

Ungvári Zsuzsanna: Domborzatmodellek alkalmazása a térképkészítésben. In: Geodézia és Kartográfia 2015/11–12. pp. 23–28. (2015)

Ungvári Zsuzsanna: Az automatizált térképi generalizálás bevezetésének lehetőségei a szakmai, felsőfokú oktatásban: eddigi tapasztalatok, jövőbeli célok. In: Balázs Boglárka (szerk.): Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában VII. = Theory meets practice in GIS. Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen, 2016. pp. 479–486.

Visvalingam, Maheswari – Whyatt, James D.: Line generalisation by repeated elimination of points. Cartographic Journal 30 (1). 1993. pp. 46–51.

Wang Zenshen – Müller, Jean Claude: Line generalization based on analysis of shape characteristics. Cartography and Geographic Information Systems 25 (1). 1998. pp. 3–15.

Summary

Automations in Line Generalization - Line Simplification and Smoothing

The cartographic generalization was always a time-consuming and labour-intensive process at analogue map making as well as at computer aided map editing. The cartographers apply the basic operators of generalization to keep the readability and the important information of maps. In geoinformatics software, it is possible to automatize this step, while using

line simplification and smoothing algorithms to generalize the line and area features. In this article, these methods were collected, reclassified and expounded by the author.



Ungvári Zsuzsanna
tanársegéd

ELTE Térképtudományi és
Geoinformatikai Tanszék
e-mail: ungvazis@map.elte.hu

A Balaton klorofill-a eloszlásának monitorozása MODIS-adatok alapján

Koma Zsófia–Zlinszky András–Kern Anikó–Stephanie Palmer

Bevezetés

A vízminőség-távérzékelés (IOCCG 2000) lehetővé teszi a folyók, tavak és óceánok folyamatos, egész víztestre történő monitorozását a pontszerű mintavételeket kiegészítve térbeli mintázati információkkal a visszavert fény mennyiség és a víz biofizikai tulajdonságai között megállapított összefüggések alapján. Kezdetben a vízminőség-távérzékelés legfőbb feladata a fitoplankton-mennyiség kimutatása volt főként óceáni (ún. 1. típusú) vizek legfelső rétegeiben, mely elsődleges termelődésével a vízi tápláléklánc alapja, így döntően befolyásolja a víz minőségét. Napjainkra a tudományág kiszélesedett, és az optikailag komplex (ún. 2. típusú) vízfelületeknek számító tengerek part közeli részére és tavakra is elkezdődött a különböző vízminőség-monitorozó eljárások fejlesztése, a már szélesebb hullámhossztartományban nagyobb felbontásban mérő műszerek alapján (Matthews 2011).

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 tartalom monitorozása csak speciális, szűkített időtartamokra működött (Sváb 2008). A projekt később folytatódott az ENVISAT- (ENVironmental SATellite) műholdon lévő MERIS- (Medium Resolution Imaging Spectrometer) szenzor 2002–2012 közötti, 300 méter felbontású adatainak rendszeres feldolgozásával is. A MERIS-műszer adatait az in situ mérések segítségével sikeresen kalibrálták a Balaton klorofill-a tartalmának monitorozására (Palmer et al. 2015a), azonban a műholddal való nem várt kapcsolatvesztés miatt a MERIS-adatokra épülő hosszabb távú kutatásoknak nem volt további esélye. Ezzel szemben a Terra- és Aqua-műholdak fedélzetén elhelyezett multispektrális MODIS- (MODerate resolution Imaging Spectroradiometer) szenzorok mérései 2000 óta folytonosak, és adataikra számítani lehet a következő években is.

Bár a MODIS-adatok alkalmazása a 2. típusú vizek esetében nem elterjedt, mivel a csatornakiosztás és felbontás több más műszer esetén is ideálisabb, ugyanakkor jó néhány szakirodalmi

példa bizonyítja, hogy a MODIS-szenzor adatai sikeresen alkalmazhatóak a tavak vízminőségének monitorozásában. Az afrikai Malawi-tó esetén 0,6 szórásnégyzet mellett meghatározták a tó klorofill-a tartalmát (Chavula et al. 2009), Kína területén pedig a Chaohu-tó esetén érték el szintén 0,6 szórásnégyzet pontosságú eredményt (Wu et al., 2009). Gower és munkatársai (2004) megállapították, hogy a MODIS alkalmazható vízminőség-monitorozó célokra komplex vizek esetén is. Ezenkívül a MODIS 1-es és 3-as csatornáit alkalmazhatók a Sechi mélység (Wu et al., 2008) és a lebegőanyag (TSS, Total Suspended Solids, Miller és Mckee 2004) mennyiségének becslésére is.

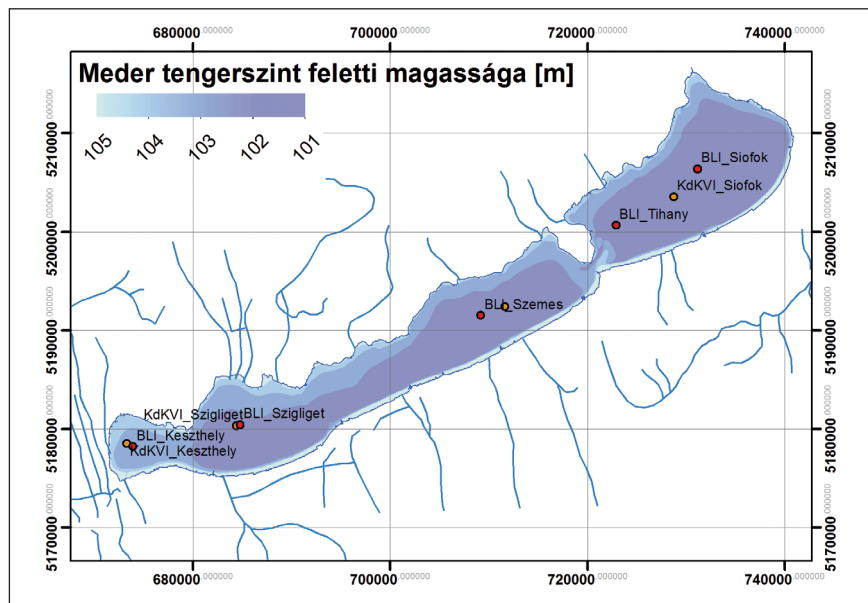
A kutatás célja a Balaton klorofill-a (chl-a) mennyiségének becslésére alkalmas módszer fejlesztése, és működésének vizsgálata MODIS-adatok felhasználásával. A téma jelentősége, hogy a MODIS-adatok folytonos adatforrást jelentenek 2000-től egészen napjainkig, így lehetővé teszik a tó hosszabb távú ökológiai célú vizsgálatát, és a klorofill-a, illetve lebegőanyag-tartalom térképezését, mely egyéb biológiai célú kutatások kiindulópontja lehet.

Kutatási terület és felhasznált adatok

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 pedig (1863 óta) a Siócsatorna, mely a később a Dunába torkollik. Ennek megfelelően alakul a tó trofikus jellege, délnyugaton eutróf, míg északkeleten oligotróf, mezotróf jellegű (O'Donnel et al., 2012). A turbiditása a tónak magas, átlagosan 20 cm és 1 m között változik a Secchi-mélység, így a fenékről való visszaverődés lehetősége kicsi (Palmer et al. 2015b). Évente kétszer történik alga- virágzás a Balatonban, áprilisban és augusztus-szeptemberben (Mózes et al., 2006).

A vízminőség változása többször fenyegette a Balaton vizének tisztaságát, strandolásra való alkalmasságát, így a turizmus alakulását. Az 1970-es és 1980-as években a Zalából érkező szennyvíz miatt megindult a víz gyors ütemű eutrofizációja. Ezt a szennyvíz foszfortalanításával, a vízgyűjtőről való kivezetésével és a Kis-Balaton védelmének helyreállításával fékeztek meg (Herodek et al. 1988). A vízminőség hagyományos paramétereinek meghatározása a Balatoni Limnológiai Intézet (BLI) és a Közép-Dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőség (KDKVI) által februártól–novemberig, kéthetente a négy részmedencének a közepén, pontszerű mintavételezés alapján történik (1. ábra).

A pontszerű mérések során a klorofill-a, a szervesanyag-tartalom, a víz-hőmérséklet, a Secchi-mélység és az eutrofizáció ezekből meghatározott mértéke kerül rögzítésre (Palmer et al. 2015b). A kalibráció során a cél ezen in situ mért adatok és a műholdas csatornákból képzett index közötti összefüggés keresése és felállítása. Vizsgálatainkban a klorofill-a értékeket



1. ábra. A Balaton in-situ mintavételi helyei. A Balatoni Limnológiai Intézet mintavételi helyei pirossal, míg a Közép-Dunántúli Környezetvédelmi, Természetvédelmi és Vízügyi Felügyelőségé narancssárgával kerültek jelölésre.

alkalmaztuk a MODIS-adatok kalibrációjához. A KDKVI esetén a víz felszínéről (felső fél méterből) történt a mintavételezés, míg a BLI-minták esetén teljes vízoszlopból vették a mintát, és számították ki az értéket, majd laborban, szűrés, metanolos extrakció és fotometriás mérés segítségével határozták meg a klorofill-a értéket (Iwamura et al. 1970). Ezenkívül vizsgálták azt is, hogy a teljes vízoszlop, illetve csakis a felső rétegből vett minták klorofill-a értéke hogyan viszonyul egymáshoz. Eredményeik szerint (7-7 azonos napon vett minta alapján) nincs jelentős különbség a mért klorofill-a értékek között (Palmer et al. 2015b).

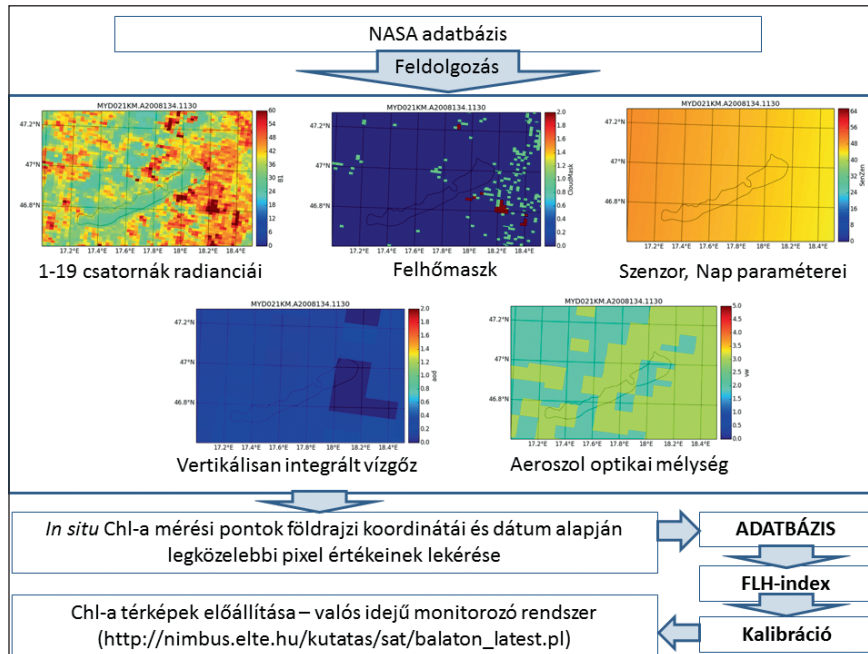
A kutatás műholdas adatforrását alkotó MODIS-adatok az interneten ingyenesen elérhető raszteres állományok (NASA 2015). Ezenkívül az ELTE műholdvevő állomása lehetővé teszi a saját feldolgozás útján előállított termék alkalmazását (Kern et al. 2015), amely elérhetővé teheti a Balatonra vonatkozó valós idejű monitorozását.

Módszertan

Az adatfeldolgozás során az öt különböző MODIS-termék került felhasználásra: a radianciaértékeket tartalmazó produktum (MOD02/MYD02), az ehhez tartozó geokodációk, illetve a szenzor-, napzenit- és azimutiszög paramétereit tartalmazó raszteres

állományok (MOD03/MYD03), a felhőmaszk (MOD35/MYD35), az aeroszolrészecskék optikai mélysége (MOD04/MYD04) és a teljes kihullható vízgőztartalom (MOD05/MYD05). A feldolgozás során (2. ábra) az 1B szintű kalibrált radianciaadatokat használtuk bemeneti adatként. A 13-as és 14-es csatornák radianciaértékeit szétválasztottuk alacsony és magas radianciafelbontású tartományokba. Az alacsony radianciatartományban mérő csatorna a szárazföld radianciaértékeihez igazítja a mintavételezést, míg a magas radiancia a felbontás, az óceánokra jellemző radianciatartomány részletesebb mintavételezésére optimalizált (Meister et al., 2011). Légköri korrekciót az adatokra nem végeztünk, mivel a vízminőség monitorozáshoz számított index a légköri korrekció nélkül jobb eredményt szolgáltathat komplex, 2. típusú vizek esetén (Gower et al., 2004).

Az adatbázisban először a felhős pixeleket (a felhőmaszk alapján) kiszűrtük, majd a vízminőség térképezéséhez alkalmas hullámhossztartományba eső csatornák kalibrált radianciaértékeit vizsgáltuk a szenzor és Nap zenit- és azimutiszögei, a vertikális integrált vízgőz és az aeroszol optikai mélység függvényében. Szisztematikus összefüggést nem találtunk, így ezeket az adatokat szűrésre nem használtuk.



2. ábra. A munkafolyamat lépései.

A szakirodalom alapján az empirikus klorofill-a becslésre kétféle széles körben használt algoritmus létezik. Az egyik az ún. FLH- (Fluorescence Line Height) index (1. egyenlet), a másik pedig a zöld és vörös csatorna hányadosából képzett index (Matthews 2011). Mindkét dimenzió nélküli index biofizikai alapja a fluoreszcencia, mely lineárisan változik a klorofill-a mennyiségével. Jelen kutatásban a Balaton klorofill-a becslése a FLH-index képzésével történt. A MERIS-adatok esetén ez az index sikeres alkalmazása valósult meg a Balatoni vízminőség meghatározására (Palmer et al. 2015a). Az FLH-index kiszámítása Gower és munkatársai (2004) definíciója alapján történt:

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

ahol az $L(\lambda_1)$ és $L(\lambda_3)$ a MODIS 13-as és 15-ös csatornáinak radianciaértékei, az $L(\lambda_2)$ a 14-es ún. fluoreszcencia csatorna radianciaértéke, míg a k csatornakiosztásra jellemző konstans az 5. egyenlet definiálja:

$$k = \frac{\lambda_3 - \lambda_2}{\lambda_3 - \lambda_1} = 0,860 \quad (2)$$

Előzetes vizsgálatok alapján az FLH-index kiszámításához az alacsony információfelbontású, szélesebb radianciatartományban mérő csatornákat alkalmaztuk a 13-as és 14-es csatorna esetén. A 2007–2011 közötti

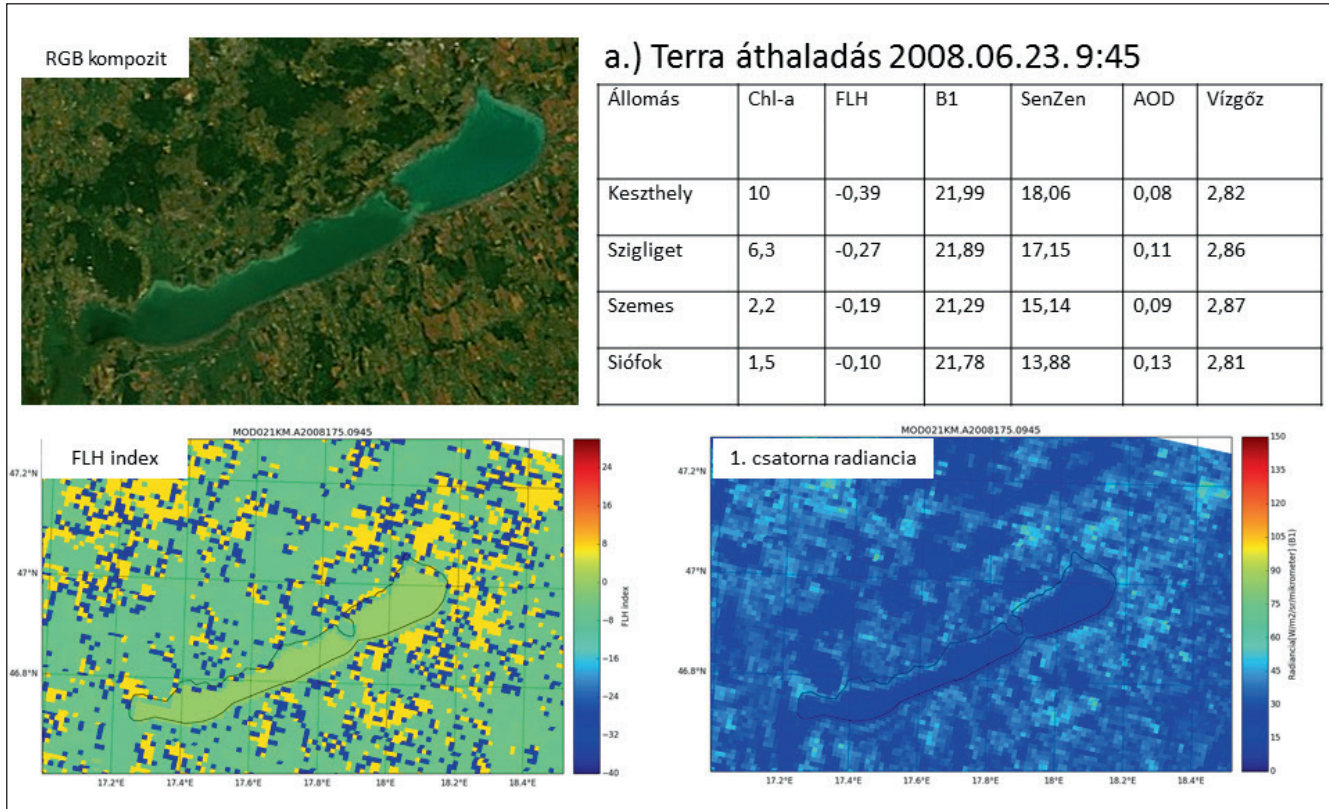
felhőtlen pixelekből a 13-as, 14-es és 15-ös csatornára előállított hisztogramok alapján megállapítható, hogy a speciálisan óceánokra kifejlesztett, kisebb radianciatartományban, nagyobb részletességgel mérő csatornák esetén a Balaton nem ad a felszíntől eltérő értéket, telítődik a csatorna.

Eredmények és diszkusszió

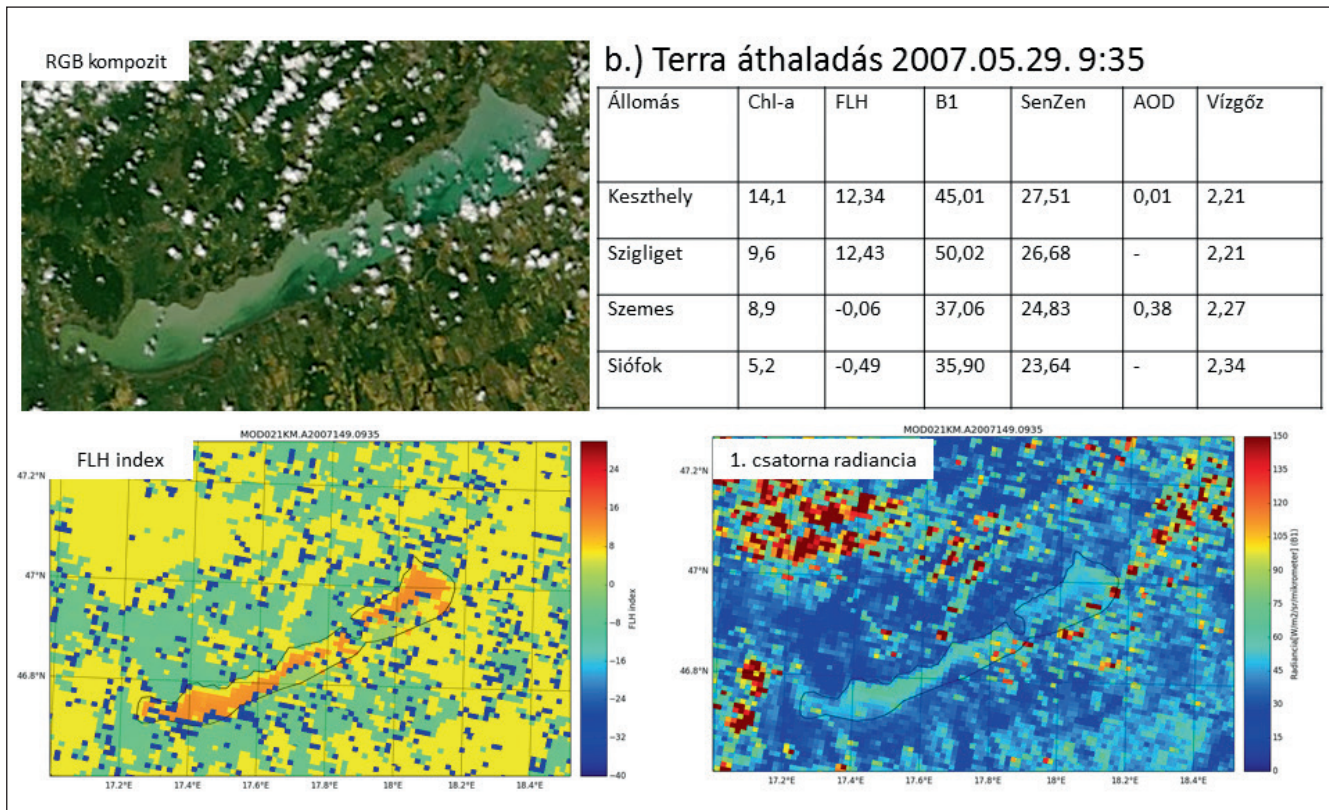
A szélesebb radianciatartományban mérő alacsony felbontású 13-as, 14-es és 15-ös csatorna felhasználásával képzett FLH-index értékeit az egyes in situ felhőtlen mérési napokra, 2007–2011 között előállítottuk. A kapott eredmények négy külön csoportba tömörültek: -40 és -30, -10 körüli, -2 és 2 közötti és a 4–20 FLH-indexű értékeket tartalmazó csoportba. A 4 csoport kialakulásának okaként szakirodalmi előismeretek alapján a következőket feltételeztük: a szenzor zenitszöghatása [alacsony zenitszög, rosszabb jel-zaj arány, a légköri korrekció hiánya (magas páratartalom)], vagy a lebegőanyag mennyiségének változása a tóban (pl. erős szél hatására a Balaton vize felkavarodik). Korrelációs vizsgálatok alapján megállapítható, hogy az FLH-index alakulása összefüggést mutat az 1-es csatorna értékeivel. Az 1-es csatorna a lebegőanyaggal mutat összefüggést (Miller és Mckee 2004). A

lebegőanyag értelemszerűen a szélsebességgel mutat erős korrelációt, és a tó elszíneződését okozza, összefüggésben állva a FLH-indexet képező csatornák telítődésével. Ennek megfelelően, amikor a magas lebegőanyag-tartalom miatt a tó vize átlátszatlanná válik, nem lehetséges a klorofill-koncentráció mérése az FLH-index alapján. Az összefüggés bizonyítására több esettanulmányt is végeztünk, ahol az *in situ* mérési adatokat összevetettük valós színezésű képpel, az 1-es csatorna radianciamezejével és az FLH-indexmezővel.

A példák közül az első, itt bemutatott felvétel 2008. június 23-ai Terra áthaladáshoz tartozik, mely egy kora nyári időpont, a második algavirágzás előtt és a tavaszi után. 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-a értékekkel (3. ábra). Az 1-es csatorna radianciaértéke, a szenzor zenitszöge, az aeroszol optikai mélység és a vízgőztartalom alacsony értékeket vesznek fel, ahol a valós színezésű kép alapján megfigyelhető egyfajta szisztematikus elszíneződés. A Keszthelyi-medence sötétzöld színű (bár ezt a Zalából bemosódó oldott színes szerves anyag is okozhatja), míg a Siófoki-medencéig átmenetesen vált át kék színbe, ahol a klorofill-a értékek is ennek megfelelően változnak (1-es táblázat). A lebegőanyag-tartalommal korreláló 1-es csatorna értékei a Balaton területén jelentősen nem változnak, a Balaton szélén megjelenő magasabb értékeket tartalmazó pixelek jó egyezést mutatnak a 250 méteres felbontású kompozitfelvételeken is megjelenő lebegőanyaggal, illetve a meder és a szárazföld közelsége miatt a vegyes pixelek megjelenésére is visszavezethetőek a parti sáv mentén. 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-as és 14-es csatorna radianciaértékei 0–20 W/m²/str/mikrométer között változnak, és nem kerülnek telítődésbe a csatornák.



3. ábra. 2008. 06. 23. 9.45 Terra/MODIS áthaladásához tartozó, valós színezésű (RGB) kompozitkép (bal felső), in-situ méréseket összefoglaló táblázat (jobb felső), FLH-index (bal alsó) és a MODIS 1-es csatornájának kalibrált, légkörileg korrigálatlan radianciaértékeit bemutató térképek.



4. ábra. 2007. 05. 29 9.35 Terra/MODIS áthaladáshoz tartozó valós színezésű (RGB) kompozit (bal felső), in-situ méréseket összefoglaló táblázat (jobb felső), FLH-index (bal alsó) és MODIS 1 csatornájának kalibrált, légkörileg korrigálatlan radianciaértékeit tartalmazó térképek.

A második kiválasztott felvétel a 2007. május 29-ei Terra-áthaladáshoz tartozik (4. ábra). 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 vesznek fel, ahol ezzel együtt a 1-es csatorna értékei is nagyon magasak, ami nagy mennyiségű lebegőanyag-tartalomra utal. A Szemesi- és Siófoki-részmedence esetén az FLH-index értékei jó egyezést mutatnak a referenciaadatokkal. A valódi színes képet vizsgálva jól látható a lebegőanyag-tartalom okozta elszíneződés, amely a Szigligeti-medencénél jól megfigyelhetően elnyomja a sötétzöld elszíneződést. Ez feltehetően az algavirágzáshoz tartozhat, de összefügghet megint csak az oldott színes szerves anyagok bemosódásával is, a déli parti berkekből. A Szemesi részmedence esetén az apró gomolyfelhők okozhatnak az FLH-értékekben hibát. A 1-es csatorna és az FLH-index térbeli elterjedése azonos mintázatot követ, így a felvétel alapján is megfigyelhető, hogy az 1-es csatorna befolyásolja az FLH-értékeket. Továbbá az előzővel ellentétben, itt a -30 helyett pozitív irányban térnek el a 0 körüli értékektől az FLH-index értékei. Ha jól megfigyeljük, ahol az 1-es csatorna értékei alacsonyabb értékeket vesznek fel, ott egy sávban rendeződnek a -30 körüli értékeket tartalmazó FLH-index értéke. Az is látható, hogy a sötétzöld elszíneződés már teljes mértékben 0 érték körüli FLH-index értéket jelent.

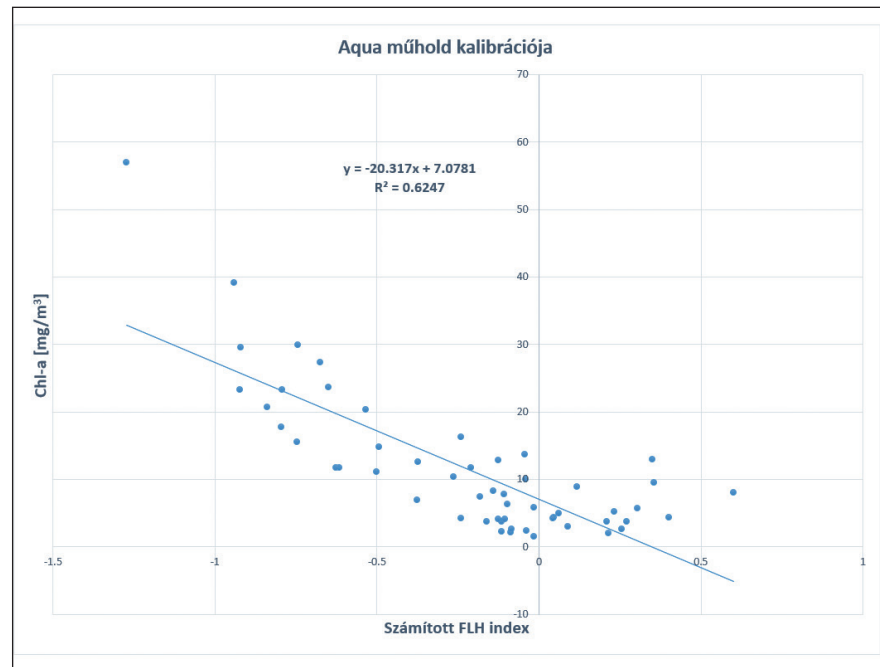
Kalibráció az FLH index alapján

A kalibrációt a fentiek alapján a 13-as, 14-es és 15-ös csatornák alapján végeztük el, mely csatornák mérései nem telítődtek a felkavarodott lebegőanyag hatásainak köszönhetően. Ezen adatok főként alacsony klorofill-a tartalom mellett (0–20 mg/m³) voltak elérhetőek. Így a kalibráció a jellemzően alacsony klorofill-a tartalmú oligotrofikus Siófoki-medence területén a legmegbízhatóbb. A kalibráció során egyenest illesztettünk az

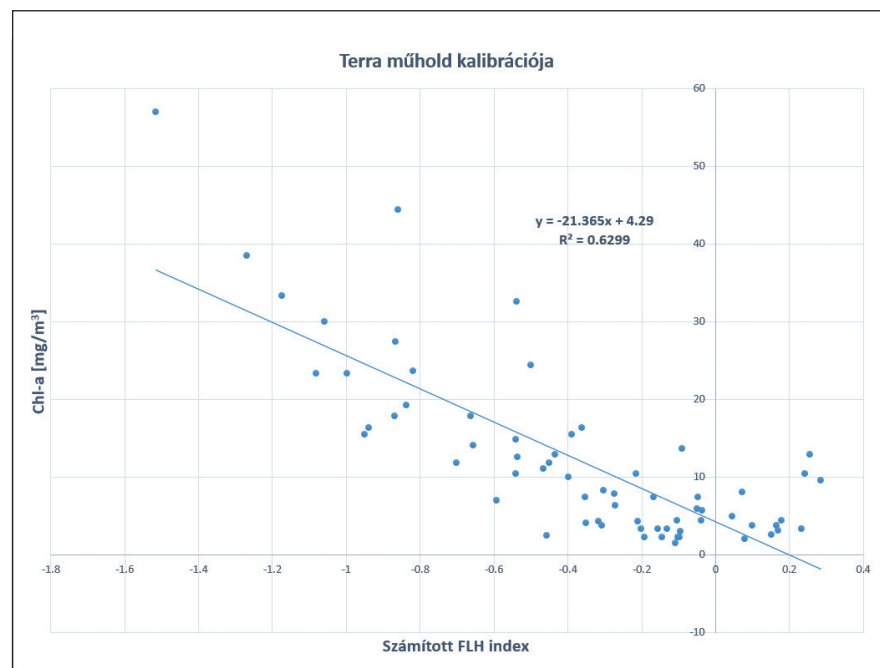
FLH-index és a mért klorofill-a tartalmakra, feltételezve a biofizikai alapon kimutatott lineáris kapcsolatot. Megállapítható, hogy a klorofill-a tartalommal korreláló értékek 0 és -4 közötti FLH-indexű értékeket vesznek fel, melyet alátámaszt a Palmer és munkatársainak munkája (2015a), akik a MERIS esetén szintén ezen értékeket kapták.

A kalibrációt az Aqua- és a Terra-műhold MODIS adataira külön

végeztük, mivel a két műhold adatai szisztematikusan eltérnek egymástól (Franz et al. 2008). Az illesztéshez véletlenszerűen szétválasztottuk az adatpontokat, és 80%-ukat használtuk a kalibráció felállítására, és az adatpontok 20%-át használtuk validálásra. A lineáris illesztés eredményeként a Pearson-féle korrelációs együttható négyzete az Aqua esetén 0,624 R²-nek (5. ábra), míg a Terra esetén 0,629 R²-nek (6. ábra) adódott.



5. ábra. Lineáris illesztés Aqua/MODIS adatokkal (R²=0,624)



6. ábra. Lineáris illesztés Terra/MODIS adatokkal (R²=0,629)

Klorofill-a monitorozás

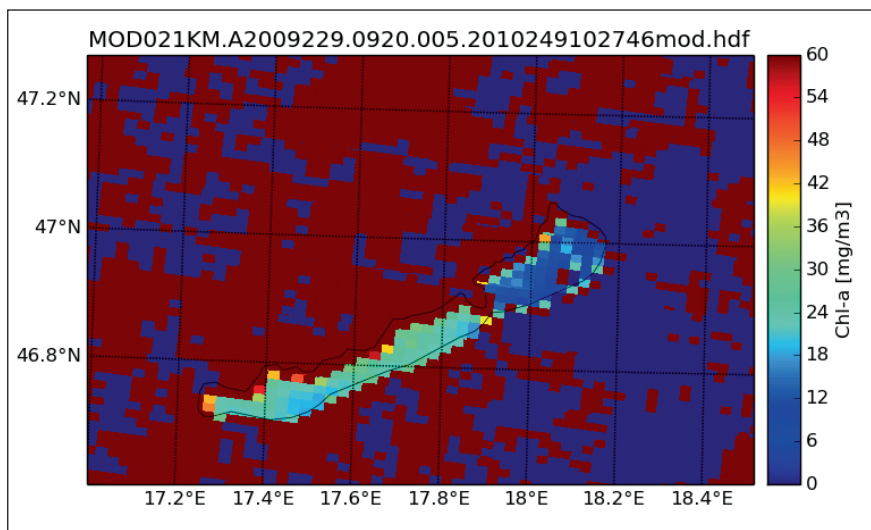
A felállított kalibrációs egyenlet alkalmas a MODIS-felvételek klorofill-a mennyiségének kimutatására azoknál a felvételeknél, ahol az 1-es csatorna radianciaértékek közé esik és a légköri körülmények is megfelelők. Az illesztéssel kapott eredmények használatát elsőként a 2009. 08. 17-ei Terra/MODIS felvételen teszteltük. Az előállított klorofill-a térképen jól kirajzolódnak a Balaton medencéinek eltérő

trofikus tulajdonságai. Keszthelynél magas a klorofill-a tartalom értéke, és ez fokozatosan csökken a Siófoki-medencéig, amely lényegesen kisebb külső tápanyagterhelést kap, és ezért átlagosan alacsonyabb klorofill-a tartalommal bír (7. ábra). Másodikként a 2008. 05. 13-ai Aqua áthaladásához tartozó MODIS-felvételt jelenítettük meg, ahol a Szigligeti- és a Keszthelyi-medence esetén az 1-es csatorna radianciaértékei nem estek a 20–40 W/m²/str/mikrométer közötti tartományba, itt csak a Siófoki-medence

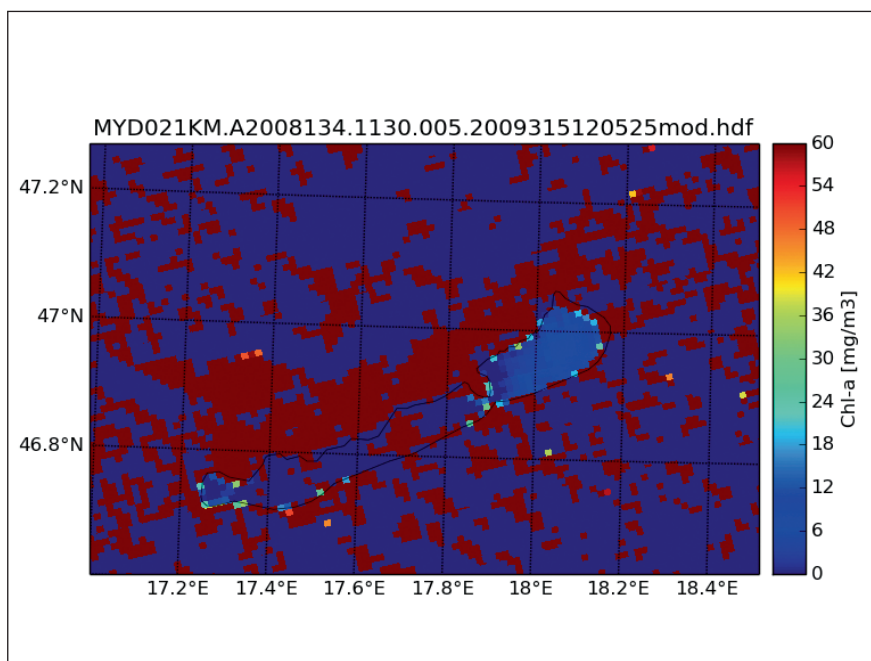
esetén kapunk klorofill-a tartalom monitorozására alkalmas adatokat (8. ábra). Jelen dolgozatban publikált kalibrációs egyenlet a két példán túlmenően levezethető az összes rendelkezésre álló MODIS-műholdképre.

Konklúzió

Jelen kutatás bemutatta, hogy bizonyos körülmények között az úrbázisú MODIS-szenzor mérései alkalmazhatók a Balaton klorofill-a tartalmának becslésére. A kapott eredmények kiegészíthetők a műholdas MERIS-adatbázissal (2007–2012), illetve a kéthetenként történő rendszeres in situ mérésekkel. A dolgozatban publikált kalibrációs egyenlet és az Eötvös Loránd Tudományegyetem műholdvevő állomása által vett MODIS-adatok felhasználásával, a valós idejű, az interneten napi rendszerességgel publikált klorofill-a-térképek (http://nimbus.elte.hu/kutatas/sat/balaton_latest.pl) teszik lehetővé a Balaton klorofill-a tartalmának térbeli mintázatának monitorozását. A távérzékelésen alapuló, napi gyakoriságú monitorozás a tó trofikus jellegének évszakos és ökoszisztémájának dinamikus változásáról nyújt további információkat. Ezenkívül az előállított térképek segíthetik a különböző terepi hidrobiológiai mérések tervezését.



7. ábra. A 2009. 08. 17. Terra/MODIS áthaladásához tartozó, a kalibrált, illesztett egyenes egyenlete alapján számított klorofill-a térkép. Jól látható, hogy a Keszthelyi-medence magasabb klorofill-a értékei fokozatosan csökkennek le a Siófoki-medencéig.



8. ábra. A 2008. 05. 23. Aqua/MODIS áthaladásához 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.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az OTKA PD-111920 és PD-115833 számú pályázata támogatta. Köszönettel tartozunk az ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék Űrkutató Csoport kollégáinak az ELTE vevőállomás létrehozásáért és folyamatos fenntartásáért.

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. 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.
4. HERODEK, S., LACKÓ, L., and VIRÁG, Á. (1988). Lake Balaton research and management.
5. 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.
6. 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.
7. Kern, A., Bognár, P., Pásztor, Sz., Timár, G., Lichtenberger, J., Ferencz, Cs., Steinbach, P., and Ferencz, O. (2014). Közvetlen vételű MODIS adatok alkalmazásai Magyarországi térségére. RS & GIS - Távérzékelési, fotogrammetriai, térképészeti és térinformatikai szakfolyóirat, IV/1, 5–13 ISSN 2062–8617.
8. 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.
9. MEISTER, G. and FRANZ, B. A. (Year). Adjustments to the MODIS Terra radiometric calibration and polarization sensitivity in the 2010 reprocessing. *Proceedings of*, 815308–815312.
10. 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.
11. MÓZES, A., PRÉŠING, 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.
12. NASA (2015). NASA's Earth Observing System Data and Information System (Internetes elérhetőség: <http://reverb.echo.nasa.gov>).
13. PALMER, S. C. J., HUNTER, P. D., LANKESTER, T., HUBBARD, S., SPYRAKOS, E., N. TYLER, A., PRÉŠING, M., HORVÁTH, H., LAMB, A., BALZTER, H. and TÓTH, V. R. (2015a). Validation of Envisat MERIS algorithms for chlorophyll retrieval in a large, turbid and optically-complex shallow lake. *Remote Sensing of Environment* 157, 158–169.
14. PALMER, S. C. J., ODERMATT, D., HUNTER, P. D., BROCKMANN, C., PRÉŠING, M., BALZTER, H. and TÓTH, V. R. (2015b). Satellite remote sensing of phytoplankton phenology in Lake Balaton using 10 years of MERIS observations. *Remote Sensing of Environment* 158, 441–452.
15. SVÁB, E. (2008). Sekélyvizű tavak vízmínőség-vizsgálata, állapotfelmérése műholdas távérzékelés segítségével Természettudományi Kar Budapest: Eötvös Loránd Tudományegyetem pp. 106.
16. SVÁB, E., TYLER, A. N., PRESTON, T., PRÉŠING, 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.
17. 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.
 18. 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.
 19. ZLINSZKY, A. and MOLNÁR, G. (2009). Georeferencing the first bathymetric maps of Lake Balaton, Hungary. *Acta Geodaetica et Geophysica Hungarica* 44, 79–94.

Summary

Monitoring the Distribution of Chl-a in Lake Balaton Using MODIS Data

Monitoring the water quality of Lake Balaton is an important research field in order to protect and analyze the ecosystem of the water. Currently water quality monitoring is based on a regular bi-weekly in-situ chlorophyll-a measurements in the center of the main basins of Lake Balaton. This monitoring can be expanded by remote sensing methods to provide water quality maps on a daily basis. Our research aim was to calibrate the data of the MODerate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) onboard satellite Terra and Aqua in order to estimate chlorophyll-a content and its distribution in Lake Balaton. The workflow was the following: first a database was built from MODIS products (radiance, geolocation, aerosol optical depth, water vapor and cloud mask) for the in-situ measurement dates between 2007 and 2012. In the second step Fluorescence Line Height (FLH) index was calculated using radiance values without atmospheric correction. The calibration was made based on linear correlation between FLH index and *in-situ* chlorophyll-a measurements. The analysis of the derived FLH index showed four independent groups, caused by the saturation of the MODIS bands 13, 14, 15, showing correlation with the suspended material (derived from band 1). The square of the linear correlation coefficient (R²) relationship

between the in-situ and remote sensing measurements was 0,629 and 0,624 for satellite Terra and Aqua, respectively. The calibration equation is applicable for Lake Balaton principally under clear atmospheric conditions with a limitation that suspended material content of the water should be low. Daily, real-time chlorophyll-a maps are available online based on the direct broadcast MODIS data received by the Eötvös Loránd University (available at http://nimbus.elte.hu/kutatas/sat/balaton_latest.pl). These real-time maps provide detailed information about the spatial distribution of chlorophyll-a. The maps can be used for the planning of ecological field measurements and answering research questions related to the ecosystem of Lake Balaton.



Koma Zsófia
doktorandusz

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Geofizikai és Űrtudományi Tanszék
e-mail: zsofia.koma@ttk.elte.hu



Dr. Zlinszky András
tudományos munkatárs

MTA Ökológiai Kutatóközpont
Balatoni Limnológiai Intézet
e-mail: zlinszky.andras@okologia.mta.hu



Dr. Kern Anikó
tudományos munkatárs

Eötvös Loránd Tudományegyetem
Geofizikai és Űrtudományi Tanszék,
Űrkutató csoport
e-mail: anikoc@nimbus.elte.hu

Stephanie Palmer
posztdoktor

MTA Ökológiai Kutatóközpont
Balatoni Limnológiai Intézet
e-mail:
stephanie.palmer@okologia.mta.hu