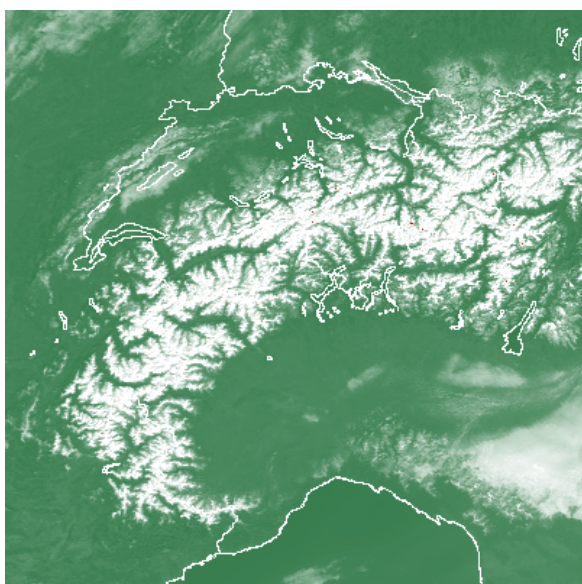
37. ábra

Éjszakai felhőszűrés eredménye a NOAA-17 műhold 2004. március 5-ei 20:17-es áthaladására. A (25)-(26)-(27) feltételek eredményei rendre mélykék, középkek és fehér színezéssel.

5.2.2. Hó és jég fedte területek azonosítása

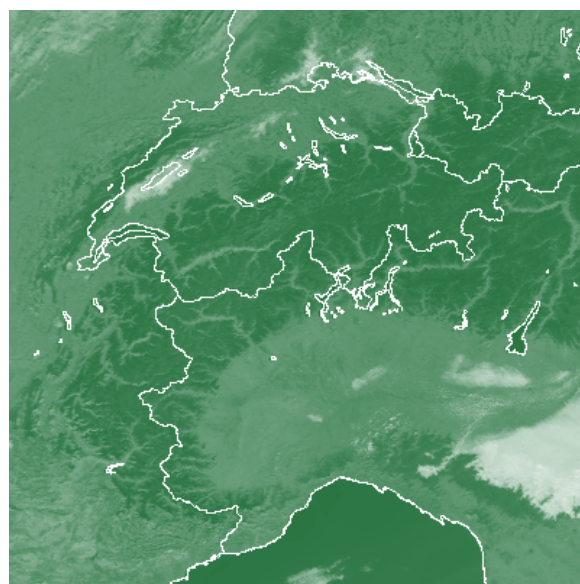
Kérdéses még a hóval és jéggel fedett képpontok azonosításának kivitelezése illetve az, hogy erre van-e egyáltalán szükség. Hiszen a felhőazonosítás kritériumai a hóval borított területek nagy részét is felismerik, és felhőnek azonosítják a látható csatornában mért viszonylag magas reflektancia alapján. Ha szükségünk van a száraz földfelszín teljes egészére hótakarótól függetlenül, vagy szükségünk van csak a felhőzetre annak osztályozása céljából, akkor egy újabb nehéz feladattal állunk szemben, melynek nem létezik olyan kielégítően jó megoldása, mely minden esetben működne. A hóval borított területek nappali azonosítása céljából szerelték fel az AVHRR/3-t egy újabb, ún. 3A csatornával ($1,6 \mu\text{m}$), mely már nemcsak a visszavert sugárzást méri. A hóazonosítás problémáját először a NOAA-17 műhold 2004. március 15-ei 10:05-ös áthaladása segítségével mutatjuk be. Ezen a napon az Alpok felett az ég egy-két magasszintű felhőfoszlánytól eltekintve derült volt, ezért vizsgálatainkhoz elsőként az Alpok nyugati részét használtuk fel.

A hó- és jégfelszínek reflektanciája erősen függ attól a hullámhossztartománytól, melyben a mérést végezzük. Az 1-es, látható csatorna esetén a hótakaró még nagy mértékben visszaveri a napsugárzást (38. ábra), míg a 3-as csatornával mért reflektancia-értékei ugyanazokra a képpontokra már jóval alacsonyabbak (39. ábra), hiszen ez a csatorna már a közeli infravörös tartományba esik, s a visszavert napsugárzáson kívül más sugárzást is mér.



38. ábra

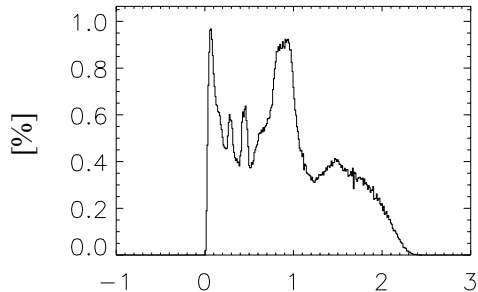
Nyugati-Alpokot ábrázoló részlet a NOAA-17 műhold 2004. március 15-ei áthaladásából,
1-es csatorna ($0,58-0,68 \mu\text{m}$)
/ NOAA-17, 2004.03.15 10:05/



39. ábra

Nyugati-Alpokot ábrázoló részlet a NOAA-17 műhold 2004. március 15-ei áthaladásából,
3A csatorna ($1,58-1,64 \mu\text{m}$)
/ NOAA-17, 2004.03.15 10:05

Ezzel szemben az erdők, a művelt területek és a csupasz talaj reflektanciájának kisebb a változékonysága a csatornák között (Vikhamar és Solberg, 2003), így a 3A csatorna jól használható a hóval borított és a hómentes területek megkülönböztetésére. A felhők spektrális tulajdonságait még kevésbé vizsgálták meg ebben a csatornában, de úgy tűnik, a cirrusz felhőket kivéve jól elkülöníthetők a hóval borított területektől (Hyvarinen et al., 1999). A hóazonosítás alapja a 3A és 1-es csatorna hányadosa (Eastwood és Thyness, 2003), melynek hisztogramját mutatja be a 40. ábra az előző áthaladás adott részletére. A 0,1 körüli első csúcs a hóval borított magas hegycsúcsokhoz, a 0,3-nál lévő második csúcs pedig a tengervízhez és a



40. ábra

A 3A és az 1-es csatorna hányadosának hisztogramja
/ NOAA-17, 2004.03.15 10:05/

hóval borított erdős területekhez tartozik. A harmadik csúcs 0,5 körül a magasszintű felhőzetnek, a negyedik csúcs 0,85-nél az egyéb felhőzetnek, míg a maradék képpontok a hótakaró nélküli talajnak felelnek meg. A vizsgálatok alapján a legtöbb esetben megközelítőleg ezek az értékek szerepelnek, így felírhatjuk a hóazonosításra vonatkozó első feltételt:

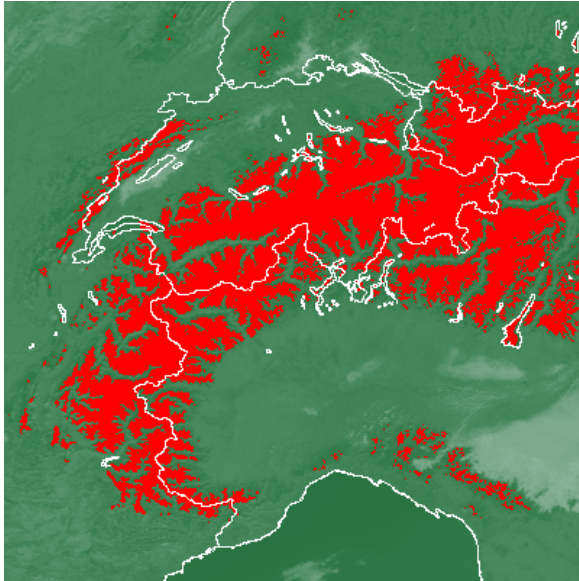
$$\rho_{3A} / \rho_1 < 0,3 \quad (28)$$

A felhőzettől való jobb elkülönítés céljából további szűkítő feltételt tehetünk, mely azon alapszik, hogy a felhőzet még a 3A csatornával érzékelve is magas reflektanciát mutat, míg a hófelszín 15 % alattit, azaz:

$$\rho_{3A} < 15\% \quad (29)$$

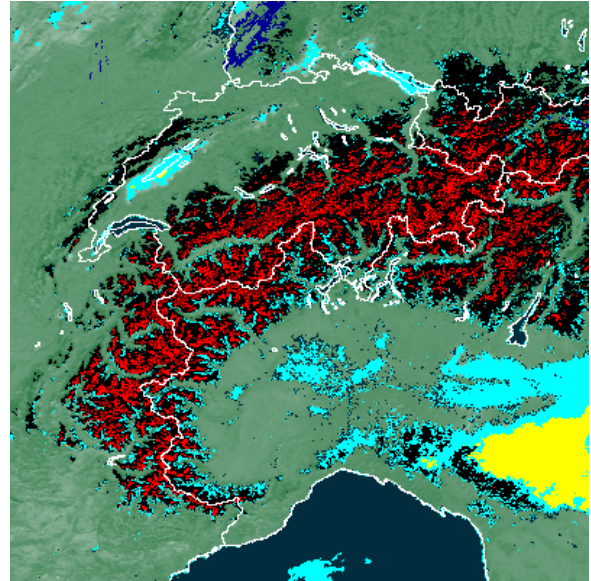
A 40. ábra alapján is kitűnik, hogy a havas képpontok két alapvető típusát különböztetjük meg. Az egyik azon nyitott területeknek felel meg, ahol a hótakaró összefüggő (pl. hegyek), míg a másik a hóval fedett erdős, bozotos területeknek. Jelentős különbség az 1-es csatorna mérései alapján jelentkezik, ahol a nyílt területekhez kb. 70 %, míg az erdős-havas területekhez kb. 30 % reflektancia tartozik. A 41. ábrán látható a (28) és (29) feltétel egyidejű alkalmazásának eredménye a fent bemutatott képre, azaz a pirossal jelölt képpontok feleltethetőek meg havas területeknek. Az előbb említett két hótípust a reflektancia-értékek alapján megkülönböztethetve és a korábban vázolt felhőszűrő kritériumokat alkalmazva kapjuk a 42. ábrát. A hegycsúcsokon lévő havat pirossal, a vegetációval borított területeket

fedőt havat feketével jelöltük, közöttük pedig átmenetes színezést alkalmaztunk. A sárga szín képviseli a magas reflektanciájú felhőkre vonatkozó (23) feltételt, a világoskék az (24) feltételt és a középkek szín a cirruszokra vonatkozó (25) feltételt. Továbbá mélykék színezéssel láttuk el a szabad vízfelszíneket (például Genovai-öböl a kép alján) a (21) feltétel alapján. Erre a lépésre azért volt szükség, mert ezen területek gyakran esnek a hóazonosítás kritériuma alá (pl. a 41. ábrán a Garda-tó).



41. ábra

A (28) és (29) hóazonosító feltétel eredménye (piros színezéssel) a 3A csatornával mért képen (a zöld árnyalataival)
/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31/



42. ábra

A (28) és (29) hóazonosító feltétel (piros és fekete színezéssel), a (23)-(24)-(25) felhőszűrő feltételrendszer (rendre sárga, világoskék és középkek színezéssel) és a (21) vízazonosító feltétel (mélykék) eredménye a 3A csatornával mért képen (a zöld árnyalataival)
/ NOAA-17, 2003.07.22 09:31

Ezt a kritérium-rendszert Magyarország térségére is megvizsgáltuk, és megállapítottuk, hogy ugyanúgy használható a Kárpát-medencére is.

Ennek a csatornának (3A) a segítségével havat azonosítani csak nappal lehet. (Kivéve a NOAA-16 műholdat, melyen meghibásodás miatt 2003 májusa óta állandóan csak az éjszakai időtartamra tervezett 3B csatorna működik, a nappali 3A egyáltalán nem.) Az éjszakai hóazonosításhoz más csatornákat, és más módszert kell alkalmazni, melyek az AVHRR/3 műszer esetén még kevésbé kiforrottak, ezért ezt nem részletezzük

5.2.3. Felhasználhatóság

Ha egy terület vegetációs-ciklusát megfelelő finomságú, s időbeli felbontású műhold képsorral kívánjuk reprezentálni, ahhoz legalább heti egy olyan teljesen felhőmentes áthaladás szükséges, amikor a műhold megközelítőleg a terület felett (maximum $\pm 15^\circ$ -os látószögbeli eltéréssel) haladt át (Gallo és Flesch, 1989). Ilyen áthaladási feltételek esetén azonban a maradék áthaladások száma annyira csekély lehet, hogy jelentősen megnehezítheti a vegetációs indexek és sajátosságaik meghatározását, mint például a különböző növények vegetációs-ciklusának kezdetét, a szárazságok és az aratások időpontját, tartamát, ezeken keresztül pedig az elmúlt évek meneteivel történő összehasonlítást. Egy német vizsgálat alapján egy évben alig marad 10 felhőmentes áthaladás a megfigyelt $15 \text{ km} \times 15 \text{ km}$ kiterjedésű Észak-Németországi terület felett (Koslowsky, 1996), de még ezekben az esetekben sem teljesen biztos, hogy nem voltak akkor a terület felett felismerhetetlenül apró gomolyfelhők, vagy keskeny kondenzcsíkok. Ezen probléma enyhítésére több (7-10) egymást követő nap áthaladásaiból készítenek ún. maximum vegetációs (kompozit-) képeket (a NOAA által készített képek térítésmentesen letölthetőek az Internetről: pl.: daac.gsfc.nasa.gov), ahol minden képponthez az adott időszak alatt érzékelt maximális vegetációs indexet rendelik. Ekkora időtartam alatt nagy valószínűséggel minden pixelhez akad legalább egy olyan áthaladás, amikor a képpont felhőmentesnek titulálható, s így elvileg a vegetációnak a maximális NDVI értéket mutató állapota kerül a kompozit-képre. Egyes földrajzi helyeken Európában, pl. Belmonte térsége Spanyolországban (Koslowsky, 1996) még így is akad olyan több hetes időszak, amikor nem lehet egyetlen egy biztosan felhőmentes áthaladást sem találni. A maximum NDVI értékekből készített kompozit-képeket nagy óvatossággal szabad csak felhasználni, ugyanis figyelembe kell venni, hogy a mérés geometriája jelentősen kihat az NDVI értékére: egy részben felhős pixel kedvezőtlen geometriájú megfigyeléskor, azaz nagy műholdzenitszög esetén (ld.: α_i a 6. ábrán), akár magasabb NDVI értékkel is rendelkezhet, mint egy kedvező geometriájú, gyakorlatilag a nadírban megfigyelt, és biztosan felhőmentes képpont (Koslowsky, 1996). Így előfordulhat olyan, hogy egy maximum NDVI kompozit-képen nemcsak a vegetációra vonatkozó pozitív NDVI értékeket találunk.

A megjelenésében nagy változékonyságot és eltérő spektrális tulajdonságot mutató felhőzet zavaró hatása miatt tehát érdemes vagy felhőmentes képeket kiválasztani elemzésre, vagy olyan kompozit-képeket készíteni, amelyekben több napra vonatkozó valamilyen reprezentatív érték áll. Ilyen a korábbiakban említett 7-10 napos maximum-NDVI kép,

mellyel a vegetációra vonatkozó vizsgálatok eredményesen elvégezhetők. Az általunk bemutatott és kidolgozott felhőszűrés az esetek többségében jól használható, de figyelembe kell venni a probléma nehézségeit és korlátait.

Összefoglalás, a továbblépés lehetősége

A dolgozat céljával tűztük ki, hogy a nyers műholdképek előfeldolgozását elvégezzük úgy, hogy a munkafolyamatok egy működő, egymáson alapuló rendszert alkossanak. Ezeket a szükséges lépéseket kidolgoztuk, s elkészítettük azon programokat, melyek segítségével a NOAA KLM műholdsorozat bármelyik AVHRR/3 műszerének méréseit fel lehet dolgozni. Ez az előfeldolgozás a fájlok megfelelő formátumúvá történő konvertálását, az adatok földrajzi azonosítását, a kalibrációt és a felhőazonosítást tartalmazza. A kitűzött cél végrehajtása közben olyan nem várt problémák is felmerültek, mint például a vételi zajból származó különböző hibák kezelése. Ez megnehezítette a feldolgozást, hisz ezen hibaforrásokra külön eljárásokat kellett kidolgozni, melyek univerzálisan működnek minden esetben. Ezáltal a felhasználó valóban a konkrét tudományos feladatára koncentrálhat, de bármikor információt kaphat az eddig már elvégzett munkafázisokról.

Az idei év (2004) októberére tervezi a NASA és a NOAA közösen a következő kvázipoláris NOAA műhold (NOAA-18) pályára állítását, mely várhatóan 2005 tavaszáig leváltja a NOAA-16 műholdat, s operatívvá válik. Az általunk írt programok alkalmasak lesznek az újabb AVHRR/3 műszer adatainak feldolgozására is, amint az első 3-4 hónapnyi próbaidő alatt a NOAA mérésekkel meghatározza a műszer kalibrációjához szükséges konstansokat. A programok igény szerint módosíthatók, amire például a földrajzi azonosításhoz használt TBUS táviratok várható változása miatt is szükség lesz.

Az eddig elvégzett feldolgozó lépésekkel a vizuális megfigyeléseken túl egyes mennyiségek számolhatóvá váltak. Ilyen például az NDVI, mely a megfigyelés geometriai helyzetére kevésbé érzékeny. Azonban a precíz munkához szükség van további lépésekre is. Ezek között említhető azon függvények (BRDF) használatának a bevezetése, mely ezt a változó megfigyelési helyzetből eredő irányfüggőséget lekezeli. További fontos lépés a légköri korrekció elvégzése, mely egyéb információk (pl. modelleredmények) segítségével figyelembe veszi a légköri aeroszolok sugárzasmódosító hatását. Ez a hatás a tényleges felszíni reflektancia-értékeket (vagyis a látható csatornák méréseit) módosítja, mire a felszín által visszavert napsugárzás a légkör tetejét és a műszer érzékelőjét eléri. A termális csatornák kalibrált hőmérsékleti értékeinek bizonyos kombinációjából meghatározható a száraz földfelszín hőmérséklete, ha ismerjük a felszín emisszivitási tényezőjét. Utóbbit helyettesíthetjük évszakonkénti konstans értékekkel, de időbeli folyamatos változásának modellezése minden bizonnyal pontosabb eredményre vezet. Ezeket a lehetőségeket külön

meg kell vizsgálni. (Megjegyezzük, hogy ezeket a további lépéseket – BRDF, légköri korrekció, felszíni hőmérsékletszámítás, stb. – a nagy műholdas múltú kutatóközpontok több éves kitartó munka árán próbálják megoldani.)

A fent ismertetett elvégzett és tervezett munka mind egy azon műszerre, az AVHRR/3-ra vonatkozik. A NOAA műholdak fedélzetén azonban további berendezések is végeznek állandó méréseket (ld. 2. táblázat), melyek adatai számunkra a vevőantenna (43. ábra) által vett HRPT-fájlokban szintén elérhetők. Igény esetén távoli munkacélként érdemes lenne ezeket a műszereket is megismerni, s az általuk mért adatokat feldolgozni. Ezáltal további kutatási perspektívák nyílhatnak meg a Tanszék oktatói és hallgatói előtt.



43. ábra

Az ELTE TTK HRPT vevőállomása az egyetem lágymányosi épületegyüttesének északi tömbje tetején

Köszönetnyilvánítás

Köszönöm témavezetőmnek, dr. Bartholy Juditnak a kitartó és támogató témavezetését, illetve a lelkes szakmai segítségét.

Köszönettel tartozom dr. Pongrácz Ritának segítőkész közreműködéséért, hogy kérdéseimmel bármikor fordulhattam hozzá.

Köszönöm Családomnak támogatását és végtelennyi türelmét.

Hálával tartozom dr. Barcza Zoltánnak a technikai és szakmai segítségéért, illetve lelki támogatásáért és folyamatos buzdításáért, melyek alapvetően hozzájárultak a dolgozat létrejöttéhez.

Köszönöm Borbás Évának, Horváth Ákosnak, Molnár Gábornak és Gróbné Szenyán Ildikónak, hogy szakmai kérdéseimre mindig a legjobb tudásuknak megfelelően próbáltak válaszolni.

Továbbá köszönöm Borbás Évának és Kovács Mihálynak a pár elérhetetlen, de alapvető külföldi cikk megszerzését.

Köszönetem fejezem ki Dirk Koslowskynak, Heiner Billingnek és Dorothea Praetoriusnak, a berlini Freie Universität Meteorológiai Tanszék Műholdmeteorológiai Kutatócsoport pár tagjának, amiért több évtizedes műholdas tapasztalataik egy részét megosztották velem a 2001-2002-es berlini tartózkodásom alatt, továbbá a szakmai segítségükért, melyet az elmúlt egy évben nyújtottak.

Végül, de nem utolsó sorban hálával tartozom dr. Mészáros Róbertnek, amiért ez a diplomamunka elkészülhetett.

Irodalomjegyzék

- Becker, F., Li, Z. L., 1990a. Towards a local split window method over land surface. *Int. J. Remote Sens.*, 3, 369-393.
- Brouwer, D. 1959. Solution of the Problem of Artificial Satellite Theory Without Drag. *Astronomical Journey*, 64, 378-397.
- Cihlar, J., Manak, D., Voisin, N., 1994. AVHRR bidirectional reflectance effects and composite, *Remote Sens. Environ.*, 48, 77-88.
- Cracknell, A. P., 2001. The exciting and totally unanticipated success of the AVHRR in applications for which it was never intended. *Adv. Space Res.*, 28, 233-240.
- Derrien, M., Farki, B., Harang, L., LeGléau, H., Noyalet, A., Pochic, D., Sairouni, A., 1993. Automatic cloud detection applied to NOAA-11/AVHRR imagery. *Remote Sensing of Environment*, 46, 246-267.
- Eastwood, S., Thyness, V. W., 2003. Snow cover using 1,6 μm AVHRR channel 3A. The 2003 EUMETSAT Meteorological Satellite Conference.
http://www.eumetsat.de/en/area2/proceedings/eump39/docs/5_22_eastwooda.pdf
- Ebert, E., 1987. A pattern recognition technique for distinguishing surface and cloud types in the polar regions. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 26, 1412-1427.
- Eyre, J. R., 1991. Inversion methods for satellite sounding data. (ECMWF)
http://www.ecmwf.int/newsevents/training/rcourse_notes/DATA_ASSIMILATION/
- Gallo, K. P., Flesch, T. K., 1989: Large area crop monitoring with the NOAA AVHRR: Estimating the silking stage of corn development. *Remote Sens. Environ.*, 27, 73-80.
- Garand, L., Weinman, J. A., 1986. A structural stochastic model for the analysis and synthesis of cloud images. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 25, 1052-1068.
- Goodrum, G., Kidwell, K.B., Winston, W. (Eds), 2004. NOAA-KLM User's Guide. National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service. <http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm/>
- Gutman, G., 1991. Vegetation indices from AVHRR: An update and future prospects. *Rem. Sens. Environ.*, 35, 121-136.
- Heidinger, A. K., Cao, C., Sullivan, J. T., 2002. Using Moderate Resolution Imaging Spectrometer (MODIS) to calibrate advanced very high resolution radiometer reflectance channels. *J. Geophys. Res.*, 107(D23), 4702.

- Holben, B., Kimes, D. S., Fraser, R. S., 1986. Directional reflectance response in AVHRR red and near-IR bands for the three cover types and varying atmospheric conditions, *Remote Sens. Environ.*, 19, 213-236.
- Hu, B., Lucht, W., Strahler, A. H., Schaaf, C. B., Smith, M., 2000. Surface albedos and angle-corrected NDVI from AVHRR observations of South America. *Remote Sensing of Environment*, 71, 119-132.
- Hunt, G. E., 1973. Radiative Properties of terrestrial clouds at visible and infra-red thermal window wavelengths. *Quart. J. Roy. Meteorol. Soc.*, 99, 346-369.
- Hyvärinen, O., 1999. Investigations of NOAA AVHRR/3 1.6 micron imagery for snow, cloud and sunglint discrimination. <http://produkter.smhi.se/saf/>
- Kerényi, J., Putsay, M., 2000. Investigation of land surface temperature algorithms using NOAA AVHRR images. *Adv. Space Res.*, 26,1077-1080
- Kimes, D. S., Holben, B. N., Tucker, C. J., Newcomb, W. W., 1984. Optimal directional view angles for remote-sensing missions. *Int. J. Remote Sens.*, 5, 887-908.
- Kimes, D. S., Sellers, P. J., 1985. Inferring hemispherical reflectance of the earth's surface for global energy budgets from remotely sensed nadir or directional radiance values. *Rem. Sens. Environ.*, 18, 205-233.
- Koslowsky, D., 1996. Mehrjährige validierte und homogenisierte Reihen des Reflexionsgrades und des Vegetationsindex von Landoberflächen aus täglichen AVHRR-Daten hoher Auflösung. *Meteorologische Abhandlungen. Frei Universität Berlin, Institut für Meteorologie. Band 9, Heft 1, 237 S.*
- Koslowsky, D., 1997a. Signal Degradation of the AVHRR shortwave channels of NOAA 11 and NOAA 14 by daily monitoring of desert targets. *Adv. Space Res. Vol. 19, No. 9, pp. 1355-1358.*
- Koslowsky, D., 1997b. A cloud screening algorithm for daytime AVHRR data using dynamic thresholds. *Adv. Space Res. Vol. 19, No. 3, 533-536*
- Koslowsky, D., Billing, H., Eckardt, M. 2001. Sensor degradation and intercalibration of the shortwave channels of the AVHRR - NOAA 11/14/16 satellites. *Proc. of "The 2001 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference", Antalya,Turkey, 1-5 October 2001.*
- Kovács, L., Szenyán, I. 1996. Development of AVHRR Image Registration in Hungary. *Advanced Space Res.*, 17/1, 123-126.

- Köpken, C., Thépaut, J. N., Kelly, G., McNally, A., 2001. Satellite data assimilation for numerical weather prediction. The 2001 EUMETSAT Meteorological Satellite Data Users' Conference. http://www.eumetsat.de/en/area2/proceedings/eump33/pdf/session_6/verbal/koepken1.pdf
- Kriebel, K. T., 1978. Measured spectral bidirectional reflection properties of four vegetated surfaces. *Appl. Opt.*, 17, 253-259.
- Labrot, T., Lavanant, L., Whyte, K., 2003. AAPP Documentation Scientific Description, Version 4.1. Satellite Application Facility for Numerical Weather Prediction.
- Lyddane, R. H. 1963. Small Eccentricities or Inclinations in the Brouwer Theory of the Artificial Satellite. *Astronomical Journey*, 68, 555-558.
- Middleton, E. M., 1991. Solar zenith angle effects on vegetation indices in tallgrass prairie. *Rem. Sens. Environ.*, 38, 45-62.
- Mitchell, R. M., O'Brien, D. M., Forgan, B. W., 1996. Calibration of the NOAA AVHRR shortwave channels: II. Application to NOAA 11 during early 1991. *Rem. Sens. Environ.* 55, 139-152.
- Mitchell, R. M., O'Brien, D. M., Edwards, M., Elsum, C. C., Graetz, R. D. 1997. Selection and initial characterization of a bright calibration site in the Strzelecki Desert, South Australia, *Canadian J. Remote Sens.*, 23, 342-353.
- National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service (NOAA NESDIS), National Aeronautics and Space Administration, Goddard Space Flight Center (NASA GSFC), 2002. NOAA-M.40 p. http://goes2.gsfc.nasa.gov/spacecraft/noaa_mbooklet/NOAA-M.pdf
- NOAA Satellite Information System, 2004. Updated Calibration Coefficients for NOAA-16 AVHRR. <http://noasis.noaa.gov/NOAASIS/ml/n16calup.html>
- Péczy, Gy., 1979. *Éghajlattan*. Nemzeti Tankönyvkiadó, Budapest. 336 o.
- Phulpin, T., Derrien, M., Brard, A., 1983. A two-dimensional histogram procedure to analyse cloud cover from NOAA satellite high resolution imagery. *J. Clim. Appl. Meteorol.*, 22, 1332-1345.
- Potter, C., Pang-Ning, T., Steinbach, M., Klooster, S., Kumar, V., Myneni, R., Genovese, V., 2003. Major disturbance events in terrestrial ecosystems detected using global satellite data sets. *Global Change Biology*, 9, 1005-1021.
- Putsay, M., Kerényi, J., Szenyán, I., Sebők, I., Németh, P., Diószeghy, M., 2001. Nighttime fog and low cloud detection in NOAA-16 AVHRR images and validation with ground

- observed synop data and radar measurements. http://www.eumetsat.de/en/area2/proceedings/eump33/pdf/session_3/poster/Putsay.pdf
- Rao, C. R. N., 1987. Pre-launch calibration of channels 1 and 2 of the Advanced Very High Resolution Radiometer, NOAA Technical Report NESDIS 36, Department of Commerce, Washington, D.C.
- Rao, C. R. N., Chen, J., 1995. Inter-satellite calibration linkages for the visible and near-infrared channels of the Advanced Very High Resolution Radiometer on NOAA-7, -9, and -11 spacecraft, *International Journal of Remote Sensing*, 16, 1931-1942.
- Rao, C. R. N., Chen, J., Zhang, N., Sullivan, J. T., Walton, C. C., Weinreb, M. P., 1996. Calibration of meteorological satellite sensors. *Adv. Space Res.*, Vol. 17, No. 1, 11-20.
- Rao, C. R. N., Chen, J., Sullivan, J. T., Zhang, N., 1999. Post launch calibration of meteorological satellite sensors. *Adv. Space Res.*, Vol. 23, No. 8, 1357-1365.
- Saunders, R., W., Kriebel, K. T., 1988a. An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 9, No. 1, 123-150.
- Saunders, R., W., Kriebel, K. T., 1988b. Errata (re: An improved method for detecting clear sky and cloudy radiances from AVHRR data.) *International Journal of Remote Sensing*. Vol. 9, 1393-1394.
- Sobrino, J. A., Caselles, V., Coll, C., 1993. Theoretical split-window algorithms for determining the actual surface temperature, *Il Nuovo Cimento*, 16(3), 219-236.
- Stowe, L. L., McClain, E. P., Carey, R., et al., 1991. Global distribution of cloud cover derived from NOAA / AVHRR operational satellite data, *Adv. Space Res.*, 11, 51-54.
- Tánczer, T., 1988. *Műholdmeteorológia*. Akadémiai Kiadó, Budapest. 272 o.
- Thépaut, J. N., 2004. Satellite data assimilation in numerical weather prediction: an overview. http://www.ecmwf.int/newsevents/training/meteorological_presentations/MET_DA.htm
- Ulivieri, C., Castronovo, M. M., Francioni, R., és Cordillo, A., 1992. A split-window algorithm for estimating land surface temperature from satellites. In COSPAR, 27 Aug.-5 Sep., Washington, DC.
- Vikhamar, D., Solberg, R., 2003. Subpixel mapping of snow cover in forests by optical remote sensing. *Remote Sensing of Environment*, 84, 69-82.
- Wu, A., Li, Z., Cihlar, J., 1995. Effects of land cover type and greenness on advanced very high resolution radiometer bidirectional reflectances: Analysis and removal. *Journal of Geophysical Research*, Vol. 100, No. D5, 9179-9192.