

A Balaton klorofill-a eloszlásának folyamatos monitorozása MODIS adatok alapján

Diplomamunka



Készítette:

Koma Zsófia Viktória

Geofizika MSc, úrkutató és távérzékelő szakirány

Témavezetők:

Dr. Zlinszky András

Tudományos munkatárs

Magyar Tudományos Akadémia, Ökológiai Központ, Balatoni Limnológiai Intézet

Dr. Kern Anikó

Tudományos munkatárs

Eötvös Loránd Tudományegyetem, Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Úrkutató csoport

Stephanie Palmer, PhD

Universiteit Twente, International Institute for Geo-Information Science and Earth Observation (ITC)

2015. május

Heidelberg

Tartalom

1.	Bevezetés.....	3
2.	Vízminőség monitorozás passzív távérzékeléssel	5
2.1.	Elméleti háttér.....	5
2.2.	Vízípusok	6
2.3.	Komplex vizek vízminőség monitorozására fejlesztett algoritmusok	8
2.4.	MODIS műszer lehetőségei a komplex vizek vízminőség monitorozásában.....	10
3.	A Balaton	13
3.1.	A mért <i>in situ</i> klorofill-a adatok.....	13
3.2.	Klorofill-a monitorozás MERIS felvételek alapján	14
4.	MODIS felvételek feldolgozása.....	17
4.1.	MODIS produktumok.....	17
4.1.1.	MOD02 produktum	18
4.1.2.	MOD03 produktum	19
4.1.3.	Légköri produktumok	20
4.2.	Adatbázis felépítése	22
5.	Klorofill-a becslése MODIS adatok alapján.....	24
5.1.	FLH index számítása MODIS adatokra	24
5.2.	FLH index működésének vizsgálata	26
5.3.	Esettanulmányok.....	31
5.4.	Adatrendszer kalibrációja.....	42
6.	Konklúzió	50
7.	Köszönetnyilvánítás.....	53
8.	Irodalomjegyzék	54

1. Bevezetés

Ki nem gyönyörködött már a Balaton vizének színében, és állapította meg, hogy évről-évre és évszokról-évszakra változik? A víz színe összefüggésben áll a víz minőségével. Így például a víz különböző lebegőanyag-tartalmának mennyisége jól tükrözi a tó ökológiai állapotát, mivel nagy mennyiség esetén jellegzetes elszíneződést okoz a vízben. Ez az elszíneződés jól látható műholdfelvételeken is, ezt használja ki a passzív távérzékelés egyik elterjedt alkalmazási területe, a vízminőség távérzékelése.

A vízminőség távérzékelésének célja, hogy a visszavert fény mennyisége és a víz biofizikai tulajdonságai között keressenek összefüggéseket. A vizek műholdas monitorozása először 1978-ban a National Aeronautics and Space Administration (NASA) által felbocsátott Coastal Zone Color Scanner-rel (CZCS) kezdődött meg. Ekkor a mérés a látható tartományra korlátozódott és legfőbb feladata a fitoplankton mennyiségének kimutatására irányult az óceánok legfelső rétegében (IOCCG, 2000). Napjainkra a tudományág kiszélesedett, és tengerpartok és a tavak komplex vízfelületeinek vizsgálatát lehetővé teszik a szélesebb hullámhossz tartományban nagyobb felbontásban mérő műszerek (IOCCG, 2000). Ezenkívül cél lett például az algák egyes fajainak elkülönítése (pl. Palmer et al., 2015a).

A dolgozat a műholdas vízminőség távérzékelésének témakörébe sorolható, a vizsgált terület pedig a Balaton vízfelszíne. A Balaton vízminőségének monitorozása fontos és kiemelt feladat, hogy a Balaton épsége, tisztasága illetve ökoszisztémája védve maradjon, és állapotáról folyamatos, az egész víztestre globálisan kiterjedő információt nyerhessünk a hagyományos kéthetente történő pontszerű mintavételezéssel szemben.

A Balatoni Limnológiai Intézet már a 2000-es években elkezdte az akkor rendelkezésre álló Landsat adatok feldolgozását, ahol a lebegőanyag-tartalommal találtak összefüggéseket (Sváb et al., 2005), viszont a klorofill-a (chl-a) tartalom monitorozása csak speciális, szűkített időtartamokra működött (Sváb, 2008). A projekt később folytatódott az Environmental Satellite (ENVISAT) műholdon lévő Medium Resolution Imaging Spectrometer (MERIS) műszer 2002-2012 közötti, 300 méter felbontású adatainak rendszeres feldolgozásával. A MERIS műszer adatait az *in situ* mérések segítségével sikeresen kalibrálták a Balaton klorofill-a tartalmának monitorozására (Palmer et al., 2015b).

Diplomamunkám célkitűzése a Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) műszer által készített, és az Interneten közzétett adatbázisból ingyen elérhető produktumok felhasználásával a Balaton klorofill-a mennyiségének becslésére alkalmas, a szakirodalomban fellelhető kalibrációs eljárás tesztelése és működésének vizsgálata. Tekintve, hogy az ENVISAT műholddal 2012-ben minden kapcsolat megszűnt és a jövőt képező Sentinel-3 műhold fellövésére várhatóan 2016-ban kerül csak sor, ezért a kutatási célkitűzés megvalósítása megoldást jelenthet a 2012-2016 közötti időszakban kialakult adathiány pótlására, kiegészítésére. A dolgozatnak nem célkitűzése új eljárások fejlesztése, inkább egy robusztus, a mért adatokkal empirikusan összefüggő eljárás alkalmazása a cél, amely a későbbiekben egy valós idejű, Internet alapú Balaton vízminőség monitorozó térképi adatbázis alapja lehet.

A diplomamunka felépítése a következő. Először a vízminőség távérzékelés alapjait foglalom össze, melyben definiálom a víztípusokat és a komplex vizekre sikeresen alkalmazott algoritmusokat, és tárgyalom a MODIS műszer vízminőség távérzékelésében való alkalmazás lehetőségeit. Ezt követi a Balaton rövid vízminőség-jellemzése majd a MODIS produktumok feldolgozásának lépései és az ennek alapján létrehozott adatbázis ismertetése. Ezek után a szakirodalom alapján kiválasztott empirikus algoritmust tesztelek a terepi (*in situ*) adatbázis illetve a MODIS produktumok alapján, majd végül elvégzem az adatok kalibrációját és alkalmazom egy-egy kiválasztott MODIS felvételen.

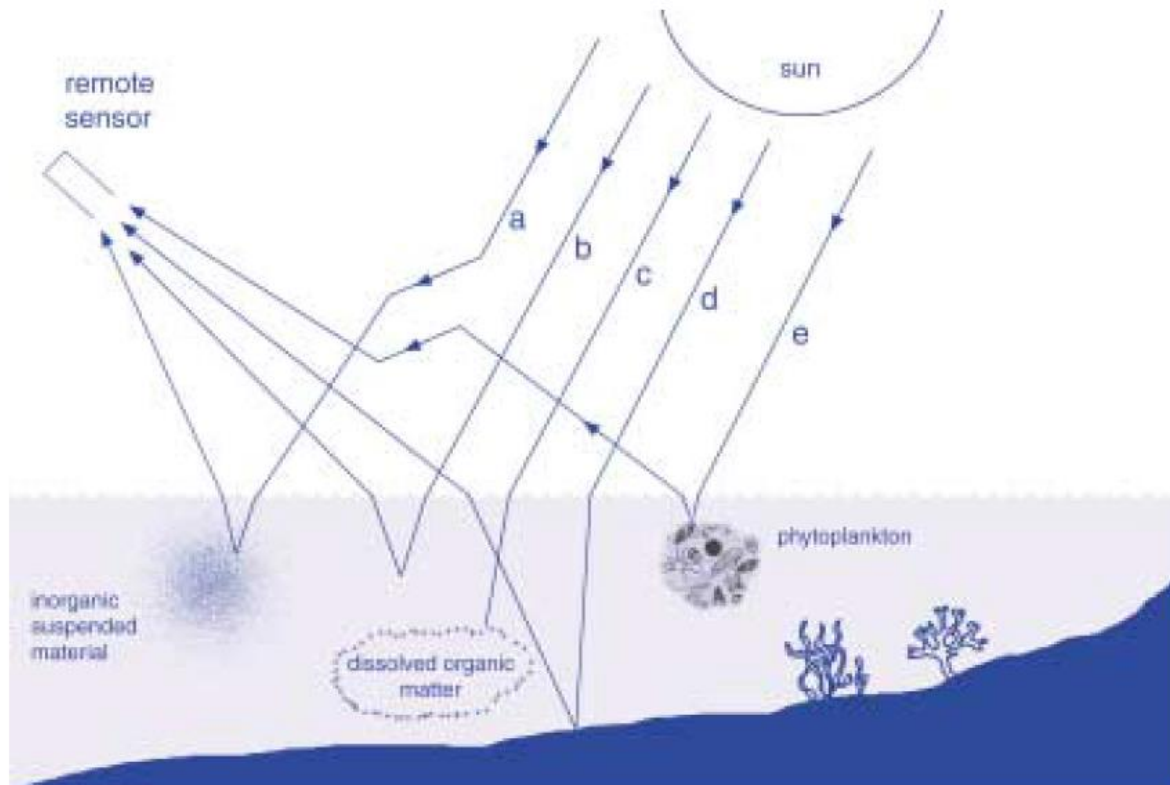
2. Vízminőség monitorozás passzív távérzékeléssel

Ebben a fejezetben szakirodalmi áttekintés során a legfontosabb tudnivalókat tekintem át a dolgozat célkitűzésének szempontjából. Egyrészt röviden definiálom a dolgozathoz elengedhetetlen fizikai fogalmakat és bemutatom a különböző víztípusokat és a víz minőségének jellemzőit, majd ismertetem a klorofill-a monitorozására alkalmazott, a szakirodalomban fellelhető műholdas távérzékelésen alapuló empirikus algoritmusokat. Végül pedig a MODIS szenzor lehetőségeit tárgyalom a témakörben.

2.1. Elméleti háttér

A passzív távérzékelés során az elektrooptikai eszköz detektorának felületére érkező egységnyi felületen áthaladó egységnyi térszög irányából érkező spektrális teljesítménysűrűséget mérik (radiancia (L), mértékegysége: $W/m^2/steradián/mikrométer$). A mérés célja a látható és a közeli infravörös tartományban az adott hullámhosszra vonatkozó reflektancia (ρ) kiszámítása, amely az adott felszín sugárzásvisszaverő képességéről ad információt. A reflektancia értéke a felszín tulajdonságainak függvényében változik, mert a felület tulajdonságainak megfelelően a különböző hullámhosszúságú sugárzást különböző mértékben veri vissza.

Jelen dolgozatban a vizsgált visszaverő felszín a víz. A vízminőség monitorozás szempontjából hasznos mért jel csakis a víztestről visszaverődött sugárzás mennyisége. Ez 80%-ban nem teljesül (Morel, 1980), mivel a légkörön keresztülhaladó fény szóródik, többszörösen szóródik, eléri a vízfelszínt és a visszaverődés után szóródik a levegő aeroszol részecskéin illetve vízmolekuláin, vagy a tó aljzatáról verődik vissza (Sathyendranath, 1986). A víztest sugárzásvisszaverő képességét adott hullámhossztartomány mellett a víz molekuláin, szervesetlen és szerves anyagain, illetve a lebegő élőlényeken elnyelődött vagy visszavert sugárzás együttesen határozzák meg (1. ábra).



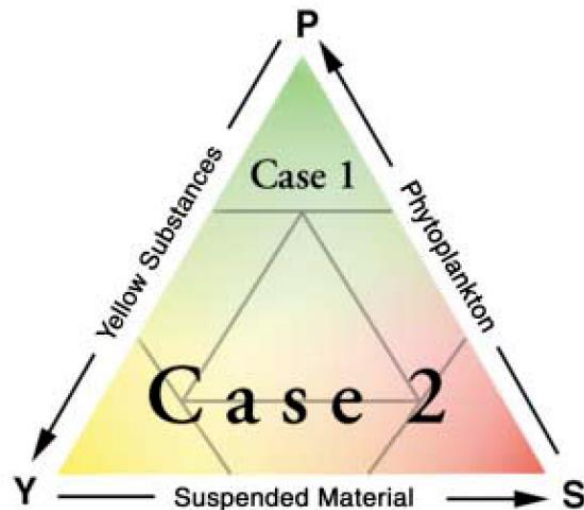
1. ábra A passzív távérzékelés során a napsugárzás áthalad a légkörön majd a vízfelszínen különböző mértékben szóródik, vagy elnyelődik. A víztest fitoplankton, szerves és szervesetlen anyagairól vagy az aljatról visszavert fény mennyisége a különböző hullámhossztartományokban eltérő (IOCCG,2000).

A mért radiancia értékekből direkt úton nem lehet megállapítani, hogy a víz melyik összetevőjének milyen mértékű szóródása vagy abszorpciója okozta az adott változást (IOCCG, 2006). Éppen ezért a vízminőség távérzékelésben laboratóriumi spektrális mérések alapján felállítanak egy ún. Inherent Optical Properties (IOP) modellt, amely alapján a cél az összes csillapító tényező kiszámítása (IOCCG, 2006). Az IOP modellt felhasználva állítják elő az Apparent Optical Properties (AOP) modellt, amely már figyelembe veszi, hogy a radiancia függ a műszertől és nap megvilágítástól is (IOCCG, 2006).

2.2. Víz típusok

A vízminőség távérzékelés során megkülönböztetünk 1. típusú és 2. típusú vizeket (Morel és Prieur, 1977; Gordon és Morel, 1983). Az 1. típusú vizek biofizikai jellemzőit elsősorban a fitoplankton mennyisége befolyásolja (Prieur és Sathyendranath, 1981). Ilyen típusú vizek az óceánok. Ezzel szemben a 2. típusú vizek optikailag komplex vizek, ahol a vízfelszínről visszavert fény mennyiségét a fitoplankton, szerves és szervesetlen anyagok illetve a meder alja is befolyásolhatja egymástól függetlenül (Odermatt et al., 2012). A 2-es típusú vizek közé sorolhatók a partközeli tengerek (pl. Floridai öböl, Balti tenger), illetve a tavak (pl. Balaton)

vagy a folyók. A vizek besorolása háromszög diagram alapján történik, ahol a három csúcs az egyes főbb összetevők, azaz a fitoplankton, szerves anyagok és szervesetlen anyagok százalékos összetétele adja (2. ábra).



2. ábra 1. és 2. típusú vizek besorolása a fitoplankton illetve a szerves és szervesetlen anyagok százalékos megoszlása alapján, amit háromszög diagramon lehet szemléltetni (IOCCG, 2000)

A vízminőség távérzékelés során a biofizikai jellemzők biológiai szempontból összevont egységeket jelentenek. Így például a fitoplankton együtt értendő a zooplanktonnal, heterotróf szervezetekkel, baktériumokkal és vírusokkal, amit laboratóriumi körülmények között szűréssel választanak szét. A feladat megoldása során a legfontosabb a fitoplankton mennyiségének kiszámítása, mivel a fitoplankton a vízi tápláléklánc alapja, elsődleges termelő, mely meghatározza, hogy mennyi és milyen más nem fotoszintetizáló élőlények fordulnak elő a vízben. A fitoplankton mennyiségének meghatározására, azért van lehetőség távérzékelte adatok alapján, mivel a fitoplankton a sugárzást elnyeli, majd másik hullámhossz tartományon kibocsátja (fluoreszcencia), ezzel egy helyi maximumot okozva a reflektancia értékekben a 600-700 nm hullámhossztartományban (víztípustól függően). A folyamat eredményeképpen a víz zöld elszíneződést mutat. Ezt használják ki a különböző mérési csatornákból képzett indexek. Ezenkívül fontos biofizikai paraméterek közé tartozik az ún. lebegőanyag-mennyiség (TSS - Total Suspended Solids), azaz minden olyan szilárd anyag, amely nem oldott fázisban van és lebeg. A víz zavarosságának mértéke (turbiditás), illetve az oldott színes szerves anyag mennyisége (Coloured Dissolved Organic Matter CDOM, mely a nagy molekulájú szerves anyagokat jelenti) szintén elszíneződést okoznak a vízben. Az oldott színes szervesanyag mennyiség általában a nádasokból erednek, de képződhetnek elpusztult algák sejtfalából is és

az UV fény fokozatosan bontja őket (Balogh et al., 2009). Szokás még kiszámítani adott esetben az ún. Secchi mélységet, mely azt adja meg, milyen mélységig látunk le a vízben (Balogh et al., 2003), ami függ a szerves és szervetlen anyagok mennyiségétől. Ritkán a fikocianin mennyiségét is megadják, melyből a kéalgák mennyiségére lehet következtetni (Hunter et al., 2010). A vízminőség jellemzők egyik célja meghatározni az adott víz trofikus jellegét, amely a víz növény eredetű szervesanyag termelő képességét jelenti. A trofikus jelleg a klorofill-a tartalomtól függően az 1. táblázatban foglaltam össze.

1. táblázat Vizek trofikus jellege és a hozzá tartozó éves átlagos klorofill-a mennyisége (Padisák, 2005)

Trofikus jelleg	Chl-a (mg/m ³)
atrófikus	0
ultra-oligotrófikus	<1
oligotrófikus	1-2,5
mezotrófikus	2,5-8
eutrófikus	8-25
hipertrófikus	>25

Amíg a víz ökológiai egyensúlyban van, addig a víz minősége megfelelő, azonban ha beindul az eutrofizáció folyamata, akkor hirtelen nitrogénben, foszforban feldúsul a víz, ami kedvez a fitoplankton elszaporodásának, mely megzavarja a víz tápanyag és oxigén-háztartását és a biológiai változatosság csökkenését okozza. Ezt a folyamatot ki lehet mutatni, a klorofill-a tartalom változásával.

A dolgozat további részében nem foglalkozom az óceáni vizekre fejlesztett rutin-szerűen alkalmazott vízminőség paramétereit előállító algoritmusokkal, mivel a 2. típusú vizek eltérő összetétele miatt ezek az algoritmusok nem adaptálhatók hatékonyan (IOCCG, 2000).

2.3. Komplex vizek vízminőség monitorozására fejlesztett algoritmusok

Az adatok feldolgozása során a víz biofizikai jellemzői és a reflektancia vagy radiancia értékei között keresünk összefüggéseket. Többféle módszer is elképzelhető az összefüggés felállítására, melyet Matthew (2011) összefoglaló cikke alapján ismertetek.

Az első módszer a probléma analitikus megközelítése, ahol a látszólagos reflektancia értékből kiszámításra kerül a valódi reflektancia. A látszólagos reflektanciából légköri korrekciós eljárás során lehet előállítani a valódi felszínre jellemző reflektancia értékeket a sugárzás átviteli

egyenlet (Radiation Transfer, RT) különböző megoldó algoritmusaival (IOCCG, 2006). Ezután az IOP modell alapján ki kell számítani az egyes összetevőknek a szóródás és abszorpciókoefficienseit, majd a valódi reflektancia és az apriori ismeretek alapján felállított modell közötti különbséget kell inverziós eljárás segítségével minimalizálni és az egyes összetevők abszorpció és szóródás koefficienseit megállapítani (Odermatt et al., 2012). A probléma ezzel a módszerrel, hogy nem rutinszerű, illetve nagyon számításigényes, különös tekintettel a légköri korrekciós eljárásokra, amely tavak felett szintén igen bonyolult (IOCCG, 2000). A második módszer a szemi-automatikus, ahol a reflektancia és a szóródás illetve az abszorpció paraméterek között algebrai összefüggést keresünk. Ezt az első két módszert a dolgozatban nem alkalmazzuk, az algoritmusok bonyolultsága és a légköri korrekció szükségessége miatt. A harmadik módszer az empirikus megközelítése a problémának. Ez egy robusztus eljárás, ami a légköri korrekciótól függetlenül is működhet. Alapja, hogy az adott, meghatározni kívánt vízminőség paraméterről rendelkezésünkre áll egy a terepen mért és laboratóriumi körülmények között meghatározott adatsor. Ezt az adatsort fel tudjuk használni arra, hogy közvetlen statisztikai összefüggést keressünk a vízminőség paraméter és a különböző hullámhossztartományokhoz tartozó reflektancia vagy radiancia értékek között. Ez történhet index-képzéssel, vagy pedig egyszerűen egy-egy csatorna és az adott paraméter között találunk összefüggést. Az index képzés a csatornák arányai vagy pedig valamilyen velük végzett művelet alapján történik. A két érték közötti felállított vagy feltételezett összefüggést spektrométerrel mért mérésekkel támasztjuk alá, ahol a mérést a légkör nem módosítja. Az empirikus módszert alkalmazva, időben és térben változó lehet a képzett index.

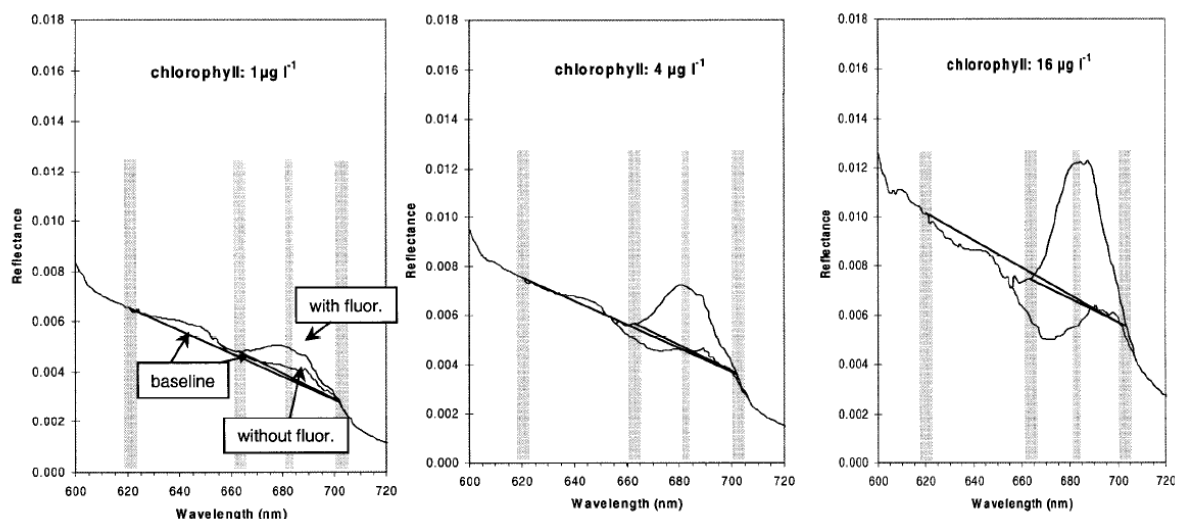
A klorofill-a tartalom mennyiségével statisztikai összefüggést mutató csatornákból képzett indexeknek 2 főbb típusa van. De ennek a két fő típusnak is különböző változatai lehetnek a víz biomasza tömegének függvényében. Az egyik a színbeli különbséget igyekszik kihasználni a 700 nm és a 670 nm körüli hullámhossztartományba eső csatornák reflektanciájának arányával. Ekkor ugyanis a fitoplankton pigmentjeiben lévő klorofill-a miatt az abszorpció megnő és ez egy helyi maximumot eredményez a reflektancia értékekben, ugyanakkor a 670 nm környékén ez a hatás nem jelenik meg, így jól mérhető a két csatorna arányával a klorofill-a mennyisége. Ez a módszer széleskörűen, 0,1-350 mg/m³ klorofill-a tartalommal rendelkező vizek esetén is alkalmazható (Moses et al., 2009). Vannak olyan algoritmusok, amelyek a helyi maximum érték minél jobb prezentálása érdekében a 700 nm környékű csatornák közül mindig a maximummal képezik az indexet. Oligotrófikus vizeknél gyakori az 560 nm környéki

csatornának egyedüli alkalmazása. A hipertrófikus vizeknél pedig a Gitelson és munkatársai (2003) által bemutatott három csatorna alapján képzett index működhet optimálisan.

A második megközelítés az előzőhöz hasonlóan a 700 nm körüli fluoreszcencia okozta 685 nm környékén megjelenő maximumot használja ki a klorofill-a mennyiségének kimutatására. Azonban az előző módszerrel ellentétben, itt nem csak a két csatorna arányát veszi az index, hanem a maximumot közrefogó két szomszédos csatorna segítségével egy alapvonalat definiál és a 700 nm körüli maximum nagyságát ehhez képest méri (Gower et al., 1999) a következő egyenlet (1. egyenlet) alapján:

$$FLH = L(\lambda_2) - kL(\lambda_1) - (1 - k)L(\lambda_3) \quad (1)$$

ahol FLH (Fluorescence Line Height) az index neve, L a radiancia értékeket jelöli a különböző hullámhossztartományokon: $L(\lambda_1)$ a 680 nm, $L(\lambda_3)$ a 750 nm, $L(\lambda_2)$ a 700 nm körüli ún. fluoreszcencia csatorna), a k együttható pedig az adott műszer csatornakiosztását korrigáló tényező. Az $L(\lambda_1)$ és $L(\lambda_3)$ az alapvonalat határozzák meg.



3. ábra Az FLH index a klorofill-a mennyiségének függvényében változó maximumot a két közre záró csatorna alapján méri, ahol minél nagyobb a klorofill-a értéke annál nagyobb a 685 nm hullámhosszhoz tartozó reflektancia értéke (Gower et al., 1999).

2.4. MODIS műszer lehetőségei a komplex vizek vízminőség monitorozásában

A Terra és az Aqua műholdak fedélzetén végez méréseket a MODIS műszer, melynek célja a földfelszín és óceánok folyamatos monitorozása. A műholdak kvázipoláris pályán keringenek, így naponta kétszer haladnak el egy adott terület felett, egy napközbeni és egy éjszakai felvételt készítve. A MODIS műszer egy 36 csatornás multispektrális szenzor, mely a 421,5 – 14235 nm hullámhossz-tartományban mér. Az adatok térbeli felbontása 250 méter (1-2 sáv), 500 méter (3-7 sáv) a többi sávban pedig 1000 méter (King et al., 1992). A vízminőség

monitorozás szempontjából a tipikus hasznos hullámhossztartomány 400-1000 nm közé esik. A 2. típusú vizek monitorozása szempontjából az 1 km-es felbontás nem kedvező, így, ha tehetik a 250 és 500 méter felbontású csatornákat alkalmazzák (Matthews, 2011).

2. táblázat A MODIS műszer vízminőség monitorozására alkalmazható csatornáinak technikai jellemzői (NASA, 2015a alapján)

Csatorna száma	Hullámhossz (nm)	Csatorna szélesség (nm)	Felbontás (m)
8	405 - 420	15	1000
9	438 - 448	10	1000
3	459 - 479	20	500
10	483 - 493	10	1000
11	526 - 536	10	1000
12	546 - 556	10	1000
4	545 - 565	20	500
1	620 - 670	50	250
13	662 - 672	10	1000
14	673 - 683	10	1000
15	743 - 753	10	1000
2	841 - 876	35	250
16	862 - 877	15	1000
5	1230 - 1250	20	500
6	1628 - 1652	35	500
7	2105 - 2155	50	500

A MODIS alkalmazása a 2. típusú vizek vízminőség monitorozásban nem elterjedt, mivel a csatornakiosztás nem ideális a klorofill-a mennyiség meghatározására, ezenkívül pedig az 1 km-es felbontás a legtöbb tó esetében nem megfelelő. Ennek ellenére van néhány példa a szakirodalomban, ahol sikeresen alkalmazták a MODIS felvételeket klorofill-a mennyiség monitorozására. Az első példa Afrika 3. legnagyobb tava (Malawi-tó, 97740 km² terület), ahol a 9-es és 12-es csatorna arányával tipikusan alacsony klorofill-a mennyiség mellett lineáris összefüggést mutatott az *in situ* mért adatokkal (szórásnégyzete a lineáris illesztésnek 0,6) (Chavula et al., 2009). A légköri korrekciót az ún. SeaDAS szoftverrel (NASA, 2015b) végezték

el, ahol a tó nagy kiterjedése miatt jól működött az eredetileg óceánokra fejlesztett ún. I2gen algoritmus. A Kína területén található 780 km² kiterjedésű Chaohu tóra a légkörileg korrigált csatornák és az *in situ* mért vízminőség jellemző paraméterek között neurális hálók építésével kerestek kapcsolatot, ahol végül a legjobban működő algoritmus 0,6 szórásnégyzet eredmény adta. Ugyanezzel a módszerrel, ebben a cikkben a Secchi mélység, a foszfor és nitrogén tartalom is meghatározásra került (Wu et al., 2009). Gower et al. (2004) munkájában a MODIS csatorna kiosztására alkalmazza az FLH indexet és teszteli a Kanada partjainál lévő partközeli vizeken. A kapott eredményeket összeveti a Sea-viewing Wide field-of-view sensor (SeaWiifs) adatai alapján számított klorofill-a eredményeivel illetve a hivatalos MODIS NASA produktummal. Megállapításuk az volt, hogy a légkörileg korrigálatlan MODIS adatokból számított FLH index néhány helyen jobb egyezést mutat a SeaWifs adatokkal, továbbá hogy a produktum alkalmazása lehetővé teszi a biomassza pontosabb meghatározását. Ezentúl a szakirodalom előszeretettel használja a MODIS 1. és 3. csatornáit (mivel ezek felbontása 250 m, 500 m) a Secchi mélység meghatározására (pl. Poyang-tó, Kína, Wu et al., 2008), vagy a Mexikói öböl TSS mennyiségének meghatározására (pl. Miller és Mckee, 2004).

3. táblázat A szakirodalomban MODIS felvételekre alkalmazott empirikus algoritmusok a klorofill-a meghatározására (ahol a B és a szám jelölés a MODIS csatorna számát jelenti).

Tó	Légköri korrekció	Algoritmus	Víztípus	Publikáció
Malawi (Afrika)	igen	B9/B12	Alacsony Chl-a tartalom	Chavula et al., 2009
Chaohu (Ázsia)	igen	$\ln(B2)+\ln(B9)-\ln(B3-B2)/B2$	Alacsony Chla tartalom	Wu et al., 2009
Kanada nyugati partja (Észak Amerika)	-	$FLH = B14-0.860*B13-(1-0.860)*B15$	-	Gower et al., 2004

3. A Balaton

A Balaton 597 km² területével Közép-Európa legnagyobb tava (Herodek et al., 1988), hosszúsága 78 km, szélessége átlagosan 7,6 km, átlagos mélysége 3,3 m (Zlinszky és Molnár, 2008), így sekély tónak tekinthető (Palmer et al., 2015b). Négy főbb részmedencére lehet bontani: Keszthelyi-, Szigligeti-, Szemesi- és Siófoki-medence. A legnagyobb befolyás a Zala folyó által behordott tápanyag/üledék, az egyetlen kifolyás 1863 óta a Sió csatorna, mely a később a Dunába torkollik. Ennek megfelelően alakul a tó trofikus jellege, délnyugaton eutróf, hipertróf míg északkeleten oligotróf, mezotróf jellegű. A turbiditása a tónak magas, átlagosan 20 cm -1m között változik a Secchi mélység, így a fenékről való visszaverődés lehetősége kicsi (Palmer et al., 2015b). Évente kétszer van algavirágzás, az egyik tavasszal (áprilisban) a másik (augusztus-szeptemberben) (Mózes et al., 2006).

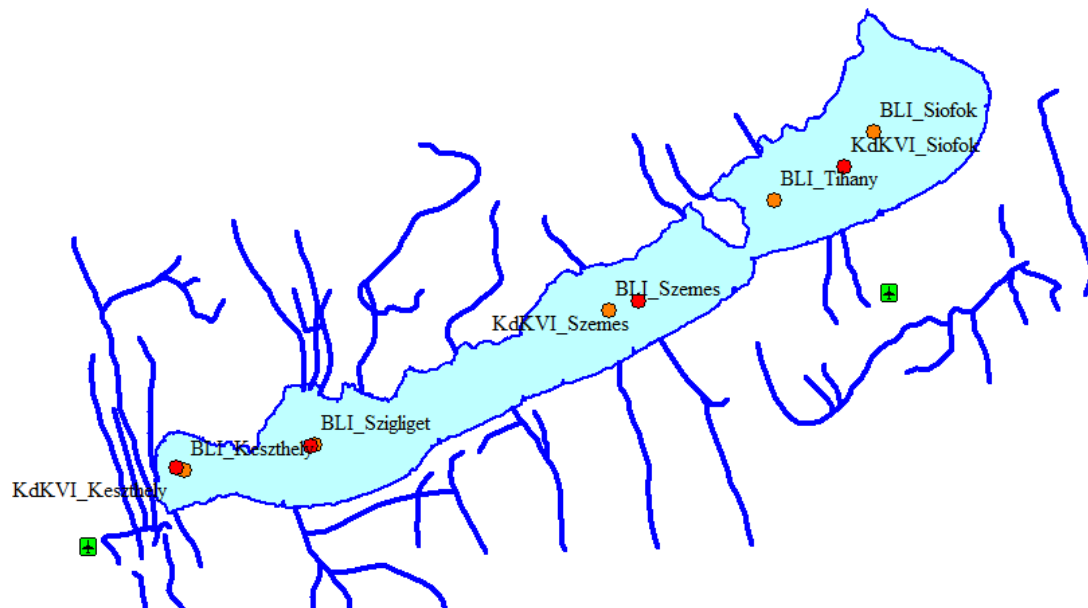
A vízminőség változása többször fenyegette veszéllyel a Balaton vizének tisztaságát, strandolásra való alkalmasságát így a turizmus alakulását. 1970 és 1980-as években a Zalából érkező szennyvíz miatt megindult a víz gyorsütemű eutrófikációja. Ezt a szennyvíz foszfortalanításával, a vízgyűjtőről való kivezetésével és Kis-Balaton védelmének helyreállításával állították meg (Herodek et al., 1988).

3.1. A mért *in situ* klorofill-a adatok

A hagyományos vízminőség paramétereinek meghatározása a Balatoni Limnológiai Intézet (BLI) és a Közép-Dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség (KDKVI) által februártól-novemberig 2 hetente 4 részmedencének közepén történő pontszerű mintavételezés alapján történik.

A pontszerű mérések során a klorofill-a, szervesanyag tartalom, víz hőmérséklet, Secchi mélység és eutrófikáció mértéke kerül rögzítésre. Én ezek közül a klorofill-a értékeket tartalmazó adatokat kaptam kézhez. A KDKVI esetén a víz felszínéről történt a mintavételezés (felső 0,5 méter), míg a BLI minták esetén teljes vízoszlopból vették a mintát és számították ki az értékeket. Laborban, szűrés, metanolos extrakció és fotometriás mérés segítségével határozták meg a klorofill-a értékét (Iwamura et al., 1970). Ezenkívül azt is vizsgálták, hogy a teljes vízoszlop, illetve csakis a felső rétegből vett minták klorofill-a értéke hogyan viszonyul

egymáshoz. Megállapították (7-7 azonos napon vett minta alapján), hogy nincs jelentős különbség a mért klorofill-a értékek között (Palmer et al., 2015b).



4. ábra Az *In situ* mérések pirossal a Balatoni Limnológiai Intézet, narancssárgával a Közép-Dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség mintavételi helyei. A mérések az adott részmedence közepén történtek.

A 4. táblázat szemlélteti a 2007-2011 közötti átlagos klorofill-a értékeket és szórásukat a Keszthelyi-, Szigligeti-, Szemesi- és Siófoki- részmedencékre vonatkozóan. A mért értékek alátámasztják a Balaton trofikus jellegének változását.

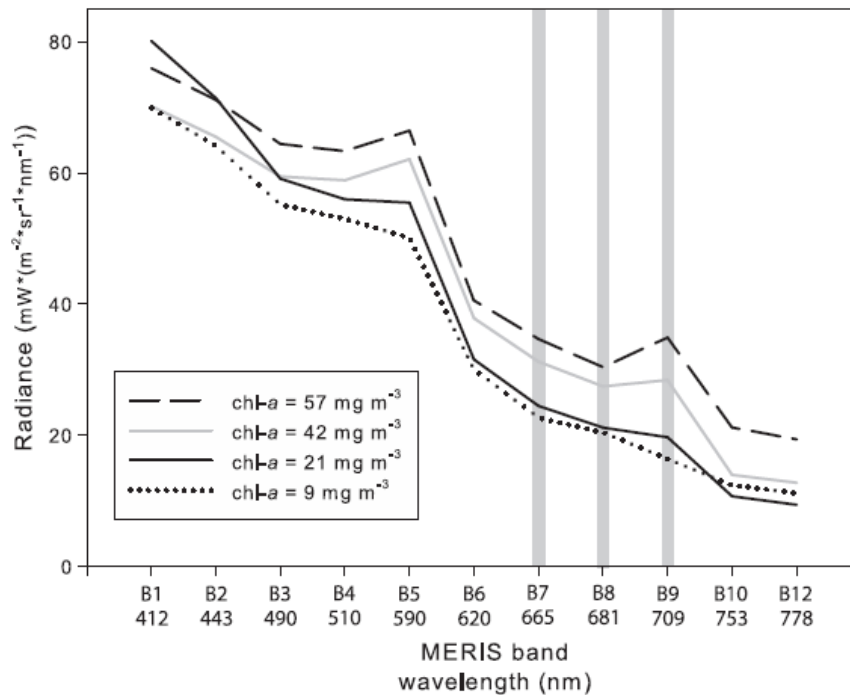
4. táblázat Az *in situ* mért klorofill-a adatok statisztikai jellemzői az egyes balatoni részmedencékre.

Mintavétel helye	Mintaszám	Átlagos Chl-a (mg/m ³)	Szórás
Keszthely	59	17,36	12,65
Szigliget	47	16,08	11,33
Szemes	38	12,86	10,56
Tihany	17	5,40	2,56
Siófok	40	5,02	2,80
Összesített	201	12,75	11,14

3.2. Klorofill-a monitorozás MERIS felvételek alapján

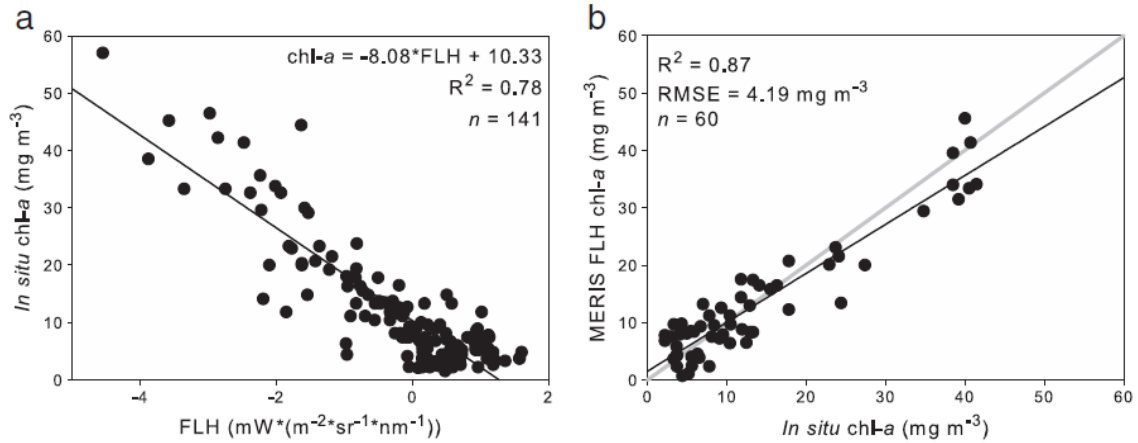
A következőkben Palmer és munkatársai (2015b, 2015c) munkája alapján bemutatom az eddig elért eredményeket a Balaton fitoplankton, biomasza mennyiségének becslésében

távérzékelte adatok alapján. A kalibráció a MERIS műszer adataira történt, ahol a csatorna kiosztás optimalizált a vízminőség monitorozására, mivel a látható és infravörös tartományban helyezkedik el 15 csatorna. A kalibráció során a MERIS-re alkalmazható klorofill-a mennyiséget becsülő indexek összehasonlító elemzésre kerültek és az illesztés sikeressége alapján az FLH index bizonyult a legalkalmasabbnak a Balaton klorofill-a tartalmának monitorozására.



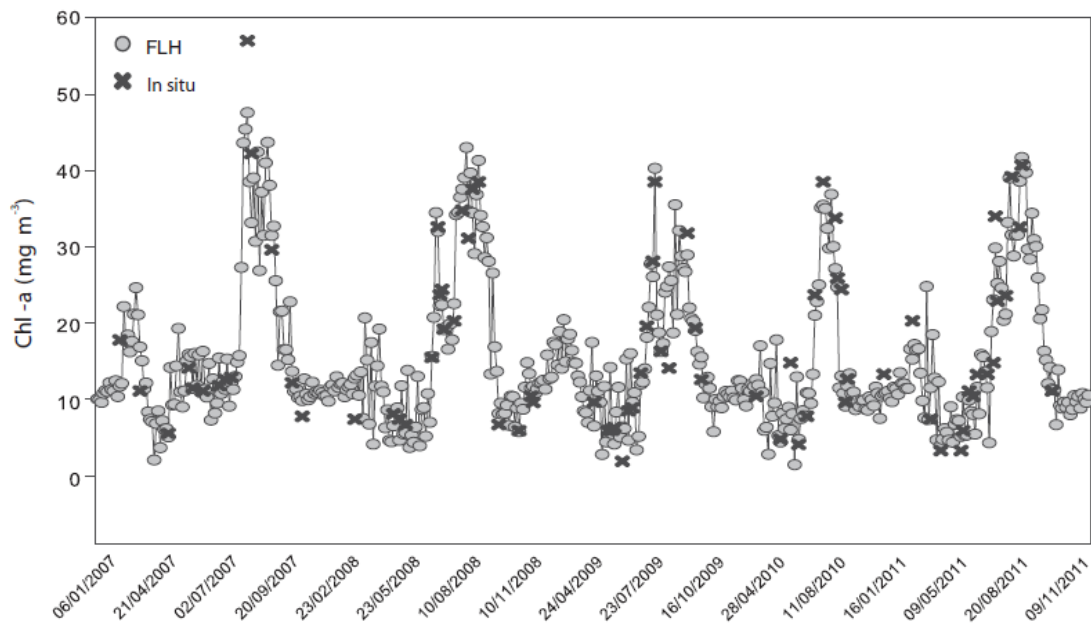
5. ábra Különböző klorofill-a értékekhez tartozó radiancia-hullámhossz függvény, a MERIS csatornakiosztása mellett (Palmer et al., 2015c).

Az 5. ábrán különböző klorofill-a mennyiségek mellett a MERIS csatornakiosztásnak függvényében láthatók a radiancia értékek. Megállapítható, hogy a 700 nm körüli maximum jól elkülöníthetően megjelenik a magasabb klorofill-a tartalom esetén. Ezzel magyarázható, hogy az FLH index 0,78 szórásnégyzet hibával alkalmazható a MERIS adatokra. Az FLH index további előnye, hogy nem követel meg légköri korrekciót. A neurális hálón alapuló algoritmusok légköri korrekciót kívánnak, azonban a MERIS alap légköri korrekciós eljárásai nem adtak megfelelő eredményt a Balaton vízfelületére, így végül a légkörileg korrigált adatokból képzett indexek megbízhatósága alacsonynak bizonyult.



6. ábra A MERIS adatokból származtatott FLH index és az in situ klorofill-a adatok közötti kapcsolat (Palmer et al., 2015c). Az lineáris illesztés 141 db adatra történt, az illesztés validációja pedig 60 db. random kiválasztott minta alapján.

Az FLH index és a mért klorofill-a értékek között jellegzetes negatív lineáris kapcsolat figyelhető meg (6. ábra). Ezt nagy valószínűséggel a víz cianobaktérium tartalma okozza. A 7. ábrán pedig 2007-2012 között az illesztett egyenes alapján számított klorofill-a érték és a terepen mért értékek éves lefutása követhető végig. Megállapítható, hogy jól követi egymást a két különböző módon (*in situ* méréssel és távérzékeléssel) meghatározott érték.



7. ábra A terepen mért klorofill-a és az FLH index alapján számított klorofill-a értékek változása az év napjainak függvényében 2007 és 2011 között (Palmer et al., 2015b)

Összességében megállapítható, hogy a FLH index a MERIS műszer esetében egy robusztusan alkalmazható, a klorofill-a mennyiséget jól kimutató vízminőség monitorozó eljárás.

4. MODIS felvételek feldolgozása

Az előző fejezetekben megismerhettük a MODIS műszert és csatorna kiosztásának lehetőségeit a komplex vizek vízminőség monitorozásában, illetve átfogó képet adtam a Balaton főbb biofizikai jellemzőiről. Ebben a fejezetben a NASA által fenntartott adatbázisból (NASA, 2015) ingyenesen elérhető MODIS felvételek feldolgozásának lépéseit ismertetem.

4.1. MODIS produktumok

A dolgozat célkitűzése, hogy az Internetes adatbázisból ingyenesen letölthető MODIS produktumok felhasználásával vizsgáljam a klorofill-a mennyiségének becslésére alkalmazható empirikus összefüggéseket. A MODIS produktumok 1-44-ig számozva különféle feldolgozottság szinteken, különféle nyers mért adatokat vagy származtatott mennyiségeket tartalmazó raszteres adatállományok (NASA, 2015a). A 0. szint és az 1A szint, az Internetes adatbázisban nem érhető el: előbbi a teljesen nyers műholdról vett, utóbbi a kommunikációs információk nélküli nyers adatokat tartalmazza. Az 1B szint már a kalibrált radiancia adatokat illetve a hozzájuk tartozó földrajzi szélesség és hosszúság értékeket jelöli. A 2. szintű adatok már származtatott geofizikai mennyiségeket tartalmaznak. Ezen származtatott geofizikai mennyiségek lehetnek légkörre, földfelszínre, óceánokra vagy krioszférára vonatkozó adatok (NASA, 2015a). A légköri produktumok között szerepel többek között a légköri aeroszol részecskék és a teljes kihullható vízgőz mennyiségét illetve a felhőmaszkot tartalmazó produktum. Földfelszínre vonatkozó produktum, például a légkörileg korrigált a szárazföld felszínére vonatkozó reflektancia adatokat tartalmaz. Az óceánokra vonatkozó produktumok például a klorofill-a mennyiségét, normalizált fluoreszcencia értékekről, szervesanyag, fitoplankton koncentrációról információt tartalmazó produktumok. Az óceáni produktumok az Internetes adatbázisból nem érhetőek el, de a SeaDAS (NASA, 2015b) ingyenesen hozzáférhető szoftvercsomagban rendelkezésre állnak a produktumokat előállító algoritmusok. A krioszféra produktumai többek között a hó és felszínjég borítottságról tartalmaz információt. A 3. szintű adatok már egységes szinuszoidális rácsra interpolált térben és időben változó felbontású egész földfelszínre kiterjedő információt, a 4. szint pedig már modelleredményeket tartalmaz.

Az adatok Hierarchical Data Format (HDF) formátumba érhetőek el, mely a tudományos adatokat hierarhikus struktúrába rendezi és magába foglalja az adatról szóló információt is

(metaadat). A fájlformátum praktikusán olvasható többféle programnyelvvvel (pl. Python, IDL, MATLAB).

A dolgozatban az 5. táblázatban összefoglalt produktumokat alkalmaztam. A táblázat első oszlopa a produktum neve, ahol az első három betű a műhold nevére utal (MOD=Terra, MYD=Aqua) a szám pedig a produktumhoz tartozó azonosító szám. A kalibrált radianciákat tartalmazó 1B szintű produktum a dolgozat bemeneti adatrendszerre. A többi 4 produktumot az 1B szintű adatok közelebbi vizsgálatára és az adatrendszer elemzéséhez használtam fel.

5. táblázat Dolgozatban alkalmazott MODIS produktumok

MODIS produktum	Leírás	Felbontás
MOD02/MYD02	Kalibrált radiancia értékeket tartalmazó produktum	1 km
MOD03/MYD03	Geolokációs információkat tartalmazó produktum	1 km
MOD04/MYD04	Aeroszol produktum	10 km
MOD05/MYD05	Teljes kihullható vízgőztartalom	1 km és 5km
MOD35/MYD35	Felhőmaszk produktum	1 km

4.1.1. MOD02 produktum

A MOD02/MYD02 produktum fájljai eredetileg a nyers beütésszámot tartalmazzák, de mindezek mellett rendelkezésre áll a kalibrációhoz szükséges adat. A kalibráció során a cél a mért beütésszám (Digital Count, DC) konvertálása fizikai mennyiséggé a következők szerint (2. egyenlet):

$$DC = G * L + B \quad (2)$$

ahol L a radiancia [W/m²/sr/mikrométer], G és B műszerállandók. A radiancia értékét szeretnénk megtudni, ami azt adja meg, hogy mennyi az egy egységnyi felületen áthaladó, egységnyi térszög irányából érkező spektrális teljesítménysűrűség. A műszerállandók a műhold öregedésével változnak.

A radiancia (L) és a látszólagos reflektancia (ρ) kapcsolata a légköri hatásokat elhanyagolva:

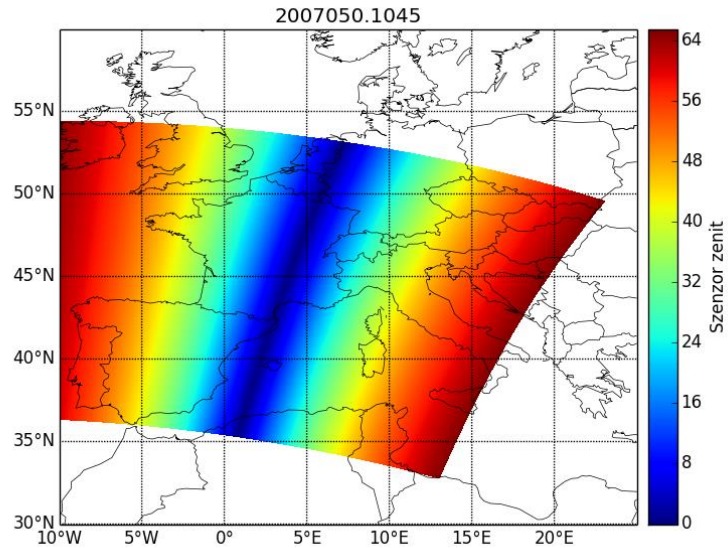
$$L = \frac{\rho * E * \cos(\theta)}{\pi} \quad (3)$$

ahol E az irradiancia, θ pedig a Nap zenitszöge. A 3. egyenletben a sugárzást teljes egészében a Nap irányából érkezőnek és a felületet vízszintesnek feltételezzük, így a radianciából származtatni tudjuk a látszólagos reflektanciát.

A feldolgozás során a 1B szintű produktumból a kalibrált radiancia értékeket állítottam elő az 1. és 19. közötti csatornákra. A 13. és a 14. csatornának létezik alacsony és magas radiancia felbontással történő regisztrálásból származó variációja. Erre azért van szükség, mivel a szárazföldek és az óceánok radiancia értékeinek intervalluma nem azonos. A szárazföld és a felhőzet szélesebb, míg az óceánoknál szűkebb radiancia érték tartományt ölelnek fel. Mivel a szenornak az adattovábbítás bitrátája fix, ezért adott, hogy összesen mennyi különböző információ megkülönböztetésére van mód. Ha széles a radiancia tartomány, akkor alacsonyabb lesz az információ felbontás, ha alacsony a radiancia tartomány, akkor lehet egy finomabb radiancia felbontást alkalmazni (Meister et al., 2011). Egyik sem fedti le valójában a teljes előforduló radiancia tartományt, ami nem esik bele az intervallumba, ott megjelenik a telítődés. Az óceánok esetén a finomabb radiancia felbontással részletesebb információt nyerhetünk a vízfelületről, viszont így a szárazföldre vonatkozó értékek válnak megkülönböztethetetlené, vagyis az értékek telítésbe kerülnek. Az óceánok esetén kimutatták, hogy az alacsony illetve magas radiancia felbontás alkalmazása lényegi eltérést nem okoz a levezetett óceáni produktumokban (Meister et al., 2011).

4.1.2. MOD03 produktum

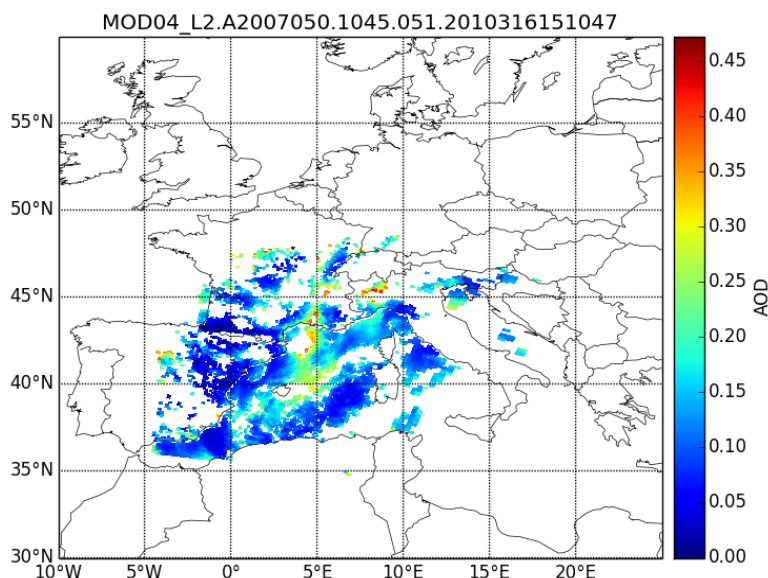
A MOD03/MYD03 produktumban a földrajzi szélesség és hosszúság a található meg, melynek segítségével a MOD021/MYD021 produktumok képkoordináta rendszerben lévő pixel értékeihez egyenként megkapjuk a földrajzi szélesség és hosszúság értékeket. A produktum ezen túl tartalmazza a szenzor és a Nap azimut és zenit szögeinek értékét. Ebből információt nyerhetünk arra nézve, hogy a műszer milyen szög alatt látta az adott megfigyelt földfelszín darabot az áthaladás során. A magas szenzor zenitszög értékkel rendelkező pixelek torzulhatnak. Minél kisebb a szenzor zenitszöge, annál kisebb a torzulás miatti hibák jelenléte.



8. ábra A szenzor-zenitszögek értéke (fok) 2007.02.19-én 10:45-hoz tartozó Terra áthaladáskor

4.1.3. Légköri produktumok

A MOD04/MYD04 produktum az adott hullámhosszra vonatkozó aeroszol optikai mélység értékét (AOD) adja meg 10 x 10 km-es felbontásban (Remer et al., 2006). A légkörön áthaladó sugárzás szóródhat vagy elnyelődhet, amelynek egyik okozója a légkörben lévő aeroszol tartalom. A gázok abszorpció és szóródás értékeit leválasztva kiszámítható a sugárzás gyengítésére jellemző mennyiség, amely a légoszlopban lévő aeroszol mennyiséggel korrelációt mutat, és ennek felhasználásával megadja az adott légoszlop aeroszol tartalmát (mint dimenziótlan mennyiséget). A dolgozatban a 0,55 mikrométeres hullámhosszra számított aeroszol optikai mélységet használtam fel. Ennek értéke átlagosan 0,2 (Kern, 2011) Ha légkör aeroszol részecskéinek mennyisége megnövekszik, akkor az AOD értéke is magasabb lesz.

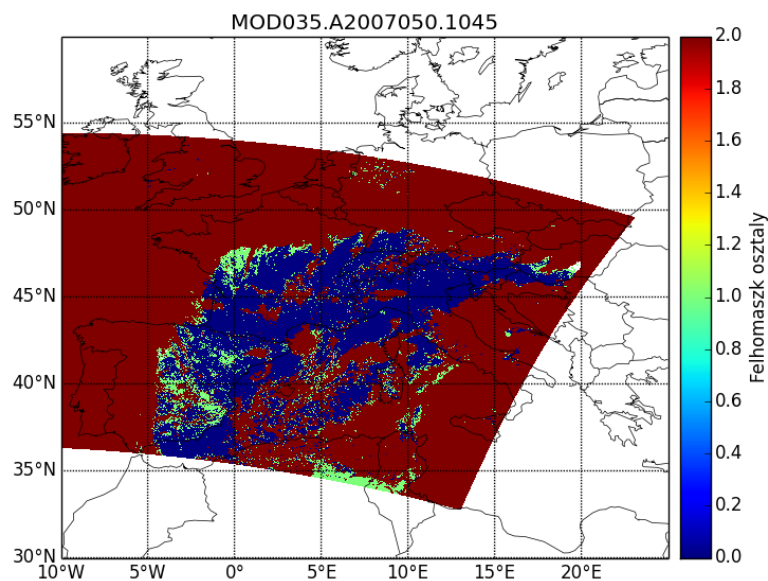


9. ábra Aeroszol optikai mélység (AOD) értékek a 2007.02.19. 10:45-ös Terra áthaladáshoz.

A MOD05/MYD05 produktum a vertikálisan integrált légköri vízgőz mennyiségéről tartalmaz információt. A légkör vízgőz tartalma szintén befolyásolja a sugárzás abszorpcióját és szóródását. MODIS adatok alapján történő kiszámítására kétfajta módszer létezik, melyek a sugárzási spektrum közeli infravörös vagy az infravörös tartományába eső csatornákat alkalmazzák (Gao és Kaufman, 1998). Az integrált vízgőz kiszámításakor a sugárzás áteresztése és a vízgőz elnyelési spektrális tartományok közötti kapcsolatot használják ki. Ez utóbbit közvetlenül nem mérik, hanem a csatornák radiancia arányainak átlagából származtatják. A közeli infravörös integrált vízgőz esetén az infravörös tartományban lévő csatornákat használják a számításhoz, a produktum horizontális felbontása 1 x 1 km, mértékegysége kg/m^2 . Az infravörös integrált vízgőz esetén az infravörös tartományban lévő csatornákat használják fel, ennek a produktumnak a felbontása 5 x 5 km, mértékegysége kg/m^2 . Az integrált vízgőz felhasználásakor figyelembe kell venni, hogy a vízgőztartalomnak van éves menete (Kern, 2011).

A MOD04 és MOD05 produktumok alkalmazásával az volt a célom, hogy információt nyerjek arról, hogy a légkör hozzávetőlegesen mennyire befolyásolja a klorofill-a becslésére képzett index értékeit, mivel ez a két adat fontos bemeneti adatrendszere a légköri korrekciós eljárásoknak és befolyásolják a légkör állapotát ezenkívül nagy térbeli és időbeli változékonyságot mutatnak.

A MOD035/MYD035 felhőmaszk produktum az egyes pixelek felhősségének statisztikai valószínűség értékeit tartalmazza. Ebből az adatrendszerből előállítható a felhasználó számára tetszőlegesen a feldolgozás során alkalmazni kívánt felhőmaszk. A felhőmaszk pontatlan lehet felhőárnyékok, kisebb gomolyfelhők (ún. cumulusok) és magasszintű fátyolfelhők (ún. cirrusok) esetén. A feldolgozás során 0 pixel értékkel töltöttem fel a raszteres adatállomány tiszta, felhőtlen területeket, 1-es értéket kaptak a valószínűleg nem felhős pixelek és 2-es értéket a felhős pixelek. Az adatfeldolgozás során csakis a 0 értékű felhőmaszk pixelértékkel rendelkező adatokat használtam fel a feldolgozáshoz.



10. ábra Felhőmaszk 2007.02.19. 10:45-ös Terra áthaladáshoz (Kék a felhőtlen, zöld a valószínűleg felhőtlen, vörös a felhős pixelek).

4.2. Adatbázis felépítése

Az előző alfejezetben bemutatott produktumokat letöltöttem a NASA FTP klienséről az *in situ* mintavételezési napokra. Az így kapott raszteres állományokból a terepi mintavételezési pontok földrajzi koordinátaira az adott produktum legközelebbi pixel értékeit lekérdeztem és ennek segítségével előállítottam egy adatbázist. Az adatbázis az adott mintavételezési pontra a következőket tartalmazza: a dátumot, az áthaladási időpontot, a műhold nevét, a radiancia értékeket 1-19 csatornákra, a felhőmaszk értékét, a szenzor illetve a Nap zenit és azimut szögeinek értékét, továbbá az AOD és a közeli illetve infravörös integrált vízgőz mennyiségeket és a mért klorofill-a értékét. Ez az adatbázis lett a klorofill-a becslés kalibrációjának bemeneti adatrendszere.

Az adatrendszert első lépésként a felhőmaszk értéke alapján csakis a tiszta, felhőtlen (0 pixelértékkel rendelkező) adatokat tartottam meg. Ezután következett, hogy azokon a napokon, amikor két egymást követő áthaladáson is rajta volt a Balaton, vagy a Balaton egy része, a kisebb szenzor zenitszöget tartalmazó adatokat tartottam meg az adatelemzés további lépéseihez. Előfordult, hogy azonos napon a Balaton Limnológiai Intézet és a Közép-Dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség is mért, ekkor mindkét értéket tartalmazza az adatbázis egy felvételre vonatkozóan.

6. táblázat Összesített táblázat a feldolgozott adatrendszerre: felhő- és szenzorzenitszög-szűrés után maradt minták száma az egyes balatoni részmedencékre

Részmedencék	Terra			Aqua		
	Összesen	Felhőtlen	Szűrt	Összesen	Felhőtlen	Szűrt
Keszthelyi	50	38	35	47	31	27
Szigligeti	57	47	39	56	39	33
Szemes	44	32	28	44	29	24
Siófoki	65	55	46	47	35	29
Összesített	216	172	148	194	134	113

5. Klorofill-a becslése MODIS adatok alapján

A szakirodalom alapján megállapítható, hogy a klorofill-a mennyiségének becslése kétféle empirikus algoritmus alapján történhet, az egyik az FLH index, a másik pedig a zöld és vörös csatorna hányadosából képzett index (Matthews, 2011). Mindkét index biofizikai alapja a fluoreszcencia, így a Balaton klorofill-a becslésére a Palmer és munkatársai (2015b) által szintén alkalmazott FLH indexet választottam ki tesztelésre.

5.1. FLH index számítása MODIS adatokra

A MODIS adatokra alkalmazható FLH index definiálására Gower és munkatársai (2004) alapján a 4. egyenlet szerint alkalmaztam:

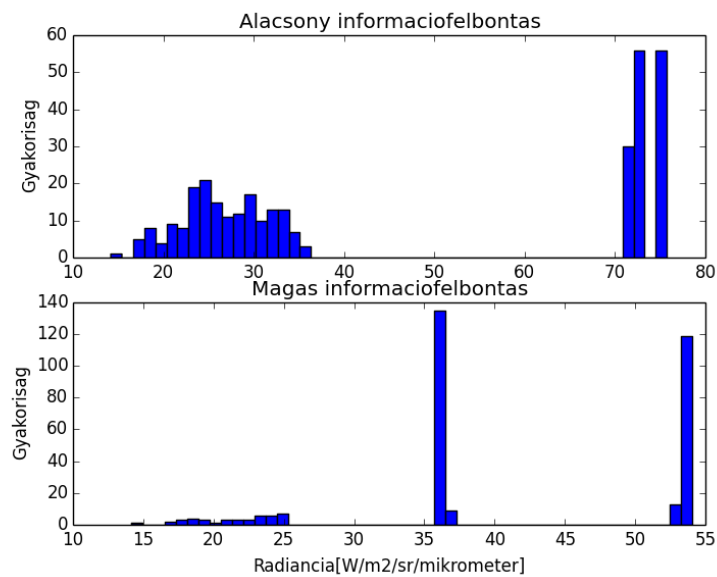
$$FLH = L(\lambda_2) - kL(\lambda_1) - (1 - k)L(\lambda_3) = L(676,8) - kL(665,5) - (1 - k)L(746,4) \quad (4)$$

ahol az $L(\lambda_1)$ és $L(\lambda_3)$ a 13. és 15. MODIS csatorna radiancia értékei, az $L(\lambda_2)$ a 14. ún. fluoreszcencia csatorna radiancia értéke, míg k csatornakiosztásra jellemző konstans az 5. egyenlet definiálja:

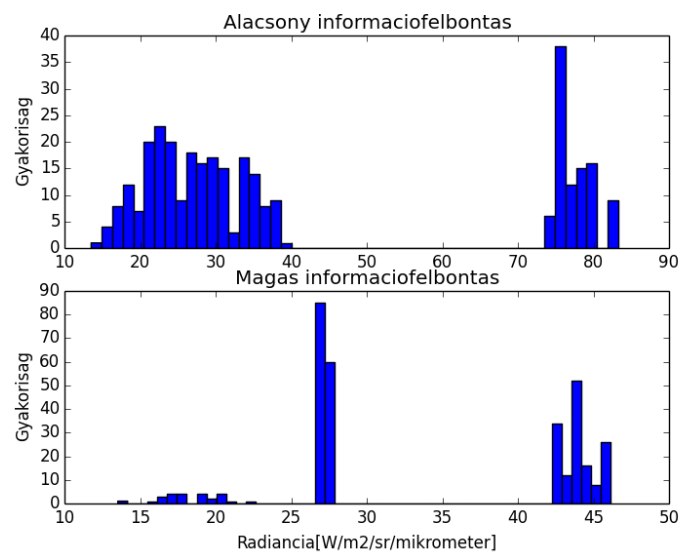
$$k = \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_1} = 0,860 \quad (5)$$

A cikk megállapítja, hogy az index légköri korrekcióval és légköri korrekció nélküli kalibrált radiancia értékekre egyaránt alkalmazható. A jelen dolgozatban nem alkalmaztam légköri korrekciós eljárást az adatokon, hanem a kalibrált radiancia értékek segítségével képeztem a FLH indexet. Fontos megjegyezni, hogy az FLH indexnek nem létezik tavakra kifejlesztett speciális változata (Matthews, 2011). Az FLH index kiszámításához a MODIS szenzor 13., 14. és 15. csatornáinak adataira van szükség. Ahogy 4.1.1. részfejezetben bevezettem, a MODIS adatok esetén a 13., 14. csatorna értékei két különböző módon kerülnek regisztrálásra. Így első lépésként az ún. „alacsony” és a „magas” 13. és 14. csatorna hisztogramjait vizsgáltam a felhőtlen adatokból előállított *in situ* mérések helyszíneire vonatkozó adatsor alapján. A 13. és a 14. csatorna 2007-2011 közötti felhőtlen pixelekre kiszámolt hisztogramjai alapján (11. és 12. ábra) megállapítható, hogy a nagyobb információ felbontással bíró csatorna (mely speciálisan az óceánokra lett kifejlesztve) nem alkalmazható a Balaton vízminőség monitorozására, mivel nem látszik a Balaton ezeken a csatornákon, nem ad a felszíntől eltérő értéket. A dolgozatban így az alacsony információfelbontású, szélesebb radiancia tartományban mérő csatornákat alkalmaztam. Ugyanakkor figyelembe kell venni, a hisztogramon elkülönülő nagy valószínűséggel a műszer telítődésével magyarázható 70-80

W/m²/steradián/mikrométer radiancia értékek közé eső elkülönülő csoportot. Mivel a hisztogram az összes 2007-2011 évhez tartozó felhőtlen *in situ* mérésekhez tartozó radiancia értékeket tartalmazza, így a különböző felvételek esetén némileg eltérő lehet a telítődés értéke (72-76 W/m²/steradián/mikrométer a 13. és 75-82 W/m²/steradián/mikrométer a 14. csatorna esetén). Ennek alapján kérdéssé vált, hogy mi okozza az alacsony mintavételezésű csatornák telítődését, mely mintavételi pontokhoz, milyen időszakhoz köthetőek ezek az értékek, illetve esetlegesen milyen biofizikai jellemzők váltják ki.

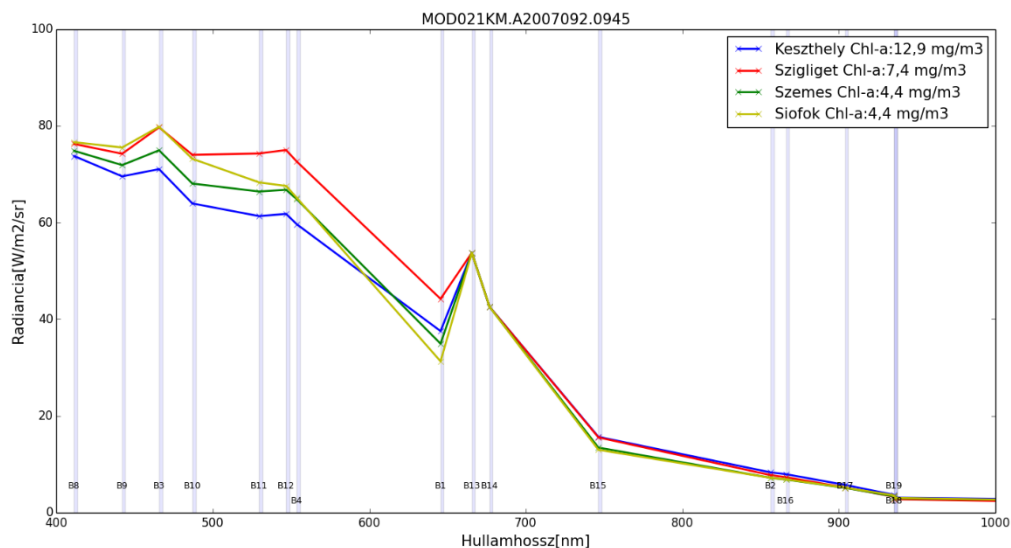


11. ábra A 13. csatorna alacsony és magas mintavételezéssel előállított radiancia értékeinek gyakorisága a 2007-2011 közötti időszak felhőtlen felvételeiből a mintavételi pontokra vonatkozó adatok alapján.



12. ábra A 14. csatorna alacsony és magas mintavételezéssel előállított radiancia értékeinek gyakorisága a 2007-2011 közötti időszak felhőtlen felvételeiből a mintavételi pontokra vonatkozó adatok alapján.

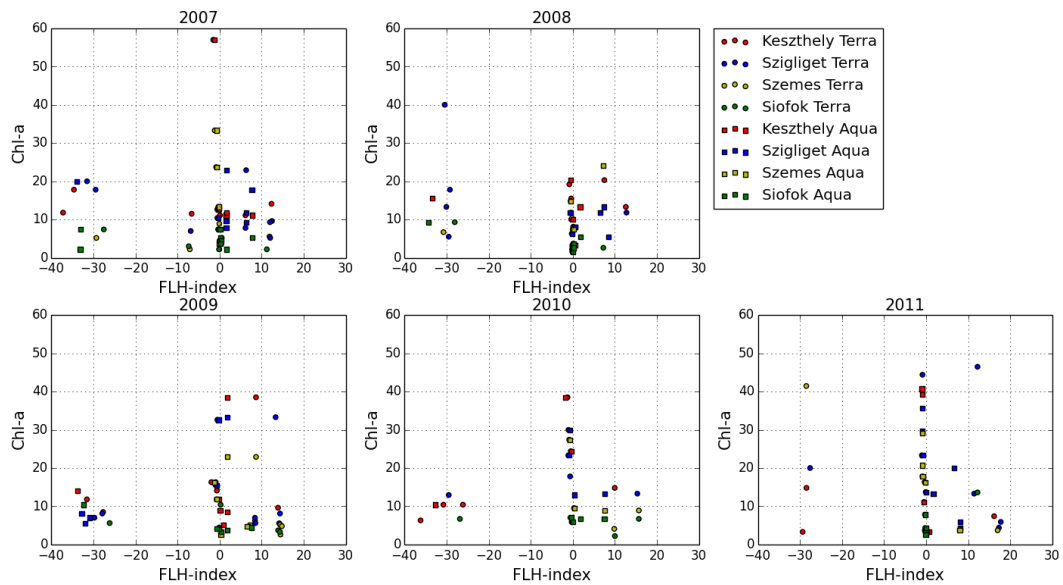
Ezenkívül megvizsgáltam az 400-1000 nm hullámhossz függvényében a radiancia értékek változását is. Gyakran megfigyelhető volt, hogy a 13. és 14. csatorna azonos értékeket vett fel a klorofill-a tartalomtól függetlenül, ugyanakkor vannak áthaladások, ahol a 13., 14. és 15. csatorna között megjelenik a helyi maximum, amelyet a fluoreszcencia jelensége okozhat (13. ábra).



13. ábra A 2007.04.02. kora tavaszi algavirágzás időpontjához tartozó hullámhossz radiancia függvény a négy részmedence esetén.

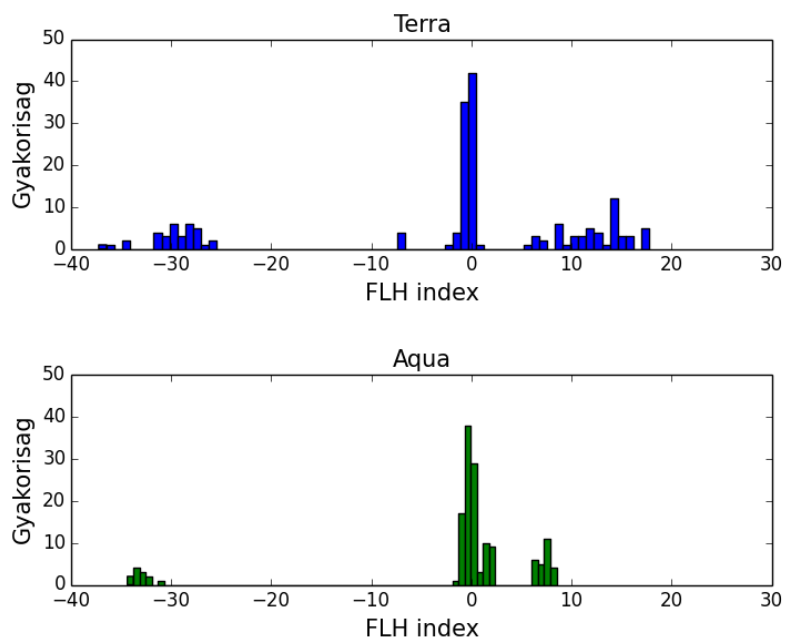
5.2. FLH index működésének vizsgálata

Az FLH indexet Gower és munkatársai munkája (2004) alapján a szélesebb radiancia tartományban mérő ún. „alacsony” 13. és 14. csatorna alapján számítottam. Az így kiszámított FLH index értékeit az egyes *in situ* mérési napokra 2007-2011 között a klorofill-a tartalom függvényében ábrázoltam (14. ábra). Az eredményeken az figyelhető meg, hogy négy markáns csoportra különülnek el az FLH index értékei szerint az adatok. Az első csoport -40 és -30 közötti FLH index értékkel rendelkezik, utána -10 környéki FLH indexű majd egy főként -2,2 közötti FLH index értékeket tartalmazó csoport végül pedig egy 4-20 FLH index értéket tartalmazó csoport jelenik meg.



14. ábra A FLH index a klorofill-a tartalom függvényében ábrázolva az egyes vizsgált évekre vonatkozóan (2007-2011). A -2,2 közeli FLH index értékek között felfedezhető lineáris összefüggés.

Hisztogramon ábrázolva (15. ábra) a Terra és Aqua FLH index értékeit, némileg a Terra esetén nagyobb szóródással, de mind a négy csoport mindkét műhold mérési adatai alapján megjelenik.

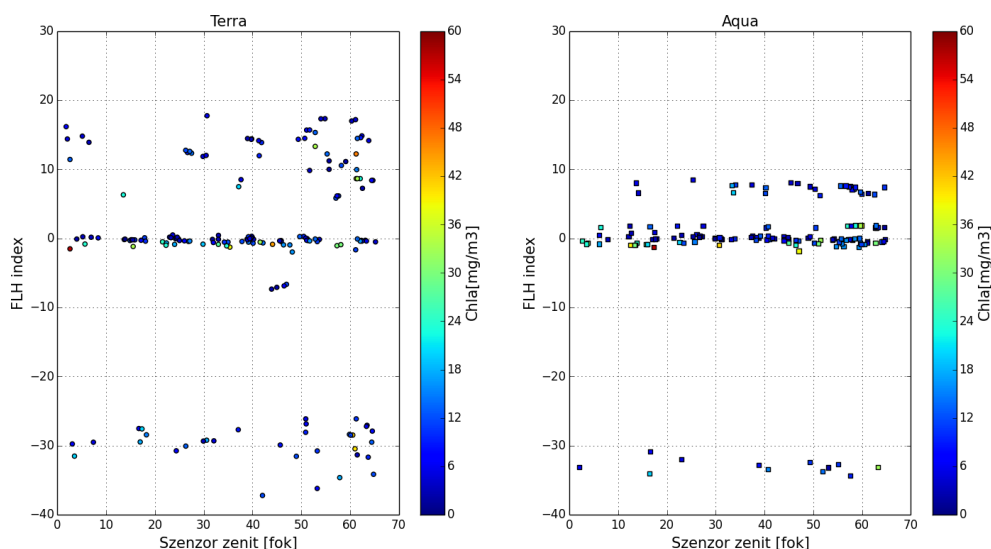


15. ábra A vizsgált évekre (2007-2011) számított FLH index értékeinek hisztogramja. Jól elkülöníthető a 4 markáns csoport, mind a Terra, mind az Aqua esetében.

A dolgozat egyik központi kérdése lett az előzetes vizsgálatok alapján, hogy az FLH index értékei szerint szétválasztható 4 csoportot milyen hatás eredményezi. Előzetes ismeretek alapján többféle feltételezhető ok is lehetséges: szenzor zenitszög hatása, a légköri korrekció

hiánya vagy a lebegőanyag mennyiségének változása a tóban (pl. erős szél hatására, amikor a Balaton vize felkavarodik). Továbbá keresem a választ arra, hogy az 5.1. részfejezetben 11. és 12. ábrán megfigyelhető 20-40 W/m²/steradián/mikrométer illetve 70-80 W/m²/steradián/mikrométer közötti (valószínűleg telítődés okozta) radiancia értékek megjelenése, mivel magyarázható. A következőkben a különböző MODIS produktumokból nyerhető plusz információkat arra használtam fel, hogy a 4 csoport kialakulásának lehetséges okaira keressem a választ.

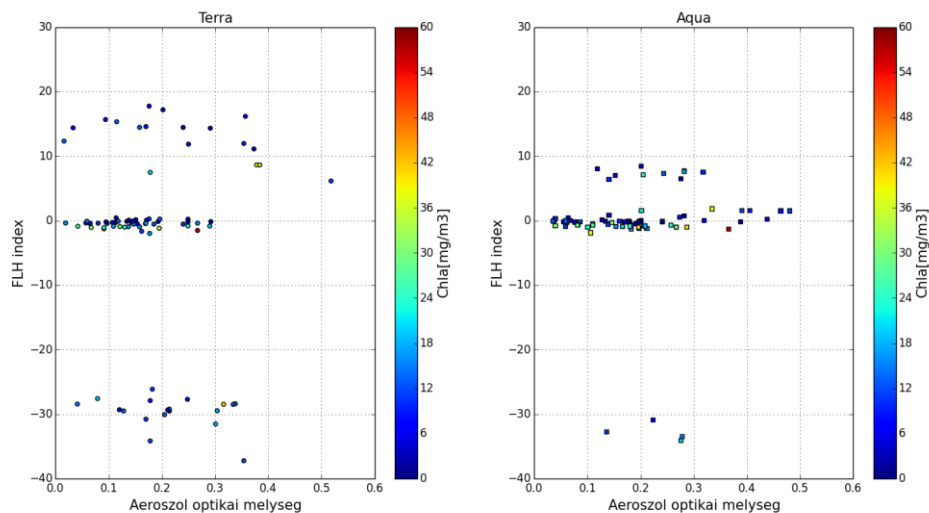
Első esetben a geometriai paraméterek közül a szenzor-zenitszögétől való függést vizsgáltam (a Nap és a szenzor-azimutszöge nem befolyásolja nagymértékben a radiancia értékeket). Ha a szenzor zenitszöge nagyobb, akkor a mért adat részben módosulhat. A 16. ábrát megvizsgálva azt látjuk, hogy mindegyik FLH index szerint elkülönülő csoportban található magas és alacsony szenzor zenit értékek, azaz ennek szűrése szükséges lehet, de nem okozza a 4 csoport kialakulását. Ezen felül az is látható, hogy a zenitszög nem csak a négy csoport kialakulásától független, de nem gyakorol befolyást a FLH aktuális értékére sem: gyakorlatilag a teljes zenitszög tartományban előfordulnak ugyanazok a FLH index értékek.



16. ábra A szenzor zenitszög értéke az FLH index függvényében a felhőtlen 2007-2011 évi mintavételi pontokra vonatkozóan a mért klorofill-a tartalom alapján színezve.

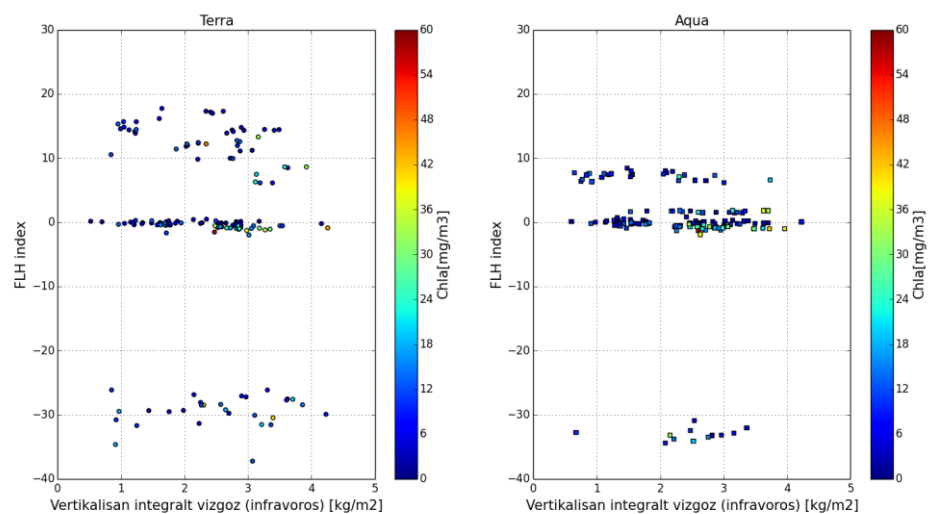
Második lehetőség a légköri korrekció hiányából fakadó hiba. Ezt jelenleg az aeroszol optikai mélység és a vertikálisan integrált infravörös és közeli infravörös adatok felhasználásával előállított vízgőztartalom alapján vizsgáltam. Ez a vizsgálat nem helyettesíti a légköri korrekciót, csak némi töredék információt ad arról, hogy szükséges lenne-e a légköri korrekció,

mivel ez a két paraméter a légköri korrekció két legfontosabb bemeneti adatrendszer. Az aeroszol optikai mélységet ábrázolva a FLH index függvényében látható, hogy a 0 körüli FLH értékek főként alacsony aeroszol optikai mélység értékkel rendelkeznek (tehát jó légköri körülmények között készültek) illetve, hogy a -30 és a 10 körüli értékek az aeroszol optikai mélységgel némileg összefüggést mutatnak, de csak a Terra műhold esetén.

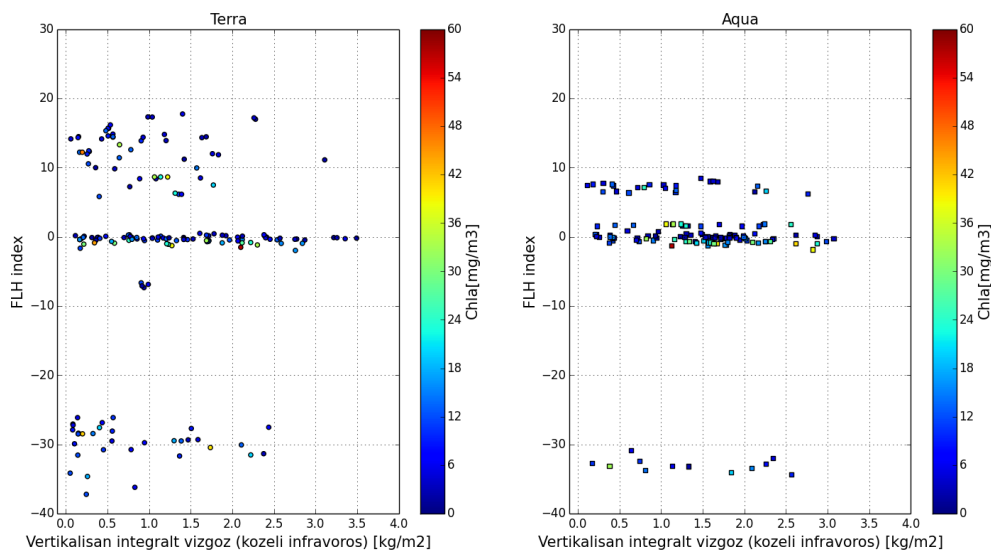


17. ábra Az aeroszol optikai mélység az FLH index függvényében a felhőtlen 2007-2011 évi mintavételi pontokra vonatkozóan a mért klorofill-a tartalom alapján színezve.

A vertikálisan integrált vízgőz értékeknél figyelembe kell venni, hogy az értékek relatív, nyáron magasabb a vízgőz tartalom, mint télen, tehát évszakos menete van. Az 17., 18., ábrák alapján itt is megállapítható, hogy a vízgőz tartalom értékeinek változása független a FLH értékeinek változásaitól.



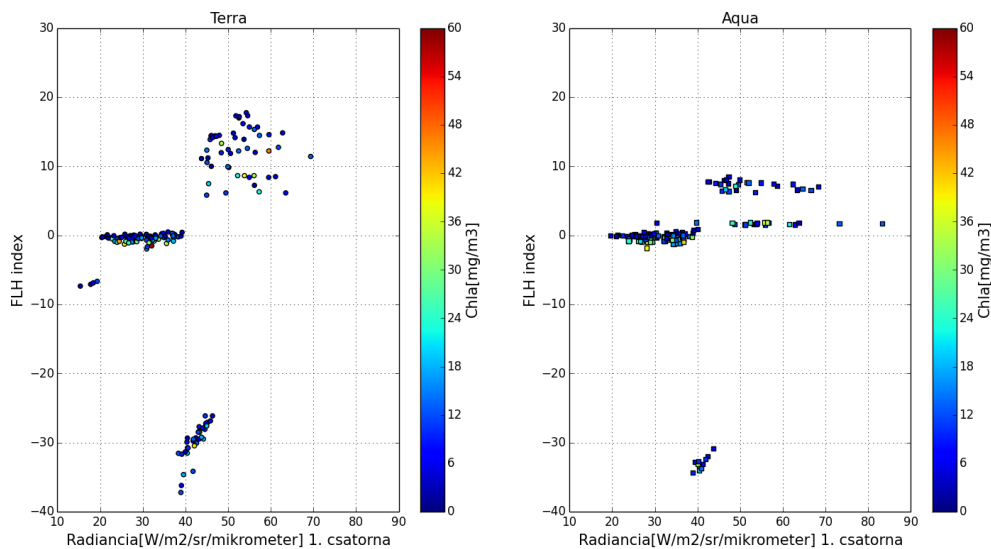
18. ábra A vertikálisan integrált vízgőz (infravörös csatornák alapján számítva) az FLH index függvényében a felhőtlen 2007-2011 évi mintavételi pontokra vonatkozóan a mért klorofill-a tartalom alapján színezve.



19. ábra A vertikálisan integrált vízgőz (közeli infravörös csatornák alapján számítva) az FLH index függvényében a felhőtlen 2007-2011 évi mintavételi pontokra vonatkozóan a mért klorofill-a tartalom alapján színezve.

Végül az 1. csatorna értékeinek változását vizsgáltam meg a FLH érték függvényében. A MODIS 1. csatornájáról ismert, hogy szorosan összefügg a víz ásványi lebegőanyag tartalmával (Matthews, 2011). A vizuális interpretáció alapján megállapítható, hogy a négy, az FLH index alapján feltételezett csoport a 1. csatorna értékei alapján elkülönül. A 1. csatorna 0-20 W/m²/steradián/mikrométer közötti radiancia értékei a -10 körüli FLH index értékeket tartalmazza, a 20-40 W/m²/steradián/mikrométer értékei a 0 körüli értékeket, a 38-50 W/m²/steradián/mikrométer közötti radianciák a -30 értékeket és 45 W/m²/steradián/mikrométer radiancia felett a +10 körüli FLH index értékeket. Kézenfekvő, hogy az 1. csatorna magas radiancia értékei esetén a lebegőanyag miatt kevésbé látható a klorofill fluoreszcencia jele, bizonyos lebegőanyag koncentrációknál a FLH index negatívba fordul (az alapvonal magasabban van, mint a 14. csatorna, és extrém magas lebegőanyagnál pedig már a 14. csatornán is erős radianciát mérünk. A FLH és az 1. csatorna értékei közötti összefüggést ábrázolva (20. ábra) látszik, hogy a 1. csatorna értéke nagy szórással bár, de befolyásolhatja a FLH indexet. Az így elkülöníthető csoportok alapján a MODIS felvételek közül ki kell választani azt a csoportot, amelyben a FLH index leginkább összefügg a klorofill-a mennyiségével. Palmer és munkatársai (2015b) munkájából feltételezhető, hogy a -2,2 intervallumba eső FLH index értékek mutatnak korrelációt a klorofill-a mennyiségével. Az ettől lényegesen eltérő FLH index érték elképzelhető, hogy a szediment mennyiségével, a víz átlátszatlansága vagy a 13. és 14. csatornák telítettsége miatt adnak nagyságrendileg eltérő

értékeket. Végül 3 felvétel elemzését hajtottam végre, ahol az egyes felvételek kiválasztása az egyes elkülönített csoportok alapján történt. A másik szempont az volt, hogy a szenzor zenitszögének értéke alacsony, a légköri viszonyok pedig kedvezők legyenek, hogy megvizsgáljuk közelebbről az FLH index értékeiben megfigyelhető eltéréseket.



20. ábra Az 1. csatorna radiancia értékei az FLH index függvényében a felhőtlen 2007-2011 évi mintavételi pontokra vonatkozóan a mért klorofill-a tartalom alapján színezve. A keresztábrán jól elkülöníthető csoportok jelennek meg, ahol a 20-40 W/m²/sr/mikrométer radiancia érték közötti -2,2 FLH index értékeket tartalmazó csoport alacsony szórással rendelkezik mindkét műhold esetében. A klorofill-a tartalommal nem figyelhető meg összefüggés.

5.3. Esettanulmányok

Ebben a részfejezetben három kiválasztott áthaladáshoz tartozó felvételt elemzek. Célom, hogy az *in situ* méréseken alapuló pontszerű adatbázisban kiszámított FLH index értékekre felállított csoportokat jobban megértsük az egyes áthaladásokhoz tartozó felvételek egész Balatonra kiterjedő elemzésével. A vizsgálat menete a következő: egyrészt minden egyes kiválasztott áthaladáshoz tartozik egy, az *in situ* mérési adatokat összefoglaló táblázat, amelyben a terepen mért klorofill-a, a MODIS adatok alapján számított FLH index értéke és az előző fejezetekben tárgyalt MODIS produktumokból levezethető paraméterek vannak feltüntetve. Ezután a szenzor 1., 4. és 3. csatornája alapján létrehozott ún. valódi színes RGB kompozit felvétel következik (Kern Anikó feldolgozása nyomán), amit a 13. és a 14. csatorna radiancia értékei, majd a lebegőanyag mennyiségével szorosan összefüggő 1. csatorna és a FLH index egész Balatonra történő térképezése követ. Ahol a valódi színes kompozit felvételeken felhő helyezkedik el, ott az általam előállított felhőmaszkot is megjelenítettem.

Az első vizsgált felvétel a 2008.06.23-ai Terra áthaladáshoz tartozik. A felvételhez tartozó pontszerű adatbázis alapján látható, hogy az FLH értékek -0,39 és 0,1 között változnak, negatív korrelációt mutatva a terepen mért laboratóriumi klorofill értékekkel. Ez egy kora nyári időpont a második algavirágzás előtt és a tavaszi után. A 1. csatorna radiancia értéke, a szenzor zenit szöge, aeroszol optikai mélység és a vízgőztartalom alacsony értékeket vesz fel.

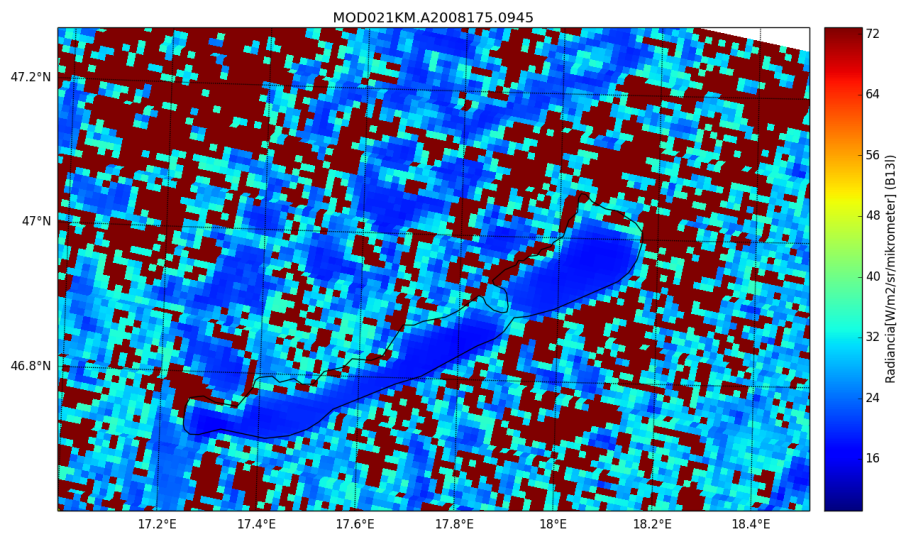
7 táblázat: A 2008.06.23. Terra áthaladáshoz tartozó levezetett attribútumok.

Dátum	Állomás	Chl-a [mg/ m ³]	FLH index	1 csatorna (radiancia)	Szenzor zenit [fok]	AOD	Vízgőz (Infravörös) [kg/m ²]
2008.06.23. 9:45	Keszthely	10	-0,39	21,99	18,06	0,08	2,82
2008.06.23. 9:45	Szigliget	6,3	-0,27	21,89	17,15	0,11	2,86
2008.06.23. 9:45	Szemes	2,2	-0,19	21,29	15,14	0,09	2,87
2008.06.23. 9:45	Siófok	1,5	-0,10	21,78	13,88	0,13	2,81

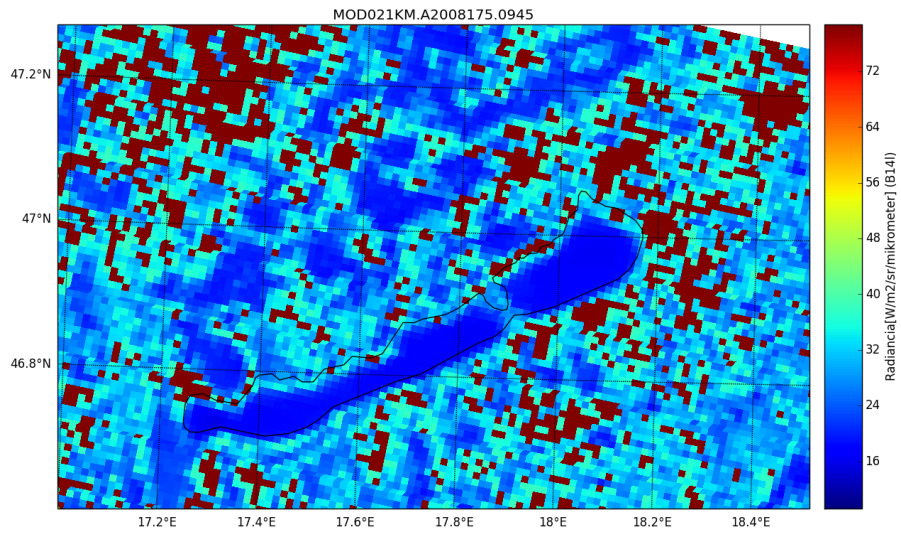
A valódi színes felvétel alapján megfigyelhető egyfajta szisztematikus elszíneződés. A Keszthelyi-medence sötétzöld színű (bár ezt a Zalából bemosódó oldott színes szervesanyag is okozhatja), míg a Siófoki-medencéig átmenetesen vált át kék színbe. Ha megnézzük a táblázatunkat a klorofill-a értékek is ennek megfelelően változnak. A lebegőanyag tartalommal korreláló 1. csatorna értékei a Balaton területén jelentősen nem változnak, a Balaton szélén megjelenő magasabb értékeket tartalmazó pixelek jó egyezést mutatnak a 250 méteres felbontású kompozit felvételeken is megjelenő lebegőanyaggal, illetve a szárazföld közelség miatt vegyes pixelek megjelenésére is visszavezethetők. Az FLH index követi a valódi színes felvételen is megfigyelhető trendet: a Siófoki-medencében nagyobb értékeket vesz fel (tehát kevesebb a klorofill-a tartalom), mint a Keszthelyi-medencében. A 13. és 14. csatorna értékei 0-20 W/m²/str/mikrométer között van, és a teljes Balaton térségére kapunk értékeket.



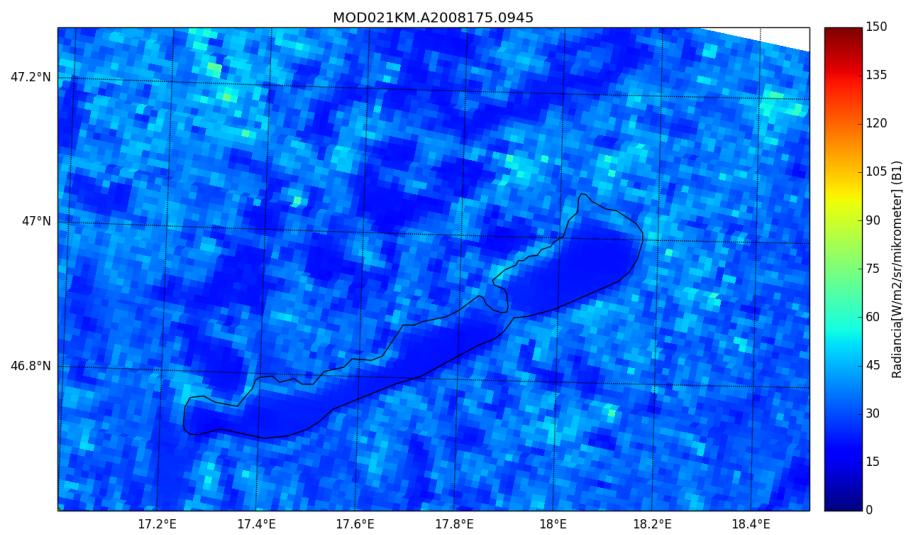
21. ábra A 2008.06.23-ai Terra áthaladáshoz tartozó valódi színes MODIS kompozit kép.



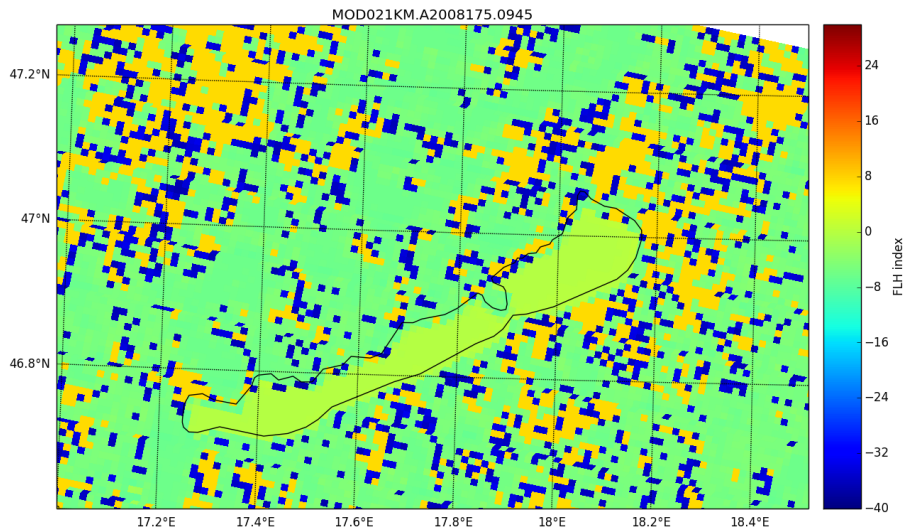
22. ábra A 2008.06.23-ai Terra áthaladáshoz tartozó 13. csatorna radiancia értékei a Balaton térségére.



23. ábra A 2008.06.23-ai Terra áthaladáshoz tartozó 14. csatorna radiancia értékei a Balaton térségére.



24. ábra A 2008.06.23-ai Terra áthaladáshoz tartozó 1. csatorna radiancia értékei a Balaton térségére.



25. ábra A 2008.06.23-ai Terra áthaladáshoz tartozó FLH index értékei a Balaton térségére.

A második felvétel 2008.07.02-kei Terra áthaladáshoz tartozik. A felvétel némileg felhős. A felvételt összevetve a felhőmaszkkal megállapítható, hogy a MOD035 produktumból képzett felhőmaszk a felhők árnyékára és az apró gomolyfelhőkre nézve nem ad pontos eredményt. Azonban az *in situ* adatrendszert megfigyelve, az állapítható meg, hogy lehetséges, hogy a nem pontosan működő felhőmaszk némi szórást okozhat a Keszthelyi-medence FLH index értékeiben, viszont a Szigligeti-medence esetén az FLH index értéke jelentősen eltér az összes többi részmedencétől, amit a klorofill-a adatokban nem figyelhetünk meg.

8 táblázat: 2008.07.02. Terra áthaladáshoz tartozó levezetett attribútumok.

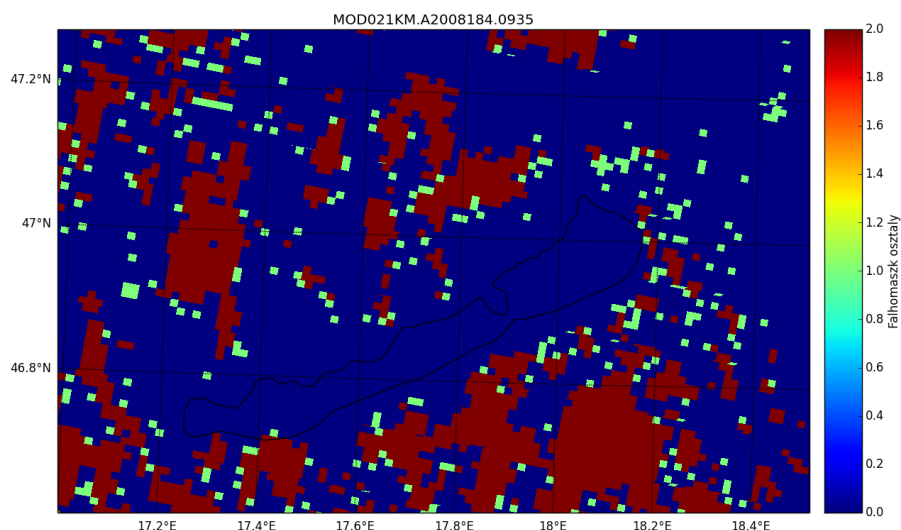
Dátum	Állomás	Chl-a [mg/ m ³]	FLH index	1 csatorna (radiancia)	Szenzor zenit [fok]	AOD	Vízgőz (Infravörös) [kg/m ²]
2008.07.02. 9:35	Keszthely	15,5	-0,38	37,22	27,14	0,26	2,81
2008.07.02. 9:35	Szigliget	13,3	-30,08	42,58	26,32	0,2	3,1
2008.07.02. 9:35	Szemes	7,4	-0,04	33,0	24,47	-	2,06
2008.07.02. 9:35	Siófok	3,7	0,09	30,9	23,28	-	2,81

A Balaton északi és déli partja mentén, illetve a Szigligeti-medence közepén leolvasható extrém alacsony FLH index értékek nem egyeznek a valódi színes felvételen látható felhő vagy vízfelszín mintázatokkal. Mind a Keszthelyi-, mind a Szigligeti-medencében megnő a

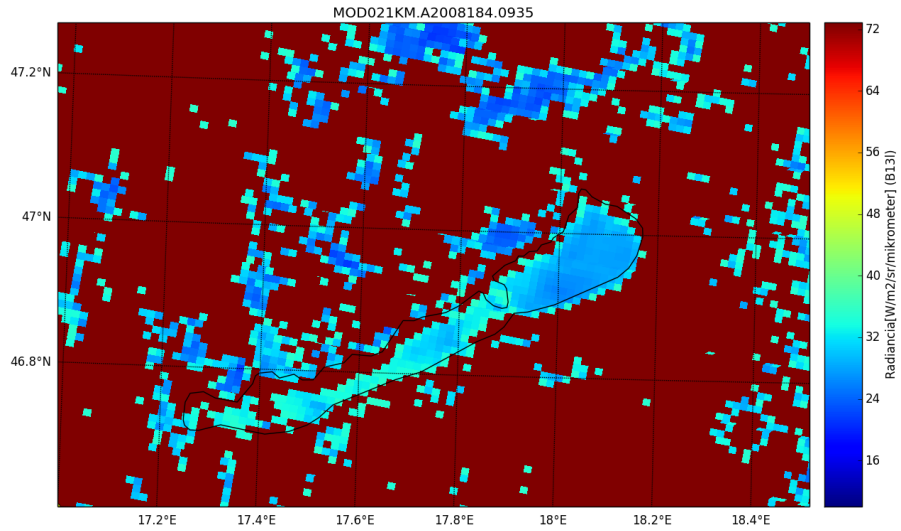
lebegőanyag tartalom mennyiségével korreláló 1. csatorna értéke, míg a Szemesi- és Siófoki-medencére számított FLH index értékek az előző áthaladásnál megfigyelt értékekkel. A valós színezésű képek alapján a Balaton színe a Keszthelyi- és Szigligeti-medence esetén eltér a Szemesi- és Siófoki-medencéhez képest. Viszont a kissé zöldes színű eltérés szürkés elszíneződéssel párosul. Megfigyelve az 1. csatorna alapján készített térképet, a mintázat korrelál ezzel a szürkés elszíneződéssel, így lebegőanyag tartalomként interpretálható. Az FLH index értékeiben is megfigyelhető ez a mintázat, így vizuálisan megállapítható, hogy a lebegőanyag tartalom megnövekedése esetén az FLH index értéke klorofill-a mennyiségétől függetlenül megváltozik.



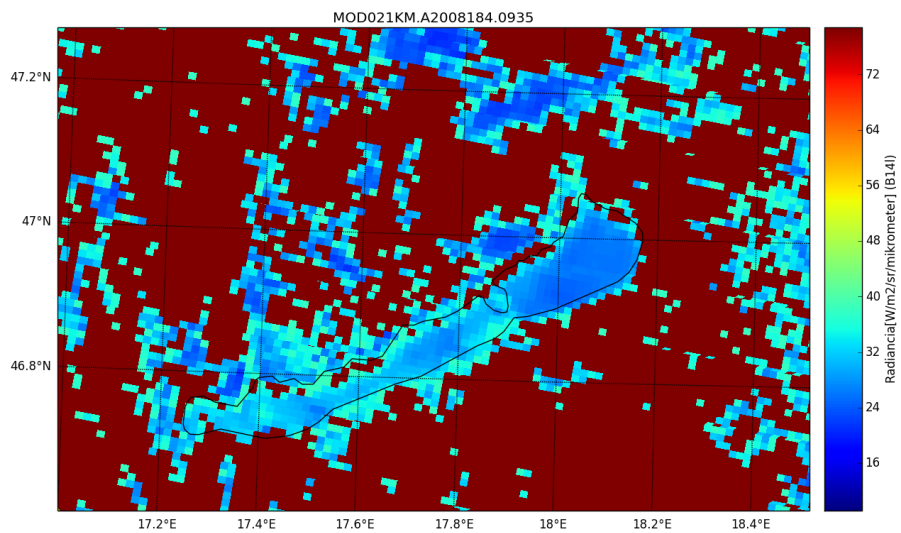
26. ábra: A 2008.07.02. Terra áthaladáshoz tartozó valódi színes felvétel.



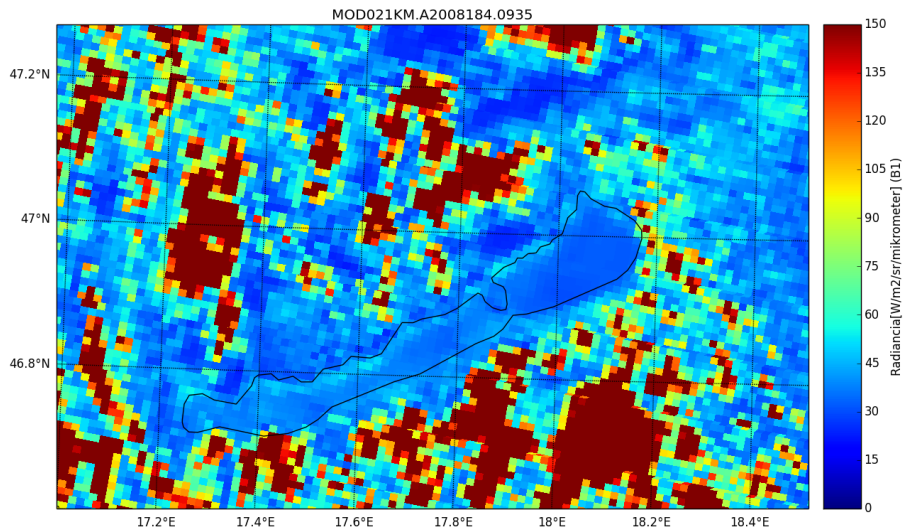
27. ábra: A 2008.07.02. Terra áthaladáshoz tartozó felhőmaszk, mely a felhőárnyék és a gomolyfelhők esetén pontatlanságokat mutat.



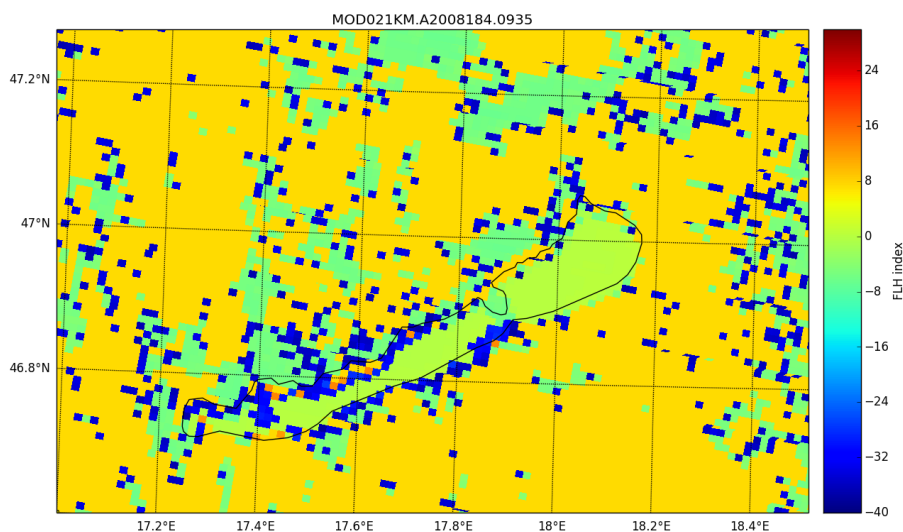
28. ábra: A 2008.07.02. Terra áthaladáshoz tartozó 13. csatorna radiancia értékei. Jól láthatóan 72 W/m²/steradián/mikrométer feletti értékeket vesz fel a Szigligeti- és a Keszthelyi-medence esetén.



29. ábra: A 2008.07.02. Terra áthaladáshoz tartozó 14. csatorna radiancia értékei. A 13. csatornával összehasonlítva kevesebb a vízfelület területén megjelenő 72 W/m²/steradián/mikrométer feletti radiancia.



30. ábra: A 2008.07.02. Terra áthaladáshoz tartozó 1. csatorna radiancia értékei. Szigliget- és Keszthely környékén kisebb pozitív elváltozások figyelhetők meg, ami a lebegőanyag tartalommal lehet összefüggésben.



31. ábra: 2008.07.02. Terra áthaladáshoz tartozó FLH index. Szigligeti- és Keszthelyi-medence környékén megfigyelhetők az igen alacsony (-30) illetve magasabb (+10) FLH index értékek, melyek korrelációt mutatnak az 1. csatorna magasabb illetve a 13. és a 14. csatorna 70 feletti $W/m^2/str/mikrométer$ értékeinek megjelenésével.

A harmadik kiválasztott felvétel a 2007.05.29-ei Terra áthaladáshoz tartozik. Az időpont közel esik a tavaszi algavirágzás időpontjához. Az *in situ* mérésekhez tartozó táblázatot megfigyelve az FLH index értékek a Keszthelyi- és Szigligeti-medence esetén a laboratóriumi klorofill-a tartalommal nem korrelálva magas pozitív értékeket vesz fel, ezzel együtt a 1. csatorna értékei is nagyon magasak, azaz nagy mennyiségű lebegőanyag tartalomra utal. Szemesi- és Siófoki-részmedence esetén az FLH index értékek megfelelőnek tűnnek.

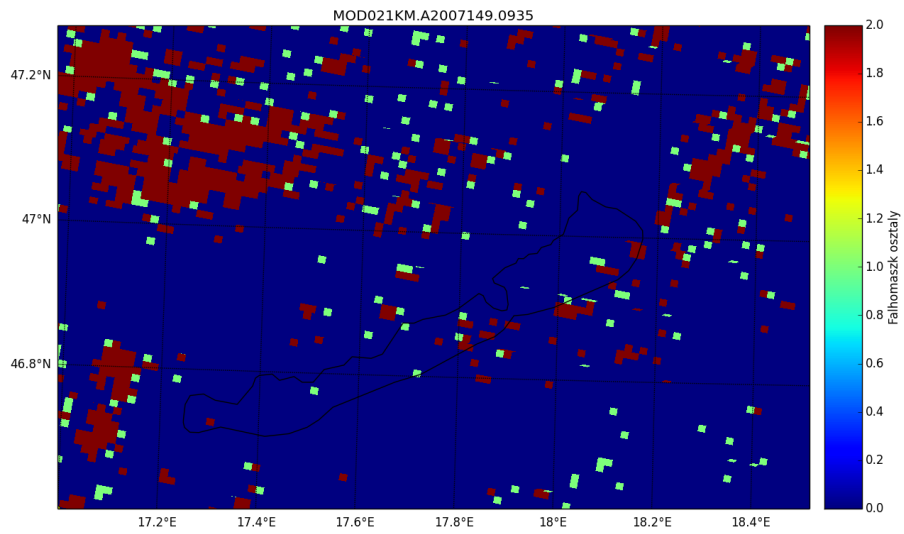
9 táblázat: A 2007.05.29. Terra áthaladáshoz tartozó levezetett attribútumok.

Dátum	Állomás	Chl-a [mg/ m ³]	FLH index	1 csatorna (radiancia)	Szenzor zenit [fok]	AOD	Vízgőz (Infravörös) [kg/m ²]
2007.05.29. 9:35	Keszthely	14,1	12,34	45,01	27,51	0,01 6	2,21
2007.05.29. 9:35	Szigliget	9,6	12,43	50,02	26,68	-	2,217
2007.05.29. 9:35	Szemes	8,9	-0,06	37,06	24,83	0,38	2,27
2007.05.29. 9:35	Siófok	5,2	0,49	35,90	23,64	-	2,34

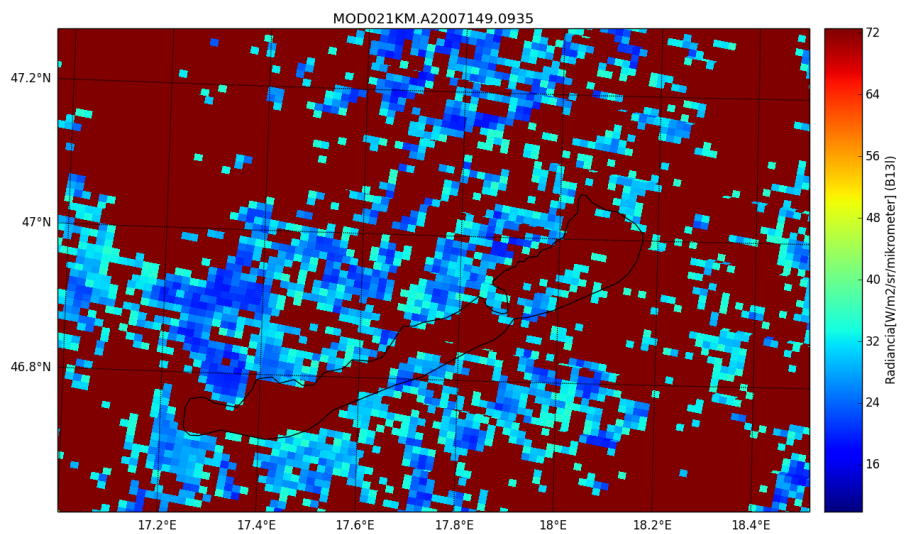
A valódi színes képet vizsgálva jól látható a lebegőanyag tartalom okozta elszíneződés, amely a Szigligeti-medencénél jól megfigyelhetően elnyomja a sötétzöldes elszíneződést. Ez feltehetően az algavirágzáshoz tartozhat, de összefügghet megint csak az oldott színes szervesanyagok bemosódásával is, a déli parti berkekből. A szemesi részmedence esetén az apró gomolyfelhők okozhatnak az FLH értékekben hibát. A 1. csatorna és az FLH index térbeli elterjedése azonos mintázatot követ, így ez alapján a felvétel alapján is kijelenthető, hogy a 1. csatorna befolyásolja az FLH értékeket. Továbbá, itt is megfigyelhető, hogy az előzővel ellentétben itt, a -30 helyett pozitív irányban térnek el a 0 körüli értékektől az FLH index értékei. Ha jól megfigyeljük, akkor a FLH indexnél, ahol a 1. csatorna értékei alacsonyabbak lesznek, ott egy sávban figyelhetőek meg a -30 körüli értékeket tartalmazó FLH index értékek. Az is megfigyelhető, hogy a sötétzöld elszíneződés már teljes mértékben 0 érték körüli FLH index értéket jelent.



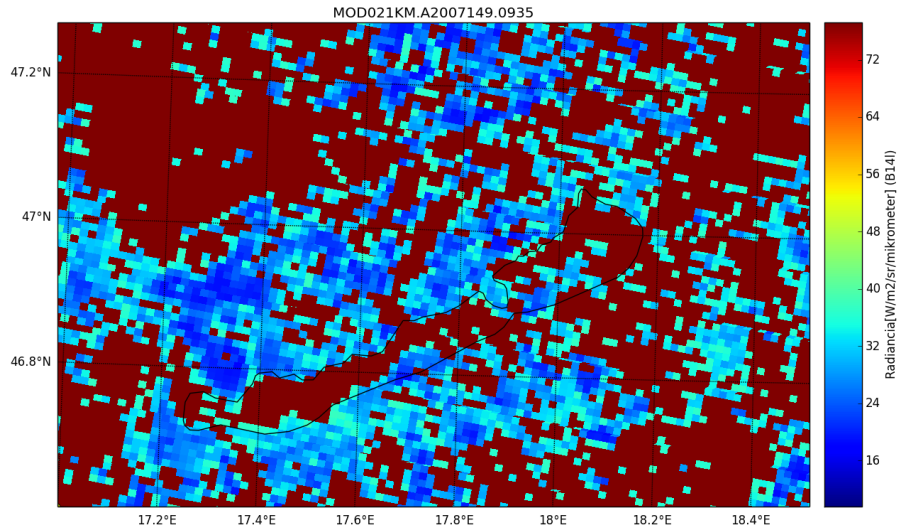
28. ábra: A 2007.05.29-ei Terra áthaladáshoz tartozó valódi színes felvétel.



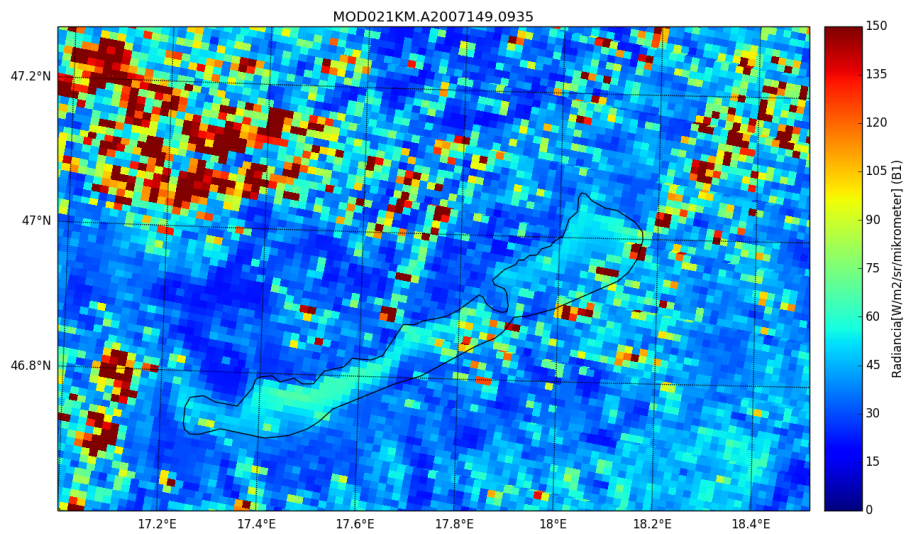
29. ábra: 2007.05.29. Terra áthaladáshoz tartozó felhőszak, mely gomolyfelhőket pontatlan.



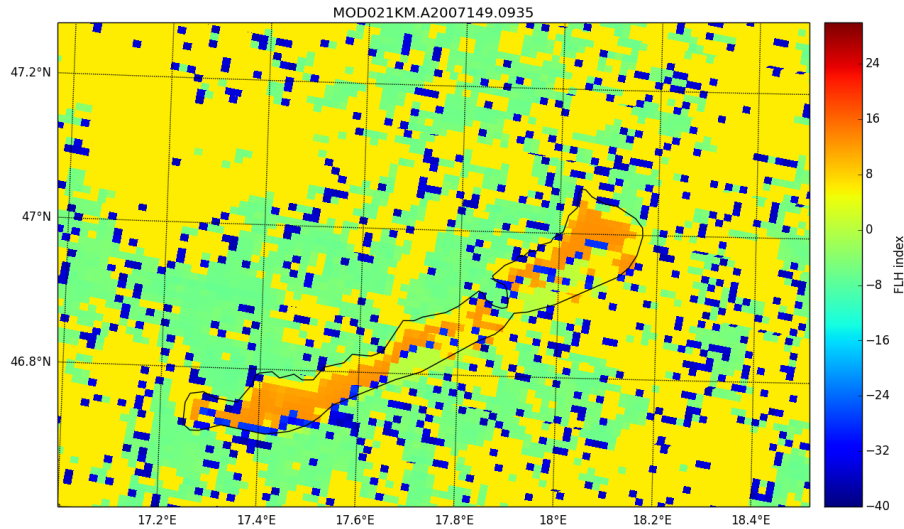
30. ábra: A 2007.05.29. Terra áthaladáshoz tartozó 13. csatorna radiancia értékei közel az egész vízfelület esetén 70 W/m²/steradián/mikrométer felettek.



31. ábra: 2007.05.29. Terra áthaladáshoz tartozó 14. csatorna radiancia értékei. A 13. csatorna értékeivel azonosan ritkán vesz fel alacsony radiancia értékeket.



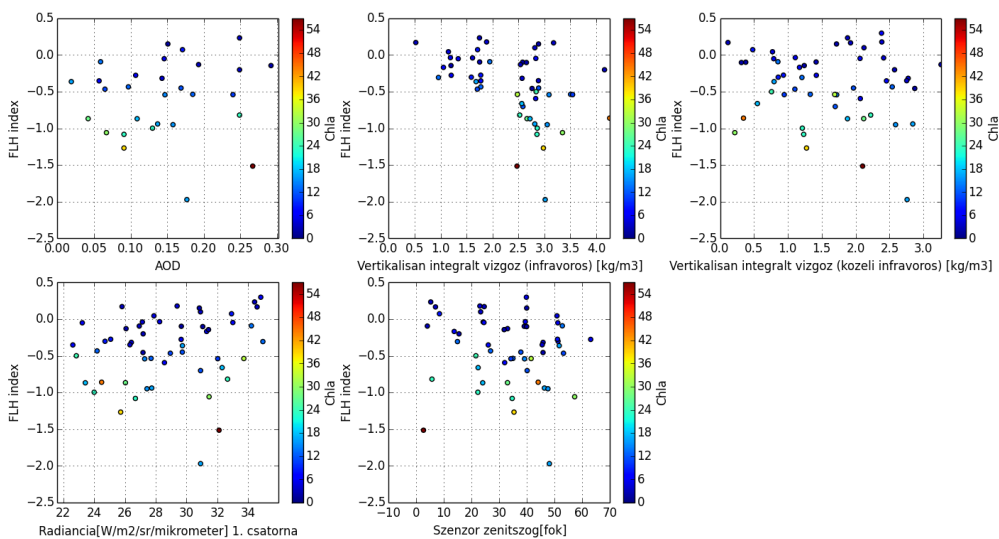
32. ábra: A 2007.05.29. Terra áthaladáshoz tartozó 1. csatorna radiancia értékei. A Szigligeti-, Keszthelyi- illetve a Siófoki-medence keleti szélén magasabb értékeket vesz fel. A mintázat korrelál a 13. és a 14. csatornán megfigyelhető mintázattal.



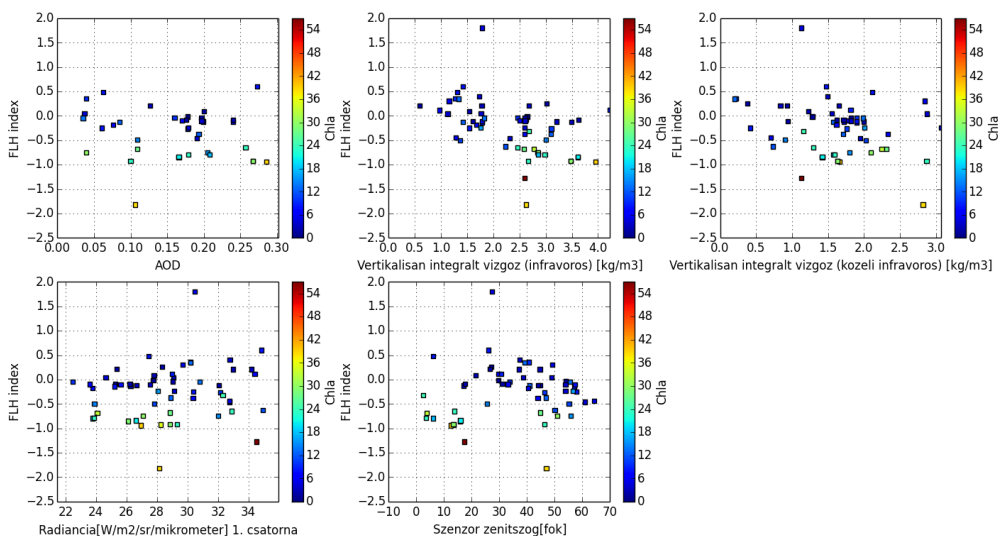
33. ábra: A 2007.05.29. Terra áthaladáshoz tartozó FLH index értékei Ahol a 13. 14. és 1. csatorna értékei magasak, ott 8 körüli értékeket vesz fel a FLH index, ezenkívül a 0 körüli FLH értékek jellemzőek.

5.4. Adatrendszer kalibrációja

Az esettanulmányok alapján levonható a következtetés, hogy az 1. csatorna értékei befolyásolják az FLH index értékeit, így első lépésként a 1. csatorna alapján szükséges szűrési feltételt bevezetni. Ezenkívül megfigyelhető, hogy a 13. és 14. csatorna értékei is a 1. csatorna értékeivel korrelálnak. Megállapítható, hogy a klorofill-a tartalommal korreláló értékek a 0 körüli FLH index csoportba tartoznak. Ezt alátámasztja Palmer és munkatársainak munkája (2015b), ahol a MERIS adatok esetén szintén 0- -4 közötti értékeket vett fel az FLH index. A szűrési feltétel bevezetése után: 1. csatorna radiancia értékei 20 W/m²/str/mikrométer-40 W/m²/str/mikrométer intervallumban helyezkedjenek el. Az így kapott adatrendszert megvizsgálva az egyes geometriai és légköri paraméterekkel történő összefüggést, megállapítható, hogy szisztematikus összefüggés nem fedezhető fel, így ezen paraméterek alapján további szűrési feltéteket nem vezettem be.

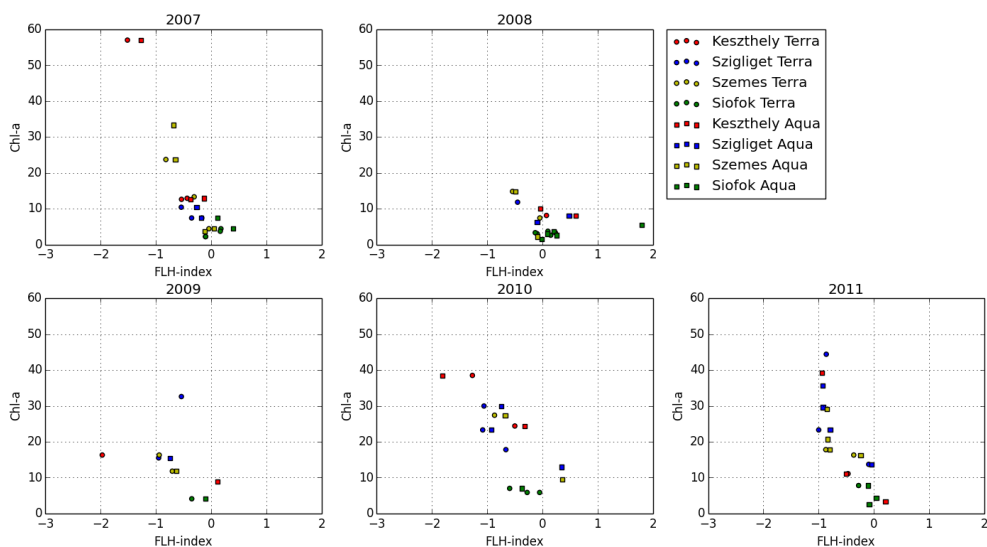


38. ábra: A szűrési feltételrendszer bevezetése után kapott Terra műholdhoz tartozó adatpontok keresztmetszeti diagramjai az egyes levezetett paraméterek (AOD, kétféleképpen számított vertikálisan integrált vizgöz, 1. csatorna és szenzor zenitszög) az FLH index függvényében a klorofill-a tartalom alapján színezve.



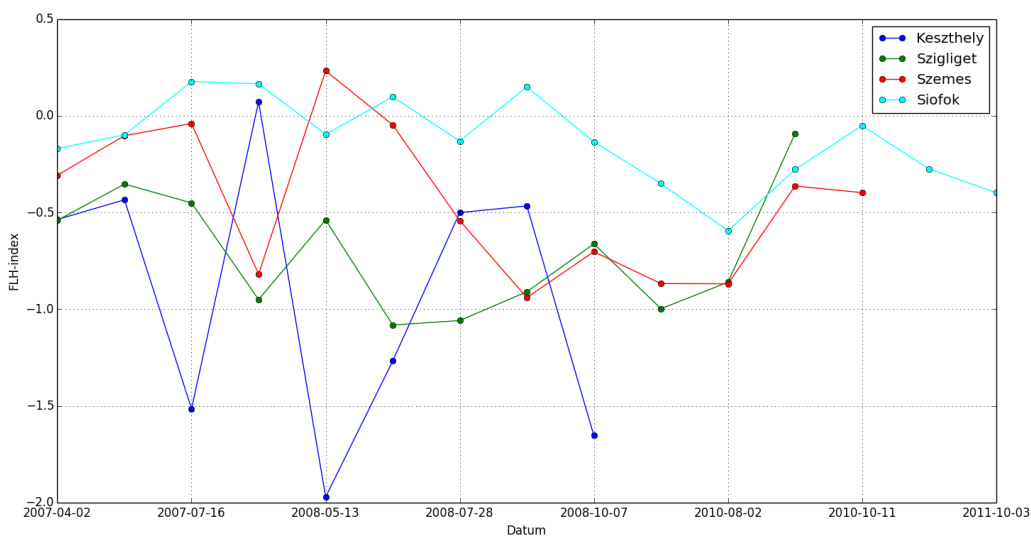
39. ábra: A szűrési feltételrendszer bevezetése után kapott Aqua műholdhoz tartozó adatpontok keresztmetszeti diagramjai az egyes levezetett paraméterek (AOD, kétféleképpen számított vertikálisan integrált vizgöz, 1. csatorna és szenzor zenitszög) az FLH index függvényében a klorofill-a tartalom alapján színezve.

Az FLH index klorofill-a mennyiségének függvényében ábrázolva két fontos dolog figyelhető meg. Az egyik, hogy vannak kilógó értékek -1,5-nél kisebb illetve 0,5-nél magasabb FLH értékekkel. A 2011-es keresztmetszeti diagram esetén megfigyelhető egy párhuzamos görbe megjelenése a nagyrészt lineáris összefüggés mellett. Második megfigyelés, hogy a Terra és Aqua értékek szisztematikusan eltérnek egymástól (Franz et al.,2008).

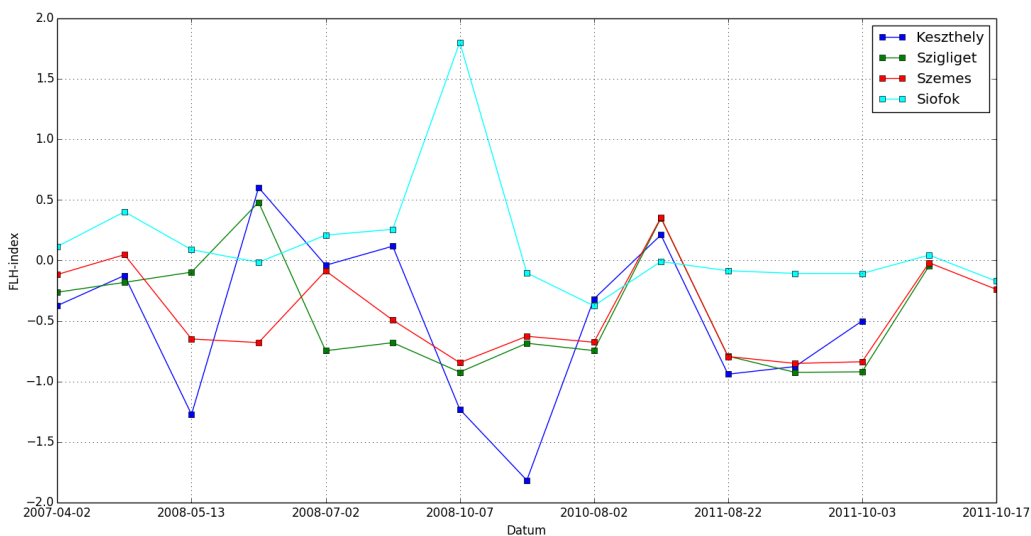


40. ábra: A szűrési feltételrendszer alkalmazása után kapott FLH index klorofill-a tartalom függvényében az egyes vizsgált évekre.

Ezután a szűrési feltétel alkalmazása után megmaradt adatpontokra műholdanként vizualizáltam az FLH index változását az idő függvényében. A 41. és 42. ábrán jól megfigyelhető, hogy a Siófoki-medence esetén a FLH index változása más intervallum között mozog, mint a Keszthelyi-medence esetén, mely jól korrelál a Balaton eltérő trofikus jellegével. Az Aqua műhold Siófoki-medencére számolt 2008.10.07. áthaladáshoz tartozó FLH index érték az átlagtól eltérő magas értéket vesz fel, mely ugyanezen dátumhoz tartozó Terra esetén -0,2 FLH érték jelenik meg. Ezt az adatpontot *outlier*ként jelöltem meg.



41. ábra: A szűrt FLH index értékeinek változása az idő függvényében a Terra műhold esetén.

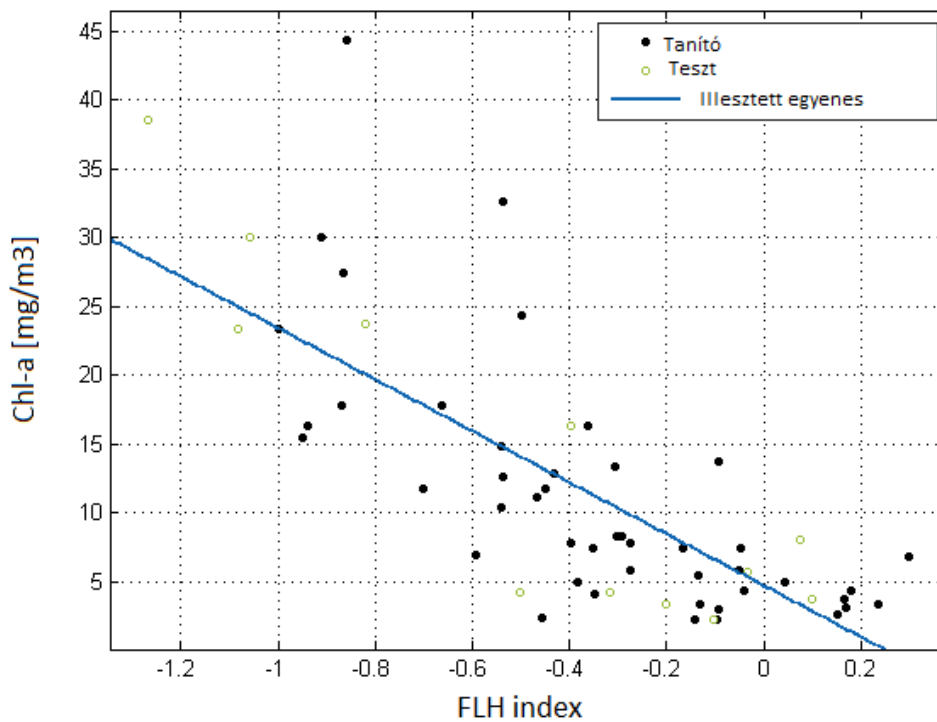


42. ábra: A szűrt FLH index értékeinek változása az idő függvényében az Aqua műhold esetén.

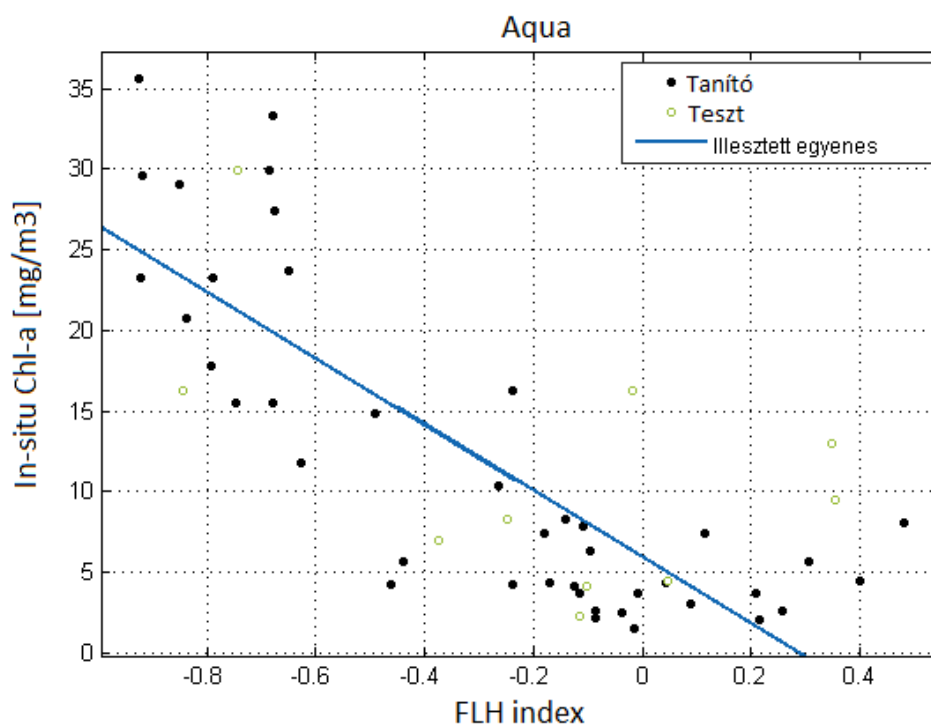
Az így előállított adatrendszerre egyenes illesztést végeztem a biofizikai apriori ismeretek és a keresztábrák vizuális vizsgálata alapján. A lineáris illesztést külön végeztem el a Terra és Aqua műhold adataira és a kapott illesztés eredményét 10. táblázatban foglaltam össze. Random módon szétválasztottuk az adatpontok 80%, illetve 20%-át, a nagyobbik részt az összefüggés kalibrációjára használtuk, majd ezt a függvényt az adatok validációjára elkülönített 20%-án alkalmazva vizsgáltuk a műholdas adatok alapján becsült és a terepen mért klorofill-a koncentrációkat. Az illesztés eredménye a Terra esetén 0,5 R^2 -nek és 8,63 RMS-nek (Root Mean Square) adódott, míg az Aqua esetén 0,67-nek az R^2 és 5,85-nek az RMS.

10. táblázat: Egyenes illesztésből kapott eredmények.

Egyenes egyenlete	Állomások	Műhold	R^2	RMS	Validáció RMS
$-18,05 \cdot FLH + 5,924$	Összes	Terra	0,50	8,63	4,78
$-20,52 \cdot FLH + 5,899$	1 Siófoki adat nélkül	Aqua	0,67	5,857	8,05647



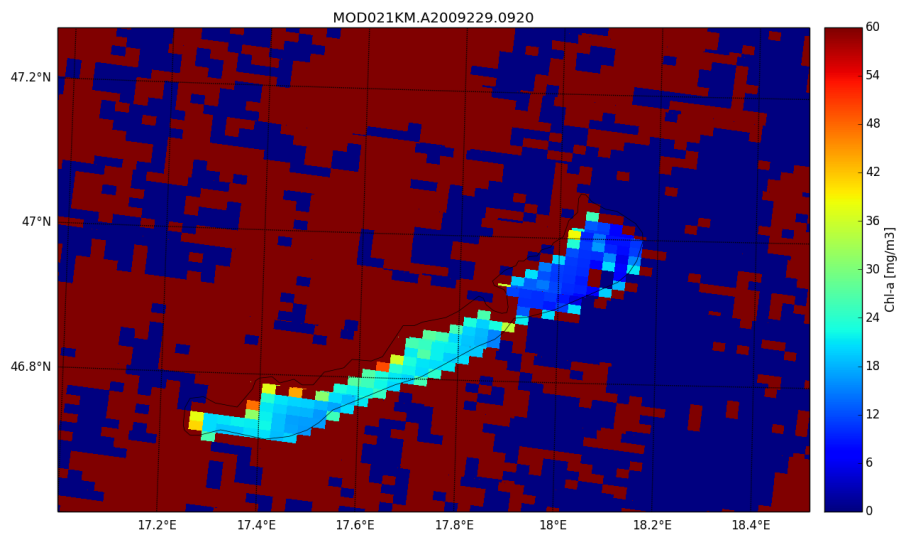
43. ábra: Terra műhold esetén a lineáris illesztés eredménye ($r^2=0,5$). Az ábrán feketével a tanító (80%) zölddel a teszt (20%) adatpontok vannak jelölve.



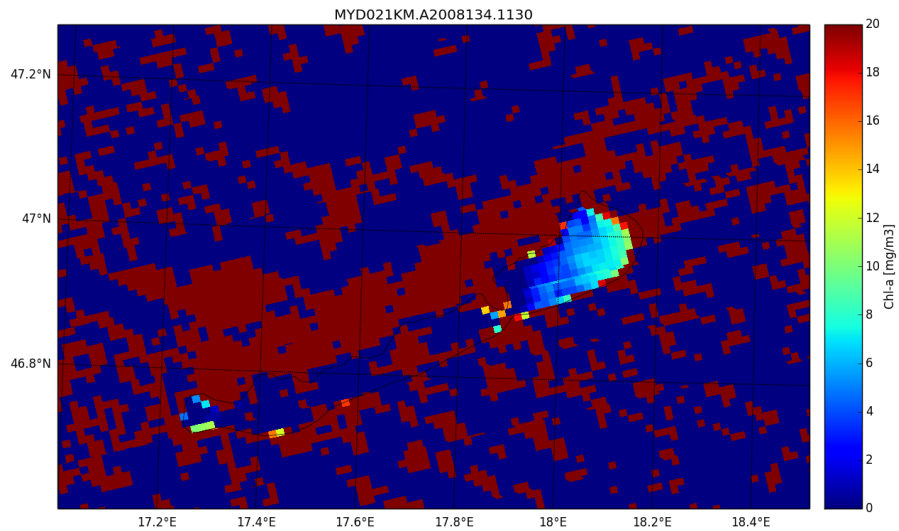
44. ábra: Aqua műhold esetén a lineáris illesztés eredménye ($r^2=0,67$). Az ábrán feketével a tanító (80%) zölddel a teszt (20%) adatpontok vannak jelölve.

Az így kapott kalibrációs egyenlet alkalmas a MODIS felvételek klorofill-a mennyiségének kimutatására, azoknál a felvételeknél, ahol a 1. csatorna értéke 22-40 W/m²/str/mikrométer

radiancia értékek közé esik és a légköri körülmények is megfelelőek. Az illesztéssel kapott eredmények használatát elsőként a 2009.08.17-ei Terra felvételen teszteltem. Az előállított klorofill-a térképen jól kirajzolódik a Balaton eltérő trofikus tulajdonságai. Keszthelynél magas a klorofill-a tartalom értéke és ez fokozatosan csökken a Siófoki-medencéig, amely egy lényegesen kisebb külső tápanyagterhelést kap, és ezért átlagosan alacsonyabb klorofill-a tartalommal bír. Másodikként a 2008.05.13-ei Aqua áthaladáshoz tartozó felvételt jelenítettem meg, ahol a Szigligeti- és a Keszthelyi-medence esetén az 1. csatorna radiancia értékei nem estek a 20-40 W/m²/str/mikrométer közötti tartományba, itt csak a Siófoki-medence esetén kapunk klorofill-a tartalom monitorozására alkalmas adatokat.

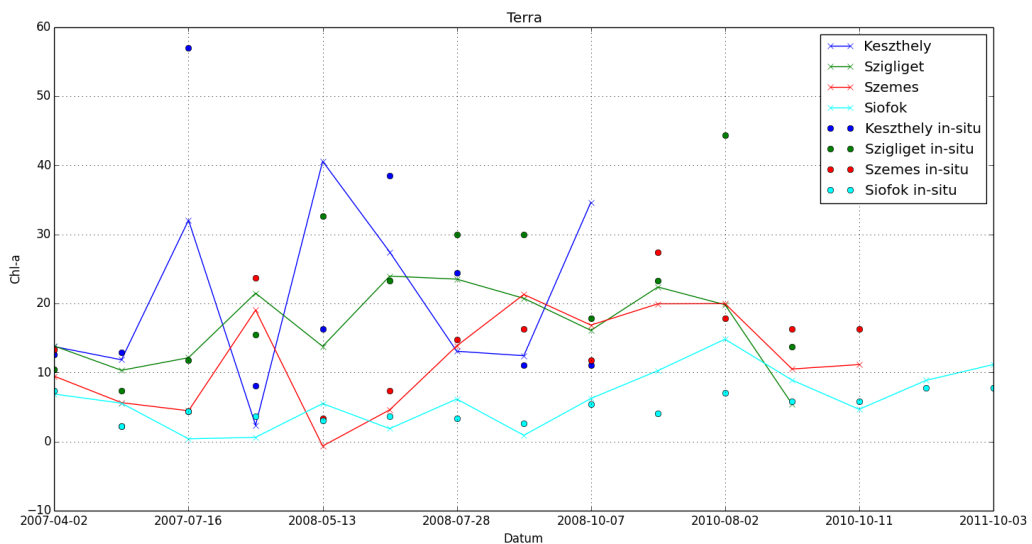


45. ábra: A 2008.08.17. Terra áthaladáshoz tartozó a kalibrált illesztett egyenes egyenlete alapján számított klorofill-a térkép. Jól látható a Keszthelyi-medence magasabb klorofill-a értékei fokozatosan csökken le a Siófoki-medencéig.

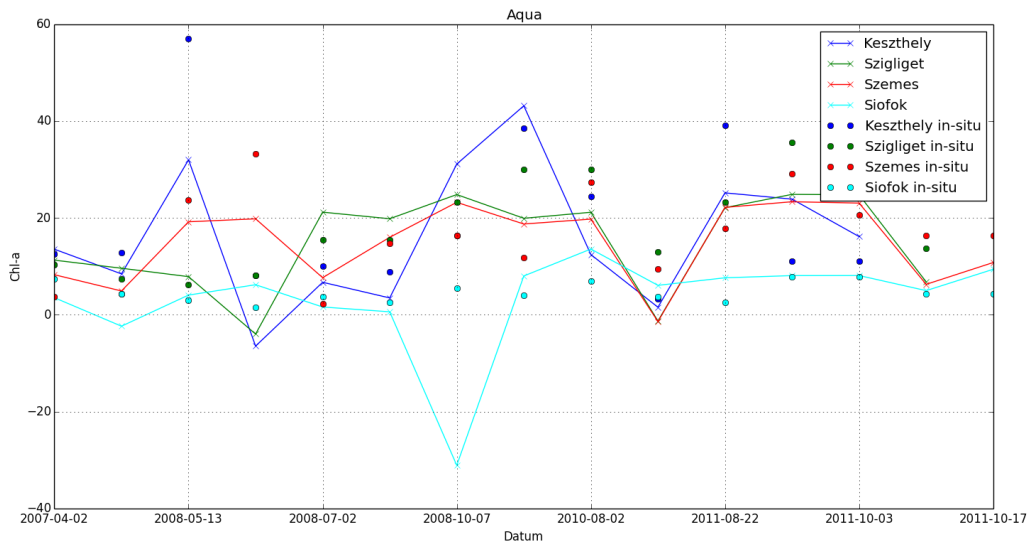


46. ábra: A 2008.05.23. Aqua áthaladáshoz tartozó a kalibrált illesztett egyenes egyenlete alapján számított klorofill-a térkép. A Keszthelyi-és Szigligeti- medencére nem kapunk értelmezhető klorofill-a értékeket a magasabb lebegőanyag tartalom miatt.

Végül a tiszta, használható felvételek esetén az idő függvényében ábrázoltam a 47. és 48. ábrán a Terra és Aqua műholdakra az egyes adatpontokra vonatkozó FLH indexből számított és a terepen mért klorofill-a értékeket. Megállapítható, hogy a kalibráció nem kezeli megfelelően a magas klorofill-a értékeket.



47. ábra: A 2007-2011 in situ mért és számított klorofill-a értékek alacsony 1. csatorna radiancia értékek és megfelelő időjárási viszonyokhoz tartozó Terra adatok alapján.



48. ábra: A 2007-2011 in situ mért és számított klorofill-a értékek alacsony 1. csatorna radiancia értékek és megfelelő időjárási viszonyokhoz tartozó Aqua adatok alapján.

6. Konklúzió

A diplomadolgozat célkitűzése a MODIS műszer adatainak a Balaton klorofill-a tartalmának becslésére alkalmas kalibráció tesztelése és működésének vizsgálata volt a hivatalos NASA produktumok és a Balatonra 2007-2011 között történt terepi klorofill-a mérési adatbázis felhasználásával. Ezt az igényt a mind térben, mind időben limitált *in situ* mérések keltették, hiszen a jobb tér- és időbeli felbontású műholdas adatok lehetőséget nyújthatnak a tó további monitorozásához. A kalibrációs eljárás felállításának célja a 2012-2016 közötti MERIS és Sentinel-3 műholdak közötti adathiány pótlása. A MODIS csatorna kiosztása és felbontása nem optimális a klorofill-a tartalom meghatározására, így a dolgozatban a klorofill-a becslését tűztük ki célul.

A Balaton a vízminőség monitorozása szempontjából 2. típusú vizekhez tartozik, ennek megfelelően a vízminőség monitorozás szempontjából a fitoplankton mennyisége mellett a lebegőanyag és az oldott színes szerves anyag tartalom is nagy mértékben befolyásolhatja a klorofill-a meghatározását. Ezenkívül a 2-es típusú vizek esetén a légköri korrekció elvégzése összetett feladat, így a dolgozatban egy robusztus empirikus algoritmus alkalmazásának tesztelését jelöltük ki, ahol a mért és a felvételek alapján számított index között statisztikai összefüggéseket kerestem és ez alapján állítjuk fel a felvételekből számítható klorofill-a mennyiségét meghatározó algoritmust. Palmer és munkatársai (2015b) MERIS adatokra elvégzett kalibrációs eredményeit apriori ismeretként kezeltük, és a szakirodalom, illetve a MERIS-re vonatkozó eredmények alapján a FLH index tesztelését hajtottuk végre a létrehozott adatbázis (2007-2011 év műholdas és felszíni monitoring adatai) segítségével. Az FLH index a Gower és munkatársai munkája (2004) alapján MODIS-ra optimalizált $(B14 - 0.860 * B13 - (1 - 0.860) * B15)$ empirikus összefüggés alapján került kiszámításra.

Az adatok feldolgozása a NASA FTP klienséről terepi mérési napokra letöltött kalibrált radianciákat, geolokációs, szenzor és nap zenit szögeit, aeroszol optikai mélységet, teljes légkörre integrált vízgőztartalmat és a felhőmaszkot tartalmazó MODIS produktumok alapján történt. A feldolgozás során egy adatbázist építettem fel, mely a geolokalizált raszteres adatállományokból a mérési pontok földrajzi koordinátái alapján egy az 1-19 csatornák kalibrált radiancia értékeit, az áthaladás dátumát, helyszínét, terepen mért klorofill-a tartalmat, szenzor és Nap azimut- illetve zenitszögeit, aeroszol optikai mélységet, infravörös

és közeli infravörös hullámhossz tartományban mért vízgőztartalmat és felhőmaszkt tartalmazta, mely így a kiinduló adatrendszere lett a kalibrációnak.

Az adatokból származtatott FLH indexet és ennek a klorofill-a tartalommal való összefüggését vizsgálva a felhőmaszk alkalmazása után négy csoportra különültek el az adataink az FLH index értékei szerint. Az adatok vizsgálata és a kiválasztott felvételek esettanulmánya alapján megállapítottam, hogy az FLH index értékei az 1. csatorna értékeivel mutatnak összefüggést, és megfelelő szűrési feltétel beállítása után közel negatív lineáris összefüggést kapunk az FLH index és a klorofill-a értékek között. A geometriai és légköri produktumokat vizsgálva megállapítható, hogy ezen paraméterek alapján újabb szűrési feltételként bevezethető összefüggést nem találtam.

Az így létrehozott FLH index a klorofill-a kereszt diagramokon szisztematikus eltérés figyelhető meg a Terra és Aqua műholdakra, ezért a kalibrációt a két műholdra külön-külön végeztem el 48-53 minta alapján. A lineáris illesztés eredménye a Terra esetén 0,5 R^2 -nek az Aqua esetén 0,67 R^2 -nek adódott. Az összefüggés egyezést mutat a biofizikai ismeretekkel, azonban használatának továbbra is feltétele, hogy a légköri körülmények jók legyenek, illetve a tó vizének lebegőanyag-tartalma alacsony legyen. Mindkét feltétel teljesülése vizsgálható közvetlenül a műholdas adatokból. Azonban a kalibráció pontatlanságokat mutat nagyon magas kiugró klorofill-a értékek esetén, mivel az egyenes illesztés során ezen *in situ* mérésekhez tartozó MODIS felvételek nem voltak alkalmasak a kalibrációra. Szükséges lenne tehát a 2007 előtti és 2011 utáni időszakhoz tartozó terepi mérések alkalmazása a kalibrációban. A négy részmedence eltérő tipikus trofikus jelleggel bír, így megfelelő *in situ* mérés mintaszámmal lehetséges lenne az egyes részmedencékre egy pontosabb kalibráció felállítása.

A kalibrált eljárás a kutatás jelenlegi állása szerint is alkalmas azonban a Balaton klorofill-a koncentrációjának térképezésére, a kapott eredmények megbízható értelmezéséhez azonban vizsgálni kell az egyidejű valós színes felvételt, a felhőmaszk adatait és az 1. csatorna értékeit, ahogy azt az esettanulmányokban bemutattuk.

Ezzel együtt a felállított kalibrációs eredmény csak a szűrési feltételek teljesülése esetén tekinthető teljesen megbízhatónak egy valós idejű monitorozó eljárás felállításához. A jelenleg is rendszeresen gyűjtött terepi vízminőség monitoring adatok egyidejű használata azonban lehetővé tenné azok extrapolációját térben és időben. A jelenleg kéthetente, négy ponton gyűjtött adatokat ki lehetne egészíteni az egész tavat kilométer felbontással lefedő,

akár naponta többször is előállítható, de természetesen kevésbé pontos klorofill-a térképekkel. Így a kidolgozott módszer már a jelen állapotában is komolyan hozzájárulna a Balaton ökológiai folyamatainak minél teljesebb megértéséhez.

7. Köszönetnyilvánítás

Szeretnék köszönetet mondani azoknak, akik nélkül ez a dolgozat nem jött volna létre. Először is köszönöm Zlinszky Andrásnak, a tihanyi szakmai gyakorlatokért, másrészt az utolsó hónapok folyamán kapott sok segítségéért, javításokért és szakmai útmutatásáért. Másodszor szeretnék köszönetet mondani, Kern Anikónak, aki nélkül ez a dolgozat nem lett volna leadva. Köszönöm a türelmét, az utolsó pillanatban nyújtott segítségét és hogy mindig észrevette a lappangó hibákat, legyen szó scriptbeli, vagy a radiancia értékek okozta furcsaságokról. Harmadszor szeretném megköszönni Stephanie Palmernek, aki elindított a témában és a szakirodalmat a kezembe adta, illetve rendelkezésemre állt a kérdéseim esetén. És végül nem utolsó sorban szeretném megköszönni az heidelbergi LRG kutatócsoportnak, hogy támogatták a dolgozat létrejöttét és mindig szívesen végig hallgatták a témában felmerülő zsákutcákat.

8. Irodalomjegyzék

1. CHAVULA, G., BREZONIK, P., THENKABAIL, P., JOHNSON, T. and BAUER, M. (2009). Estimating chlorophyll concentration in Lake Malawi from MODIS satellite imagery. *Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C* 34, 755-760.
2. FRANZ, B. A., KWIATOWSKA, E. J., MEISTER, G. and MCCLAIN, C. R. (2008). Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer on Terra: limitations for ocean color applications. *Journal of Applied Remote Sensing*.
3. GAO, B.-C. and KAUFMAN, Y. J. (1998). The MODIS near-IR water vapor algorithm. Product ID: MOD05 - Total precipitable water. Algorithm Technical Background Document ATBDMOD-03. (Internet elérhetőség: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod03.pdf).
4. GITELSON, A. A., GRITZ Y FAU - MERZLYAK, M. N. and MERZLYAK, M. N. (2003). Relationships between leaf chlorophyll content and spectral reflectance and algorithms for non-destructive chlorophyll assessment in higher plant leaves. *Journal of Plant Physiology* 160, pp. 271–282.
5. GORDON, H. R. A. M., A. (1983). Remote Assessment of Ocean Color for Interpretation of Satellite Visible Imagery. A Review. In N. K. M. R. T. Barber, M. J. Bowman and B. Zeitzschel (ed) *Lecture Notes on Coastal and Estuarine Studies*. New York: Springer-Verlag.
6. GOWER, J. F. R., BROWN, L. and BORSTAD, G. A. (2004). Observation of chlorophyll fluorescence in west coast waters of Canada using the MODIS satellite sensor. *Canadian Journal of Remote Sensing* 30, 17-25.
7. GOWER, J. F. R., DOERFFER, R. and BORSTAD, G. A. (1999). Interpretation of the 685nm peak in water-leaving radiance spectra in terms of fluorescence, absorption and scattering, and its observation by MERIS. *International Journal of Remote Sensing* 20, 1771-1786.
8. HERODEK, S., LACKÓ, L., & VIRÁG, Á. (1988). Lake Balaton research and management.
9. HUNTER, P. D., TYLER, A. N., CARVALHO, L., CODD, G. A. and MABERLY, S. C. (2010). Hyperspectral remote sensing of cyanobacterial pigments as indicators for cell populations and toxins in eutrophic lakes. *Remote Sensing of Environment* 114, 2705-2718.

10. IOCCG (2000). Remote sensing of ocean colour in coastal, and other optically-complex waters. In S. Sathyendranath (ed) Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. Dartmouth, Canada: IOCCG, pp. 140 pp.
11. IOCCG (2006). Remote sensing of inherent optical properties: Fundamentals, tests of algorithms, and applications. In Z. P. Lee (ed) Reports of the International Ocean-Colour Coordinating Group. Dartmouth, Canada IOCCG, pp. 122 pp.
12. IWAMURA, T., NAGAI, H. and ICHIMURA, S.-E. (1970). Improved Methods for Determining Contents of Chlorophyll, Protein, Ribonucleic Acid, and Deoxyribonucleic Acid in Planktonic Populations. *Internationale Revue der gesamten Hydrobiologie und Hydrographie* 55, 131-147.
13. KERN, A. (2011). NDVI vegetációs index előállítása távérzékelte AVHRR és MODIS adatok alapján *Természettudományi Kar, Meteorológiai Tanszék* Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem.
14. MATTHEWS, M. W. (2011). A current review of empirical procedures of remote sensing in inland and near-coastal transitional waters. *International Journal of Remote Sensing* 32, 6855-6899.
15. MEISTER, G. and FRANZ, B. A. (Year). Adjustments to the MODIS Terra radiometric calibration and polarization sensitivity in the 2010 reprocessing. *Proceedings of*, 815308-815308-815312.
16. MILLER, R. L. and MCKEE, B. A. (2004). Using MODIS Terra 250 m imagery to map concentrations of total suspended matter in coastal waters. *Remote Sensing of Environment* 93, 259-266.
17. MOREL, A. (1980). In-water and remote measurements of ocean color. *Boundary-Layer Meteorology* 18, 177-201.
18. MOREL, A. and PRIEUR, L. (1977). Analysis of variations in ocean color1. *Limnology and Oceanography* 22, 709-722.
19. MOSES, W. J., GITELSON, A. A., BERDNIKOV, S. and POVAZHNYI, V. (2009). Estimation of chlorophyll- a concentration in case II waters using MODIS and MERIS data— successes and challenges. *Environmental Research Letters* 4, 045005.
20. MÓZES, A., PRÉSING, M. and VÖRÖS, L. (2006). Seasonal Dynamics of Picocyanobacteria and Picoeukaryotes in a Large Shallow Lake (Lake Balaton, Hungary). *International Review of Hydrobiology* 91, 38-50.

21. NASA,(2015a). MODIS data products website (Internet elérhetőség: <http://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataproduct/>).
22. NASA, (2015b). NASA's Earth Observing System Data and Information System (Internetes elérhetőség: <http://reverb.echo.nasa.gov>).
23. NASA, (2015c). SeaDAS website (Internet elérhetőség <http://seadas.gsfc.nasa.gov/>).
24. ODERMATT, D., GITELSON, A., BRANDO, V. E. and SCHAEPMAN, M. (2012). Review of constituent retrieval in optically deep and complex waters from satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* 118, 116-126.
25. PADISÁK, J. (2005). Általános limnológia. Budapest: ELTE EÖTVÖS Kiadó.
26. PALMER, S. C. J., KUTSER, T. and HUNTER, P. D. (2015a). Remote sensing of inland waters: Challenges, progress and future directions. *Remote Sensing of Environment* 157, 1-8.
27. PALMER, S. C. J., HUNTER, P. D., LANKESTER, T., HUBBARD, S., SPYRAKOS, E., N. TYLER, A., PRÉSING, M., HORVÁTH, H., LAMB, A., BALZTER, H. and TÓTH, V. R. (2015b). Validation of Envisat MERIS algorithms for chlorophyll retrieval in a large, turbid and optically-complex shallow lake. *Remote Sensing of Environment* 157, 158-169.
28. PALMER, S. C. J., ODERMATT, D., HUNTER, P. D., BROCKMANN, C., PRÉSING, M., BALZTER, H. and TÓTH, V. R. (2015c). Satellite remote sensing of phytoplankton phenology in Lake Balaton using 10 years of MERIS observations. *Remote Sensing of Environment* 158, 441-452.
29. PRIEUR, L. and SATHYENDRANATH, S. (1981). An optical classification of coastal and oceanic waters based on the specific spectral absorption curves of phytoplankton pigments, dissolved organic matter, and other particulate materials. *Limnology and Oceanography* 26, 671-689.
30. REMER, L. A., TANRÉ, D., KAUFMAN, Y. J., LEVY, R. C. and MATTOO, S. (2006). Algorithm for remote sensing of tropospheric aerosol from MODIS: Collection 005, Product ID: MOD04/MYD04. (Internet elérhetőség: http://modis.gsfc.nasa.gov/data/atbd/atbd_mod02.pdf).
31. SATHYENDRANATH, S. (1986). Remote sensing of phytoplankton: A review, with special reference to picoplankton. In T. P. a. W. K. W. Li (ed) *Photosynthetic Picoplankton* (Canadian Bulletin of Fisheries and Aquatic Sciences, Volume 214). Ottawa: Canadian Government Publishing Centre.

32. SVÁB, E. (2008). *Sekélyvizű tavak vízmínőség-vizsgálata, állapotfelmérése műholdas távérzékelés segítségével* Természettudományi Kar Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem pp. 106.
33. SVÁB, E., TYLER, A. N., PRESTON, T., PRÉSING, M. and BALOGH, K. V. (2005). Characterizing the spectral reflectance of algae in lake waters with high suspended sediment concentrations. *International Journal of Remote Sensing* 26, 919-928.
34. V.-BALOGH, K., NÉMETH, B. and VÖRÖS, L. (2009). Specific attenuation coefficients of optically active substances and their contribution to the underwater ultraviolet and visible light climate in shallow lakes and ponds. *Hydrobiologia* 632, 91-105.
35. V.-BALOGH, K., VÖRÖS, L., TÓTH, N. and BOKROS, M. (2003). Changes of organic matter quality along the longitudinal axis of a large shallow lake (Lake Balaton). *Hydrobiologia* 506-509, 67-74.
36. WU, G., DE LEEUW, J., SKIDMORE, A. K., PRINS, H. H. T. and LIU, Y. (2008). Comparison of MODIS and Landsat TM5 images for mapping tempo–spatial dynamics of Secchi disk depths in Poyang Lake National Nature Reserve, China. *International Journal of Remote Sensing* 29, 2183-2198.
37. WU, M., ZHANG, W., WANG, X. and LUO, D. (2009). Application of MODIS satellite data in monitoring water quality parameters of Chaohu Lake in China. *Environmental Monitoring and Assessment* 148, 255-264.
38. ZLINSZKY, A. and MOLNÁR, G. (2009). Georeferencing the first bathymetric maps of Lake Balaton, Hungary. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 44, 79-94.

