

REGIONÁLIS LÉPTÉKŰ ASZÁLYMONITORINGOT TÁMOGATÓ VEGETÁCIÓ- ÉS TALAJNEDVESSÉG ÉRTÉKELÉS MODIS ADATOK ALAPJÁN

KOVÁCS FERENC – VAN LEEUWEN BOUDEWIJN – LADÁNYI ZSUZSANNA
– RAKONCZAI JÁNOS – GULÁCSI ANDRÁS

VEGETATION AND SOIL MOISTURE ASSESSMENTS BASED ON MODIS DATA
TO SUPPORT REGIONAL DROUGHT MONITORING

Abstract

Climate models predict a combined trend of higher average temperatures and less precipitation for the Carpathian Basin. This makes the region vulnerable to future droughts. Droughts are complex phenomena that require large amounts of data to study them. Point measurements acquired by measurement stations provide accurate data with high temporal resolution, but for a limited number of locations. Satellite data can be used to complement point measurements to extend the amount of information available for drought studies. This research presents three methods to study drought at regional scale based on medium resolution satellite data. We determined that satellite based indices (DDI, NDDI) show a strong correlation coefficient with a drought index (PAI) based on meteorological data. Furthermore, we show that EVI based vegetation productivity has a strong relationship with the severity of drought. Finally, we show that medium resolution satellite data can be used to estimate soil moisture content.

Keywords: MODIS, remote sensing, water scarcity, climate change, spectral indices

Bevezetés

A mezőgazdaság Földünk szinte minden területén ki van szolgáltatva az időjárás szeszélyességéből adódó szélsőséges vízháztartási helyzeteknek. A monszun területeken egy-egy elmaradó vagy a szokásosnál később jelentkező csapadékos időszak komoly éhezést, a túl sok csapadék pedig rendkívüli árvizeket okoz. A mediterrán térségben a kevés csapadék az utóbbi évtizedben vízellátási gondokat okozott. A kontinentális éghajlati területeken pedig – így hazánkban is – az aszály szinte természetes, ahogy ezt a történelmi feljegyzések (RÉTHLY A. 2009) is bizonyítják.

A természetesnek tekinthető változékonyság mellé társultak az utóbbi években az egyre határozottabban megnyilvánuló klímaváltozás hatásai. A klímaváltozás hatásai általában ritkán érvényesülnek az országok, régiók fejlesztési elképzeléseiben (MIKA J. 2014; NÉMETH A. 2015), pedig a döntéshozást támogató vizsgálatok hiányában a pénzügyi és környezeti veszteségek tovább halmozódhatnak. A klimatológusok szerint a klímaváltozás egyik legfontosabb következménye a globális léghőmérséklet növekedése mellett az egyre szélsőségesebb csapadékeloszlás. Ezt a hatást Magyarországon is érezhetjük, hiszen amíg a 20. század folyamán csak öt olyan év volt, aminek csapadéka legalább 200 mm-rel eltért az előző évitől, addig a 21. század eddig eltelt másfél évtizede alatt már négy ilyen is tapasztalhattunk úgy, hogy egymást követő években (pl. 2010 és 2011) fordult elő a legtöbb és legkevesebb csapadék is. A regionális klíma modellek előrejelzései alapján a Kárpát-medencében az átlaghőmérsékletek növekedése, és a nyári csapadékösszegek csökkenése várható (MEZŐSI G. et al. 2016), éppen ezért nagy jelentőséggel bír, hogy a mezőgazdaság megfelelő információkkal rendelkezzen a vegetáció állapotáról és érzékenységről, valamint a talajok nedvességtartalmáról. A változások monitorozása biztosíthat lehetőséget a szélsőségekből fakadó gádzálkodási problémák enyhítésére.

A monitoring vizsgálatokhoz szükséges hőmérsékleti-, talajnedvesség-, csapadék- és egyéb klímaadatokat pontszerű mérőhálózatok mérik, amelyeknek köszönhetően hosszú és nagy időbeli felbontású adatok állnak rendelkezésre. Nemzetközi viszonylatban is cél a mérőhálózatok kibővítése és ezáltal a nagyobb térbeli felbontás elősegítése. Sajnos a pontszerű mérőhálózatok bővítése egy bizonyos léptéken túl nem lehetséges, viszont a távérzékelte adatok integrációjával térben folytonos adatsorok előállítása válhat lehetővé (PETROPOULOS, G. 2014). Magyarországon az elmúlt időszak fejlesztései nyomán a csapadék, a hőmérséklet, de leginkább a talajnedvesség megfigyelésére kialakított hálózat is bővült, melynek adatait az aszály és a belvíz megfigyelésébe is integrálták (BARTA K. et al. 2013; BLANKA V.–LADÁNYI ZS. 2014).

Bár az Országos Meteorológiai Intézet az ország számos pontján gyűjti az éghajlati adatokat, és 14 mérőállomás közel másfél évszázados adatsorral is rendelkezik, azonban az ilyen pontszerű információk nem használhatók elég operatív módon a mezőgazdasági gyakorlat számára. A vízügyi ágazat együttműködésével, közel 70 mérőállomás adatainak felhasználásával, 2001 óta havonta készülő Integrált Vízháztartási Tájékoztató áttekintő értékelést és előrejelzést ad a vízgazdálkodás és a vízkárelhárítás legfontosabb feladataihoz (OVF 2016). A mezőgazdaság számára megoldást nyújtó öntözéshez Kormányrendelet – 115/2014. (IV. 3.) – biztosítja az ingyenes vízhasználatot, de a vízügyi beruházások elmaradása kiszolgáltatottá teszi a magyar mezőgazdaságot, és a védett területeinket is az aszály kártételeivel szemben.

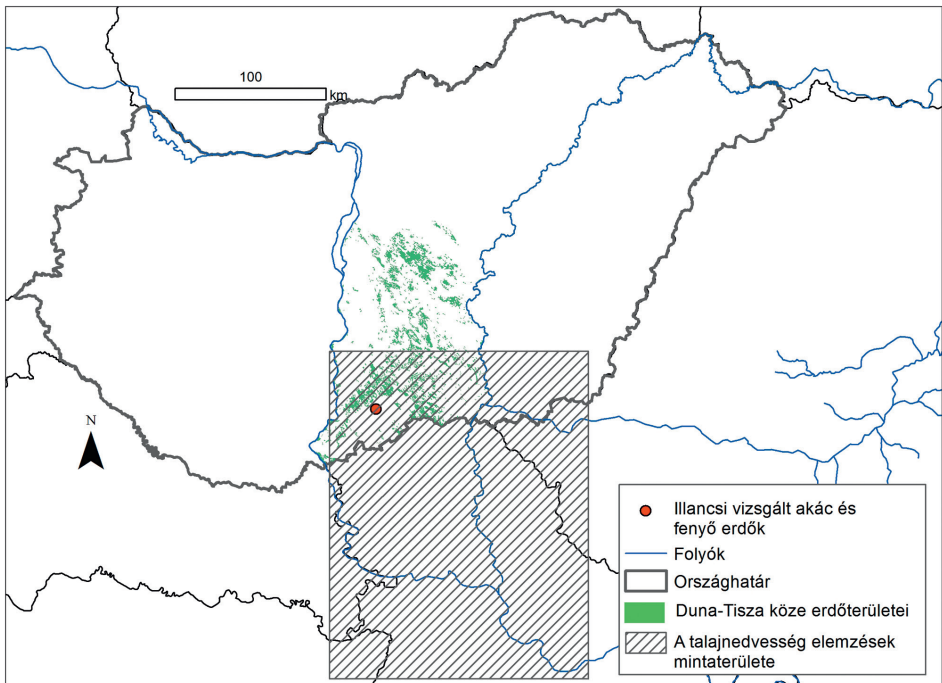
A műholdas távérzékelés folyamatos fejlődése újabb lehetőségeket kínál arra, hogy területileg részletesebb és időben gyorsabb képet kaphassunk a gazdálkodás számára fontos felszíni és felszínközeli területek vízellátottságáról. Amíg a multispektrális űrfelvételek a kezdeti időszakban idő- és térbeli felbontásuk miatt inkább csak vegetációs aktivitás változásainak regisztrálását tették lehetővé, addig napjainkban 250 méter felbontású MODIS adatok akár naponta, míg 5-20 méteres Sentinel képek pár naponta is rendelkezésre állhatnak. Az idők során kifejlesztett spektrális indexek pedig a folyamatok, változások különböző típusainak értékelését teszik lehetővé. A jelenlegi kutatások egyik fontos feladata, hogy a műholdas mérések adatait a pontszerű terepi mérések, valamint az ezekre alapozott tapasztalati mutatók (pl. a Pálfi-féle aszályindex) adataival „kalibráljuk”, és így nagy területekre vonatkozóan, jobb terepi felbontással, szinte naprakész információkat adhassunk a gyakorlat számára. A jelen kutatásban közepes felbontású távérzékelte adatok segítségével három módszert alkalmazva vizsgáljuk és számszerűsítjük az aszály hatását kárpát-medencei mintaterületen.

Mintaterület és módszerek

A tanulmányunkban bemutatott vizsgálatok léptéke országos, regionális és lokális (*l. ábra*). A részletes regionális és lokális elemzések leginkább a Duna–Tisza közére vonatkoznak, mely terület jelentős része különösen érzékeny a természeti és ember okozta változásokra. Az egyik legjelentősebb környezeti tényező az éghajlat, és annak észlelhető változásai (BARTHOLY J.–PONGRÁCZ R. 2007), melyeket felerősítettek az erőteljes antropogén tevékenységek, mint például a folyószabályozások és az árvíz elleni védekezés a 19. században, a felszíni vizek lecsapolása az 1900-as években, s a felszín alatti vizek túlzott kitermelése a társadalmi és gazdasági igények kiszolgálása érdekében. Az egyre gyakoribb és nagyobb mértékű aszályok, valamint az antropogén tényezők a talajvízszint (PÁLFI I. 1994; RAKONCZAI J. 2011), és a nyílt vízfelületek csökkenéséhez (KOVÁCS F. 2013) járultak hozzá, továbbá a só és vízforgalom átalakulása miatt a talajok és a vege-

táció változásait is megfigyelték (IVÁNYOSI SZABÓ A. 1994; BIRÓ M. et al. 2008; PUSKÁS I. et al. 2012).

A Terra MODIS műholdképekből számított indexek alkalmasnak bizonyulhatnak az aszály rövid távú tér- és időbeli változásainak a nyomon követésére, regionális földrajzi léptékben (KOVÁCS F. 2007; BLANKA V.–LADÁNYI ZS. 2014; GULÁCSI A.–KOVÁCS F. 2015). A nagy időfelbontás kiegészülve a nagy területi kiterjedéssel a 2000. év óta lehetővé teszi a regionális trendek és ciklikus folyamatok kimutatását, igaz a kis geometriai felbontás miatt a pixel szintű jelenségek nyomon követése nehéz. Napjainkban számos hiteles, atmoszféricusan korrigált, előre kiszámított terméket állítanak elő, melyek ingyenesen elérhetők (pl. LP DAAC adatbázis). Az eredeti pixelek optimális kiválasztása alapján 8 vagy 16 napos kompozit felvételeket hoznak létre, melyek mindig az adott napok legjobb adatminőségű képpontjaiból állnak össze. Minőség adatok is rendelkezésre állnak, melyek pixel szinten jelzik a felhasználhatóságot befolyásoló tényezők jelenlétét (pl. felhőborítás, árnyék). Az adatok szűrésével az értékelés bizonytalanságát igyekeztünk csökkenteni, amihez az eszközök egy részét a MODIS minőségértékelő csoportja bocsátott a felhasználó közösség részére (ROY, D.P. et al. 2002). A kompozit képek értékei meg vannak szorozva 10 000-rel, amin a számítások során nem változtattunk.



1. ábra A vizsgált mintaterületek elhelyezkedése
Figure 1 Locations of the study areas

A szinuszoidális vetületű, HDF formátumban lévő adatokat, UTM vetületi rendszerbe transzformáltuk, a legközelebbi szomszéd átmintázási módszert alkalmazva. A minőség-korrektció elvégzése után, a Magyarországot lefedő felvételeket EOVS rendszerbe transzformáltuk. Az utóbbi 15 év minőség-ellenőrzése alapján az 500 m-es cellaértékek esetén az ország adott pontjára átlagosan 75% érvényes pixelértéket kapunk. Az elemzésben

alkalmazott alapadatok reflektancia és felszíni hőmérséklet, továbbá normalizált differenciált vegetációs index (NDVI) és továbbfejlesztett vegetációindex (EVI) (HUETE, A. et al. 2002) adatok voltak 250, 500, 1000 m felbontásban; MOD09, MOD13, MOD11 termékek. Az adatmennyiséget jellemzi, hogy a 8 napos összesítésű MOD09 felvételek feldolgozása a 2000–2014 időszak április–augusztus hónapjaira összesen 358 db műholdképet jelent.

Az aszály számszerűsítésére, valamint referenciaadatként a kutatásban a Pálfi-féle aszályindexet (PAI) használtuk (PÁLFI I. 1989):

$$PAI = \frac{\left[\sum_{i=apr}^{aug} T_i \right] / 5}{\sum_{i=oct}^{aug} (P_i \cdot w_i)} \cdot 100 \cdot k_t \cdot k_p \cdot k_{gw}$$

ahol: T – hőmérséklet; P – csapadék, w_i – súlyozó tényező, k – korrekciós tényezők (hőmérséklet, csapadék, talajvíz).

Az országos PAI értékeket a 2000–2014 közötti időtartamra a Nemzeti Aszálystratégia vitaanyag (Vidékfejlesztési Minisztérium 2012), illetve KOZÁK P. (2015) alapján digitalizáltuk. A tanulmány a továbbiakban esettanulmányokon keresztül mutatja be az aszály megfigyelésének lehetőségeit három, az alábbiakban részletezett módszer szerint.

DDI és NDWI alapú aszályértékelés (2000–2014)

Az aszály értékelésének egyik távérzékelési módszere a normalizált differenciált aszályindex (NDDI) (Gu, Y. et al. 2007):

$$NDDI = \frac{NDVI - NDWI}{NDVI + NDWI}$$

ahol: $NDVI = \frac{NIR_{858nm} - Red_{645nm}}{NIR_{858nm} + Red_{645nm}}; \quad NDWI = \frac{NIR_{858nm} - SWIR_{2130nm}}{NIR_{858nm} + SWIR_{2130nm}}$

A rövidítések: NDWI – normalizált differenciált vízindex, Red – vörös-, NIR – közeli infravörös-, SWIR – közepes infravörös hullámhossz-tartomány felszíni reflektancia értékek.

A mennyiségi elemzésekre alapozva a növényzeti víztartalom becslésében a tapasztalatok szerint az NDWI felülmúlja az NDVI-t (JACKSON, T.J. et al. 2004). A SWIR sávban a növényekben található víz abszorpciója magas, míg a NIR sáv szükséges a levél belső szerkezet változatosságának és a szárazanyag-tartalom változásainak magyarázására. Ha csökken a víztartalom, akkor a SWIR csatornában szignifikánsan megnövekedő reflektancia miatt az NDWI érték csökken. Az SWIR sávnak a NIR sávhoz történő viszonyításával a víz tömegét, térfogatát érzékeljük. Aszály esetén a vízindex értékek nagyobb mértékben csökkennek, mint a vegetációindex értékek, így az NDDI pozitív eltérése aszályt jelezhet.

Az NDDI számításakor szükséges átskálázás utáni újabb számolás torzítást visz bele az adatokba, illetve az index nemlineáris viselkedése bizonytalanná teszi az eredményeket és a referenciaadatok megváltozására sem kapunk arányos választ. Az egyszerűbb változat, a differenciált aszályindex (DDI) bevezetése kiküszöböli ezt a problémát, a víz- és vegetációindex közti különbség számolásával új információkat nyerünk:

$$DDI = DVI - DWI$$

ahol: $DVI = NIR_{858nm} - Red_{645nm}; \quad DWI = NIR_{858nm} - SWIR_{2130nm}$

A rövidítések: DVI – differenciált vegetáció index; DWI – differenciált víz index.

Az NDWI–NDVI és a DWI–DVI tényezők közötti közel lineáris statisztikai kapcsolat érvényesíti az aszályindexeket (GULÁCSI A. – KOVÁCS F. 2015). A vegetáció- és vízindexeknél a normalizált változatok jobban teljesítenek, ezért ez utóbbiakat értékeljük.

A vegetáció produktivitásának és a PAI index összefüggésének értékelése (2000–2016)

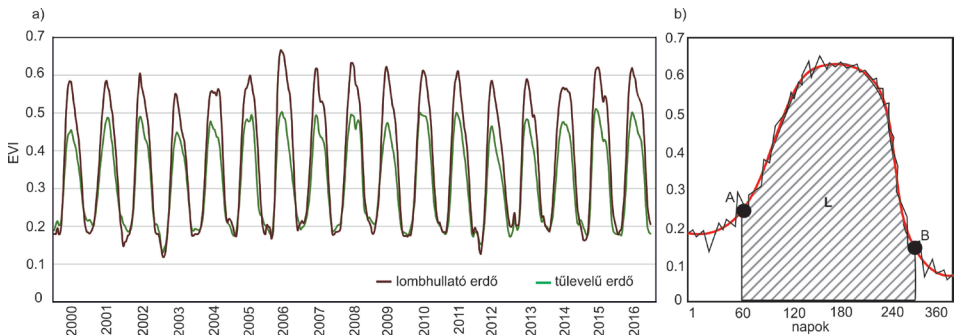
Az elemzésekben a MODIS 13Q1 termék EVI és NDVI vegetációs index adatait alkalmaztuk. A vegetáció produktivitását (2. ábra) a vegetációs periódust jellemző vegetációs index görbe alatti területéből számítottuk (VAN LEEUWEN, B. et al. 2016), és ennek átlagtól való eltérését hasonlítottuk össze a Pálfi aszályindexszel (PAI) akác és fenyő erdőfoltokra olyan területen, ahol a talajvízszint mélysége miatt a növényzet jelentős mértékben kitett az éghajlati változékonyságnak. Arra kerestük a választ, hogy milyen mértékű a kapcsolat az adatsorok között, hiszen ezen összefüggés erőssége jelentős mértékben alátámaszthatja a terület klímaextrémeknek való kitettségét még kis vízigényű fajok esetében is.

Az EVI az NDVI korrekciós tényezőkkel ellátott változata, minimalizálja a légköri zavaró hatásokat és a talaj-fényesség indukálta változásokat (SOLANO, R. et al. 2010):

$$EVI = \frac{NIR_{858nm} - Red_{645nm}}{NIR_{858nm} + C_1 \cdot Red_{645nm} + C_2 \cdot Blue_{469nm} + L} \cdot G$$

ahol: Blue – kék hullámhossz-tartomány felszíni reflektancia érték, L – lombzat háttér igazítás együttható, C_1 és C_2 – aeroszol-ellenállás együtthatók, G – erősítés vagy skálázási tényező. Az együtthatók értékei: $L = 1$, $C_1 = 6$, $C_2 = 7,5$ és $G = 2,5$.

Célunk volt továbbá a Duna–Tisza köze erdeinek monitoring jellegű megfigyelése a 2000–2016 közötti időtartam nyári féléveire. A 250 m-es cellaháló szerinti, 66%-os fedettségű és minimum 3 db összefüggő pixelből álló foltok kerülnek elemzésre a Corine Land Cover 2000, 2006, 2012 adatok alapján. A 2012. évi erdők 49%-a hasonló felszínfedettségű 2000 óta.



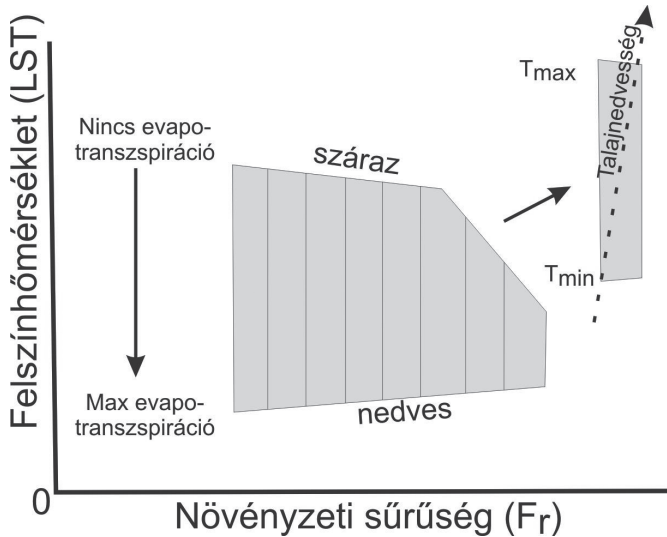
2. ábra a) A vegetációs index értékekből felrajzolható hosszú idősoros adatok lombhullató és tűlevelű erdőfoltok példáján, b) a vegetációs index görbék éves sematikus ábrája szemléltetve a vegetációs periódusra jellemző főbb paramétereket (A: vegetációs periódus kezdete, B: vegetációs periódus vége, L: éves biomassza produkciót jellemző görbe alatti terület)

Figure 2 a) Vegetation index data series for deciduous and coniferous forests b) vegetation index curve for a vegetation period describing the main investigation parameters (A: beginning of the vegetation period, B: end of the vegetation period, L: Long integral representing annual biomass production)

Az aszály számszerűsítése MODIS termékekből számolt talajnedvesség adatokkal

A talajnedvesség szerepe az aszály megfigyelésben nagyon fontos tényező (SENEVIRATNE, S.I. et al. 2010). Hagyományos módon a talajnedvességet pontszerű mérésekkel különböző

mélységekben mérik. Ezen mérések nagy időfelbontású és pontos adatokat szolgáltatnak, viszont nehezen kiterjeszthetők, nem nyújtanak reprezentatív információkat. A talajnedvesség mintázatának nagy területre vonatkozó részletes értékelését több megközelítésben, távérzékeltek segítségével vizsgálják. Az egyik módszer mikrohullámú adatok alapján becsüli a talajnedvességet a száraz és nedves állapotú talajfelszín dielektromos tulajdonságainak különbsége alapján. A mikrohullámú szenzorok által becsült talajnedvesség hátránya a passzív mikrohullámú adatok kis térbeli- és kisebb időbeli felbontása, valamint jelentős érzékenysége a vegetációs borításra és a felszín érdességére (PATEL N.R. et al. 2009). A másik módszer a hasonló vegetációs sűrűség mellett lineáris kapcsolatot feltételez a talajnedvesség és a felszín hőmérséklete között (VICENTE, S.M. et al. 2004, MALLICK, K. et al. 2009) (3. ábra), és ez alapján becsüli a talajnedvességet.

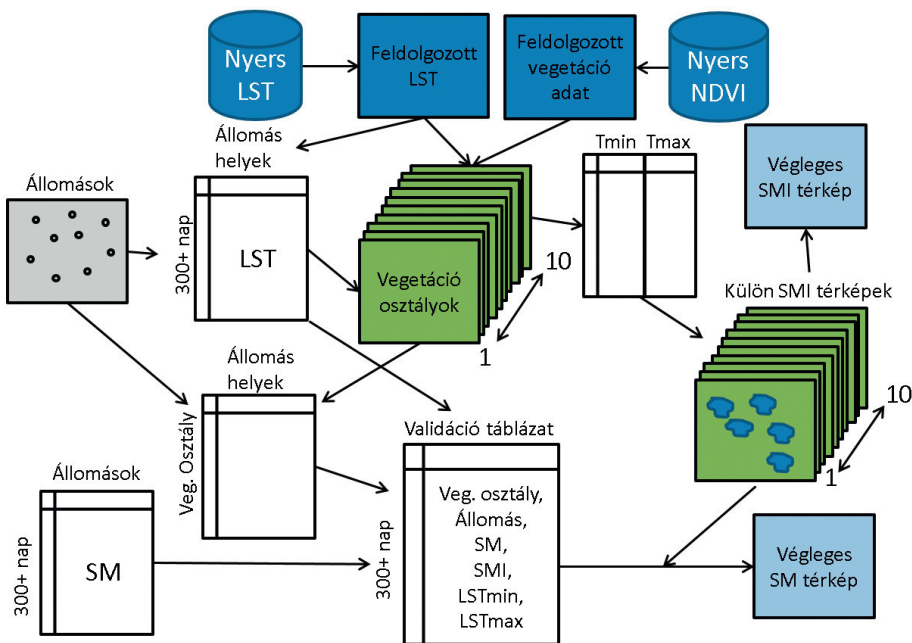


3. ábra A felszíni hőmérséklet, a talajnedvesség és a vegetációs sűrűség közötti kapcsolat (VICENTE, S.M. et al. 2004; MALLICK, K. et al. 2009 alapján)
 Figure 3 Relationship between surface temperature, soil moisture and vegetation fraction (after VICENTE, S.M. et al. 2004; MALLICK K. et al. 2009)

A MODIS szenzor 16 napos NDVI kompozit terméke alapján (MODIS 13Q1) a mintaterületet 10 hasonló növényzeti sűrűséggel jellemezhető területre osztottuk. Mindegyik területre kiszámítottuk a minimum felszín-hőmérsékletet a MOD11A1 felszín-hőmérséklet adatok alapján (WANG, Z. 1999), mely meghatározta a legnagyobb talajnedvesség értékeket, míg a legmelegebb területekhez a legszárazabb talajfelszínt rendeltük. A teljes munkafolyamat 5 fő lépésből áll: 1) az NDVI adatok feldolgozása, 2) a felszín-hőmérséklet (LST) adatok feldolgozása, 3) az LST-NDVI összefüggéseinek meghatározása, 4) a talajnedvesség-index (SMI) adatok kiszámítása, 5) a talajnedvesség (SM) térkép létrehozása (4. ábra).

- 1) A MOD13Q1 szűrt adataiból egy térbeli részadathalmazt hoztunk létre, és úgy kalibráltuk, hogy az adatok a -1 és 1 tartományba essenek. Ezen adatokat normalizáltuk, és kiszámítottuk az F_v növényzeti sűrűség paramétert.
- 2) MOD11A1 felszíni talajhőmérséklet adatok szűrését követően a részadathalmazt kalibráltuk. Az 1000 m-es felbontású LST adatból 250 m-es adatot állítottunk elő, hogy a felbontás igazodjon a NDVI adat felbontásához.

- 3) A vegetáció sűrűség adatokat 10 azonos intervallumú osztályba soroltuk, majd a felszín-hőmérséklet réteg alapján minden vegetáció osztályra vonatkozóan kiszámítottuk a minimum és maximum LST értéket. Ezután minden osztályra meghatároztuk az LST és az SMI értékek közötti lineáris kapcsolatot.
- 4) A lineáris kapcsolat alapján mind a 10 vegetáció sűrűség osztályra kiszámítottuk az SMI értékét. A 10 külön SMI térképből pedig összeillesztettük a teljes mintaterület SMI térképét.
- 5) A talajnedvesség index térképet a Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék terepi talajnedvesség-mérőállomás hálózat (BARTA K. et al. 2014) adataival kalibráltuk, és átszámítottuk az index értékeit relatív felszíni talajnedvesség értékekké (SM vol/vol).



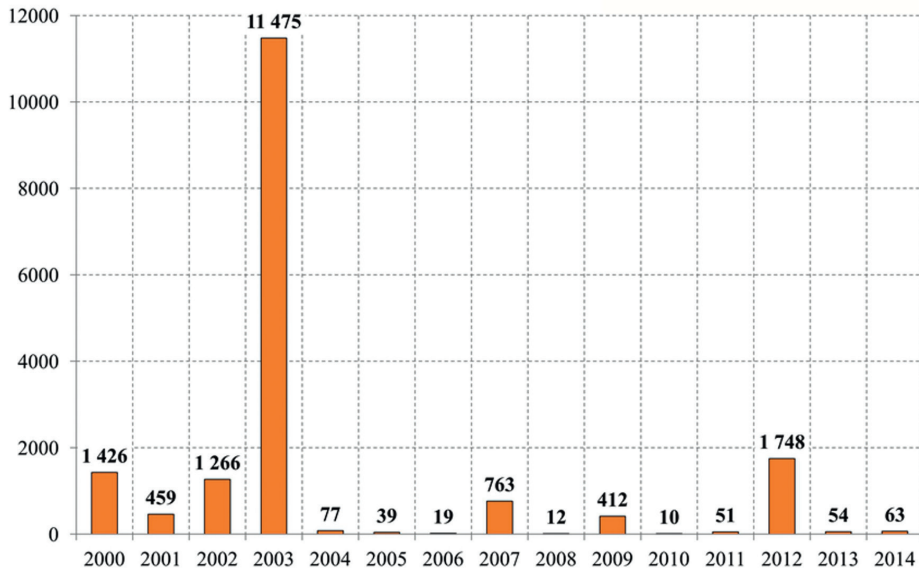
4. ábra A talajnedvesség adat számításának folyamatábrája
Figure 4 Flowchart of the data processing workflow

Eredmények

DDI és NDWI alapú aszályértékelés (2000–2014)

A spektrális index alapú aszályértékelésénél a 2000–2014 közötti tenyészidőszakokra számolt átlagtól vett eltéréseket aszerint osztályoztuk, hogy azok hány szórásértékkel térnek el az átlagtól. Véleményünk szerint aszályos egy terület, ha a 15 éves DDI referencia-átlagot legalább egyszeres szórásértékkel meghaladja. Az ilyen mértékű eltérés már nem a változékonyság kategóriájába tartozik, tényleges változásokat jelölhet. A többszörös szórás meghaladó anomáliák komolyabb változásokat tükrözhetnek (pl. tájhasználat-váltás). Pixelenként határoztuk le az átlag feletti, pozitív spektrális index anomáliájú területeket. DDI alapján hazánkban a 2003. nyári félévében volt a legnagyobb az aszálykiterjedés:

11 475 km². Ezt követi a 2012. (1748 km²) és 2000. év (1426 km²). Utána 2002, 2007, 2001, 2009 a sorrend. Nem tekinthető aszályosnak a 2004–2006 közötti idő, valamint 2008, 2010, 2011, 2013. és 2014. évek (5. ábra). Aszályt mutató osztályokhoz tartozó területek a nem aszályos években is előfordulnak 10–77 km² közötti értékben, mely növényzeti veszteség értékek erdőirtásokból, állati kártevők pusztításaiból (pl. 2014-ben a mezei pocok túlszaporodás) is származhatnak.



5. ábra Az aszály sújtotta területek kiterjedése hazánkban a DDI index alapján (km²)
 Figure 5 Area (km²) affected by drought in Hungary based on DDI index

A 6. ábra a DDI szóráserkékek szerinti aszályos területek földrajzi elhelyezkedését mutatja folytonos skálán. A negatív eltérések az átlagosnál dúsabb növényzetet jeleznek. Az aszályindexek monoton növekvő, míg a többi egyszerű index monoton csökkenő trendet mutat a PAI értékek emelkedésével. Főleg az NDVI és NDWI mutatnak statisztikailag szignifikánsnak tűnő kapcsolatot a PAI-val (7. ábra). A lineáris összefüggések az NDVI és az NDWI esetén a variancia 81–82%-át leírják.

Az eredményül kapott regressziós egyenletek:

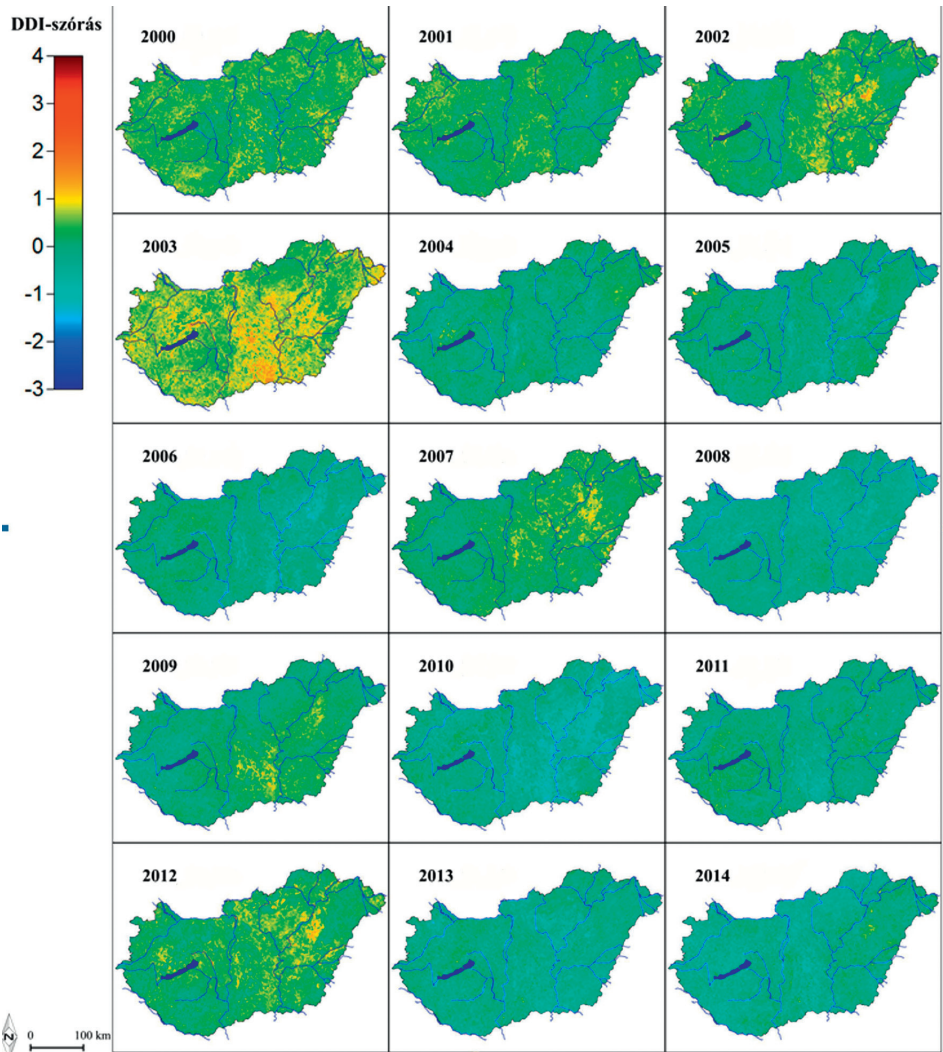
$$PAI = -10,904 + 0,0286 \cdot DDI \quad (r^2=0,64, p=0,00035)$$

$$PAI = 27,367 - 52,421 \cdot NDWI \quad (r^2=0,82, p=3,25 \cdot 10^{-6})$$

$$PAI = 60,354 - 86,686 \cdot NDVI \quad (r^2=0,81, p=4,67 \cdot 10^{-6})$$

A vizsgálat során a terepi adatok és a műholdas adatokra alapozott elemzések között néhány anomáliát tapasztaltunk. A regressziós egyenletek alapján kalkulált Pálfai-féle aszályindex és a tényleges PAI értékek összehasonlításakor 2001-ben a DDI, NDDI – ellentétben a PAI-val – aszályt jelez, az NDDI ráadásul 2001-ben veszi fel maximum értékét. A 2013. év a PAI szerint aszályos, míg a DDI szerint nem az. Az NDVI csak 2005-ben tér el jelentősebben a PAI-tól, míg az NDWI ezen kívül még 2013-ban is.

Az országos PAI értékekkel való összevethetőség miatt fontos, hogyan befolyásolja a felszínborítás heterogenitása a különböző index értékeket; azaz mik adnak aszályos

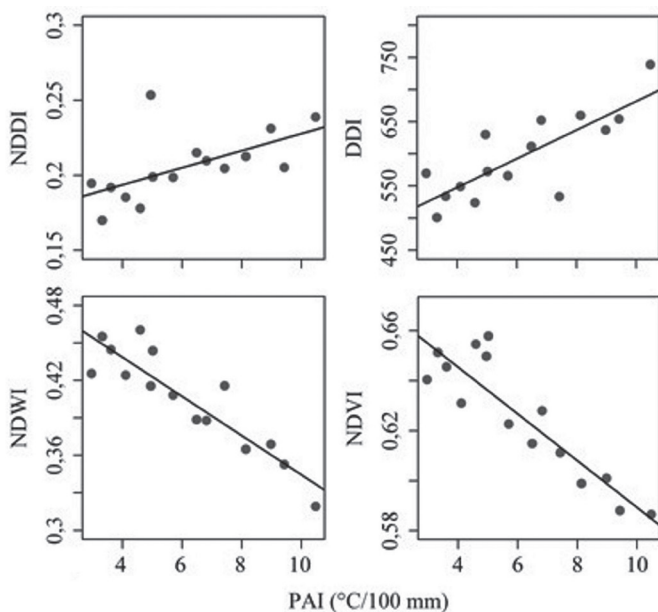


6. ábra Hazánk tenyészidőszaki aszálytérképei az átlagtól vett DDI szórások alapján (2000–2014)

Figure 6 Drought maps of Hungary based on the deviations of DDI compared to the multiannual average (2000–2014)

jelet? A klaszteranalízis során számolt eredményklaszterek közül azok tekinthetők aszályosnak, melyek meghaladják a 2000–2014 közötti tenyészidőszaki átlagtól vett egyszeres szórásértéket.

Az NDDI, NDWI és az NDVI esetén aszályosnak osztályozódtak a városi felszínek. Az NDWI nem képes elkülöníteni a vízfelszínt a nagy nedvességtartalmú növényzettől. A DDI országosan alkalmazható, mert nem ad kiugró értéket beépített felszínek esetén, érzékeli a nagyobb vízfelületeket. Az NDWI és az NDVI esetén fontos lehet a vegetációval borított felszínek pontos lehatárolása. A CORINE LAND COVER 2000–2006–2012 adatbázis szerinti másfél évtized alatt az ország felszínborításának körülbelül 6%-a változott meg, aminek több mint a fele erdőgazdasági változás. Az erdőgazdálkodás irtásai



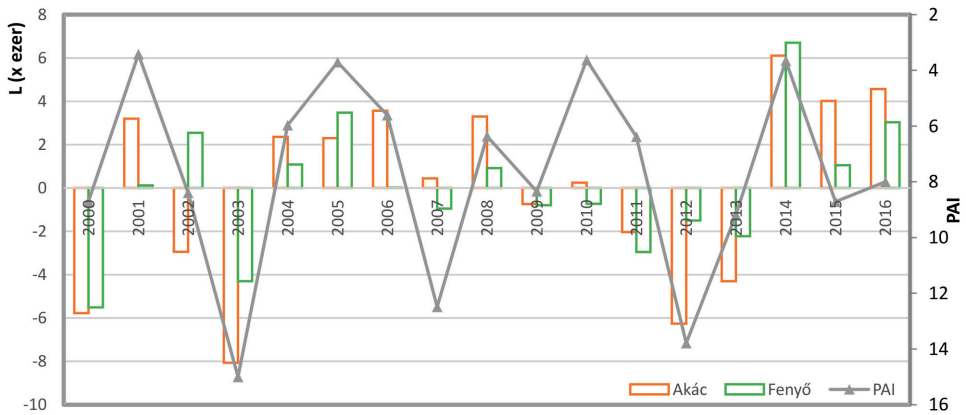
7. ábra A spektrális indexek és a PAI kapcsolata lineáris regressziók alapján
 Figure 7 Relationship between the spectral indices and the PAI using linear regression

és telepítései, mesterséges beépítések, a mezőgazdasági változások is befolyással vannak az indexértékekre, de mindezek az alkalmazott léptékben elfogadható mértékű bizonytalanságot eredményeznek.

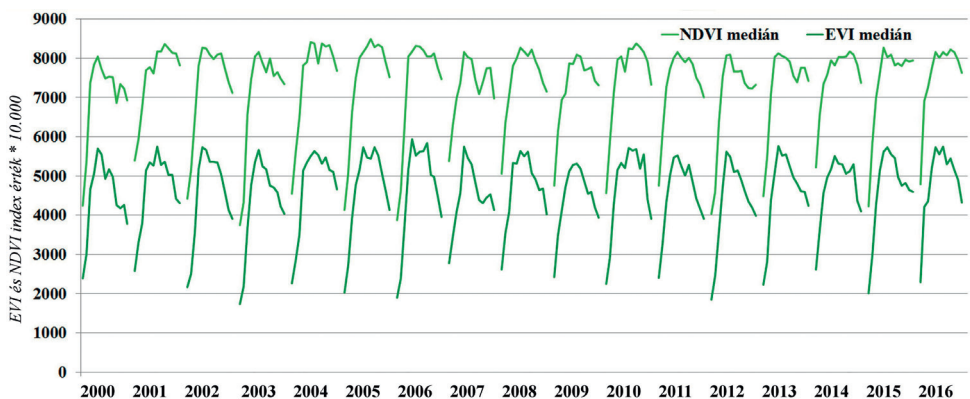
EVI biomassza produkció és a Pálfai index összefüggéseinek értékelése (2000–2016)

A DDI index alapján végzett vizsgálathoz hasonlóan, a vízhiány szempontjából kitett illanci mintaterületen 2003 és 2012 voltak a legaszályosabb évek, mely években a vizsgált fenyő és akác erdők is jelentős negatív biomassza produkció anomáliát mutattak (8. ábra). Jelentős negatív eltérés jellemezte még a 2000-es évet is, mely évben a mintaterületen az igen kevés (300 mm-t megközelítő) csapadék, valamint a növények számára nem elérhető talajvíz-készlet játszott szerepet. Habár 2007-ben a PAI index aszályos évet jelez, a biomassza produkcióban negatív eltérés nem mutatkozik, melynek oka lehet a 2006-os csapadékos év kedvezőhatása is a növényzet számára. Általánosságban elmondható, hogy az akác a fenyőhöz képest az aszályos években jelentősebb negatív anomáliákat mutatott. A csapadékos években (pl. 2004, 2006, 2014) a vizsgált erdők biomassza produkciói pozitív anomáliát mutattak, viszont a 2010-ben tapasztalt extrém mennyiségű (1000 mm feletti) csapadék nem eredményezett extrém mértékben kiugró anomáliát egyik faj esetében sem, melynek oka a homok talajnak köszönhető gyors beszivárgás és a mélyen fekvő talajvízszint.

A vegetáció ebben a tájban is nagymértékben függ a csapadék és hőmérséklet viszonyoktól, amely jól visszatükröződik a vegetáció biomassza produkciója és a PAI aszály-index szoros kapcsolatában. A lineáris regresszió vizsgálat eredményéül kapott determinációs koefficiens értéke nem magas ($0,259 < r^2 < 0,424$), melynek okai az esetleges helyi módosító tényezőkben, az egymást követő extrém vízellátású évek növényzetet befolyásoló hatásában, és a fajokra jellemző belső tulajdonságokban is kereshetők.



8. ábra Az EVI értékek alapján számolt éves biomassza termelést jellemző görbe alatti terület (L) és a PAI összefüggése a szűkebb mintaterületen (Illancs)
 Figure 8 Relationship between PAI and the annual biomass production (L) on the Illancs study area



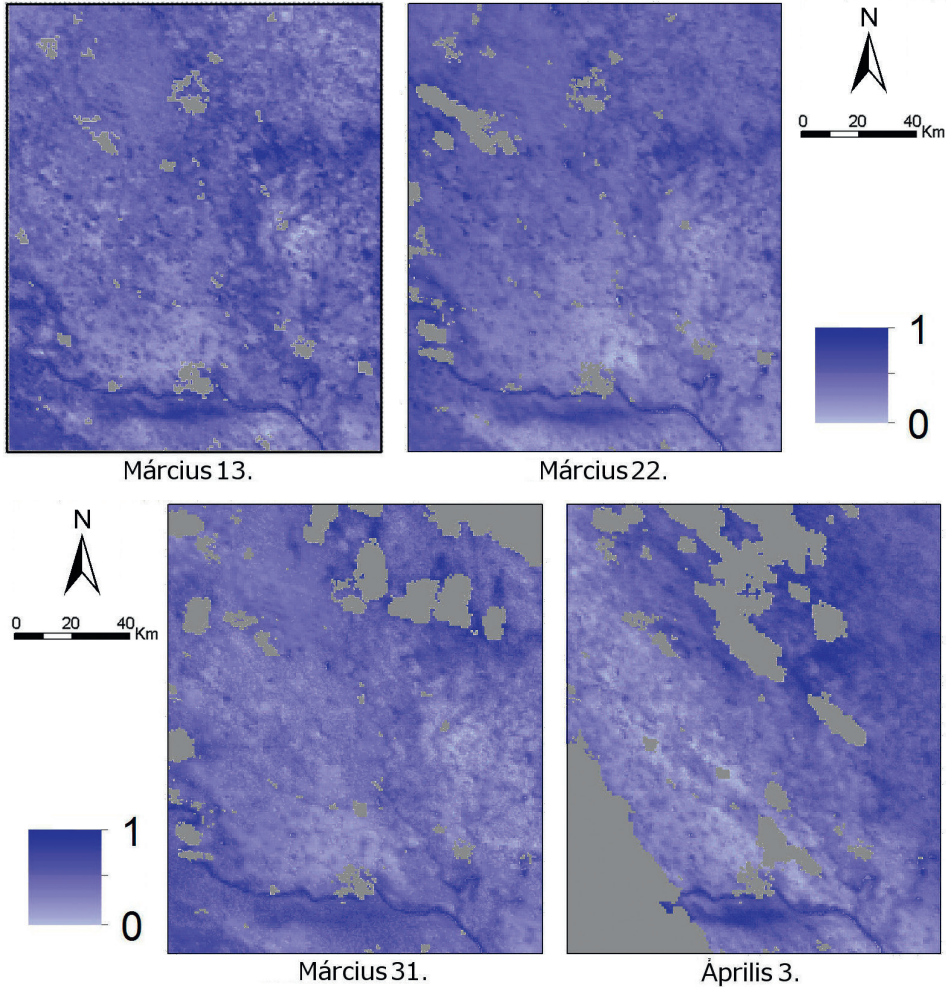
9. ábra Lomblevelű erdő EVI és NDVI medián értékei 2000–2016 között
 Figure 9 Median NDVI and EVI values of deciduous forests between 2000 and 2016

A Duna–Tisza közére kiterjedő átfogó vizsgálat 2000–2016 közötti, lomblevelűeket jellemző adatsorában trend nem mutatható ki (9. ábra). A legmagasabb értékeket a 2006. évben találjuk, ami a 2004. márciustól jellemző kedvező, csapadékosabb időszak csúcserőssége, de jellemző, hogy ez a 2007. szárazabb évre gyorsan lecsökken. 2010. évre is hiába jellemző a rekord mértékű csapadék, egyedülálló nedvesebb évként nem mutat kiugró indexeredményeket. A változásokat tekintve feltűnő a 2006–2009 közötti csökkenés. A 2006. és 2010. évek változékonyságán is jól látható a csapadék és a spektrális indexek közötti kapcsolat. A lomblevelű felszín az ezredforduló óta kb. 15%-os növekedést mutatnak, de ennek a biomassza-termék növekedése már 38%.

Az aszály számszerűsítése MODIS termékekből számolt talajnedvesség adatokkal

Az összes 16 napos időszakra letöltöttük a napi MOD11 és MOD13 termékeket 2015. január 1. és november 1. között. Minden jó minőségű adattal rendelkező napra készítettünk SMI térképet. A 10. ábra négy időpontban szemlélteti az elkészült, 1000 m-es felbontású

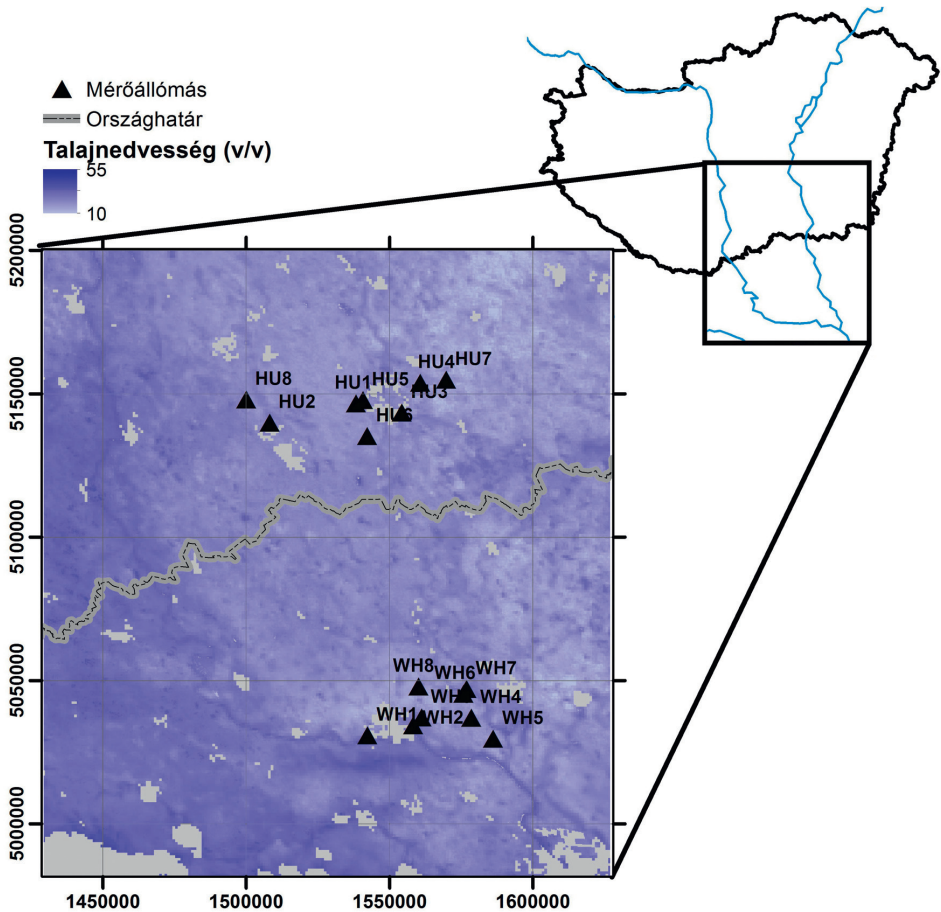
térképeket, melyek a mintaterület talajnedvességének relatív eltéréseit szemlélteti, ahol 0 a legalacsonyabb, míg 1 a legmagasabb talajnedvesség értéket jelöli. A térképeken a folyókat övező ártéri területek, a szárazabb homoktalajok és az erdős területek jól kirajzódnak. A kimeneti adatokon gyakran látható „lyukakat” a felhőborítás (vagy a jó minőségű adatgyűjtést akadályozó egyéb probléma) következtében jelentkező adathiány okozza.



10. ábra A számított talajnedvesség index (SMI) értékei négy választott időpontban a mintaterületen
 Figure 10 Calculated SMI maps of the study area for four selected days

Az elkészült talajnedvesség-index térképeken a talajnedvességbeli különbségek jól azonosíthatóak. A folyók esetében (különösen a Duna mentén) igen nagy SMI értékek tapasztalhatóak, valamint átlagtól magasabb értékeket mutatnak a térképek Bajától nyugatra, a hármashatárnál, illetve a horvát területeken is. Feltűnően alacsony értékek vannak Újvidéktől ÉÉNY-ra, a szerb-román határ mentén, valamint Magyarországon Békés megye és Kecskemét–Szolnok környékén. A kapott talajnedvesség értékeket visszaigazolja a tényleges (március elejei) csapadékesemények előfordulása.

A 16 terepi talajnedvesség-mérő állomás adatait használva kiszámítottuk a terepen mért talajnedvesség adatok és az SMI index közötti kapcsolat mértékét. Az eredményül kapott determinációs koefficiens (r^2) értékei 0,1 és 0,95 között változtak, ami a kapcsolat mértékének változó erősségét jelzi, ezért a térképet csak azokra a napokra készítettük el, ahol a kapcsolat szignifikánsnak mondható, azaz az r^2 értéke nagyobb volt, mint 0,4. A vizsgálatba vont 305 napból ez 82 napra volt lehetséges. A 11. ábrán a 2015. március 11-i talajnedvesség-adatokat szemléltetjük.



11. ábra A vizsgált mintaterület talajnedvesség térképe 2015. március 11-én
 Figure 11 Soil moisture map of the study area on 11 March 2015

Számos oka lehet annak, hogy a determinációs koefficiens értékei ilyen alacsonyak. Egyrészt jelentős különbség van a terepi pontmérés és a távérzékelte adat felbontása között. A távérzékelte adat egy pixelében a vegetáció, a domborzat, a talaj és más tényező is változatos, melyek befolyásolják a talajnedvesség értékeit, és nem feltétlenül egyeznek meg a pontmérés eredményével a pixelen belül. Mindezek alapján a terepi mérés eredményei nem értékelhetők reprezentatívnak a nagyobb területre vonatkozóan. Másrészt, a terepi talajnedvesség-mérés a felszíntől 10 cm mélységben zajlik, míg a távérzékelte talajnedvesség értékét felszíni hőmérséklet és vegetációs indexadatok alapján számítjuk. A talajnedvesség

értékét a felszín alatt 10 cm mélységben befolyásolja továbbá a felszínt borító vegetáció típusa és sűrűsége is. További módosító tényező lehet az is, hogy a csapadék hatása később jelenik meg a 10 cm-es mélységben a távérzékelt felszíni talajnedvességhez viszonyítva. A távérzékelt felszínhőmérséklet adat felbontása 1°K (WANG, Z. 1999).

Összefoglalás és konklúzió

A Pálfai-féle aszályindexszel fennálló statisztikai összefüggéseket figyelembe véve az NDWI, az NDVI és a DDI teljesíti a gyakorlati alkalmazhatóság feltételeit, szakmailag szignifikánsak. Vizsgálataink megerősítették korábbi megállapításainkat, miszerint az NDDI nem alkalmazható, illetve az NDWI nagyobb érzékenységgel bír, mint az NDVI. A DDI nem érzékeny a felszínborítás heterogenitásaira, míg az NDWI és az NDVI esetében le kell válogatni a növényzettel borított felszíneket. Az EVI index alapján meghatározott éves biomassza produkció jelentős mértékű kapcsolatot mutatott az aszályindex értékeivel, bár ezen értékek éves produktumot mutatnak, csak a múltbéli aszályok térbeli és időbeli lehatárolását segítik.

A bemutatott talajnedvesség számítási módszer, melyben közepes felbontású felszíni hőmérséklet és talajnedvesség adatokat használtunk, értékes adatokat szolgálhat az aszály regionális léptékű megfigyeléséhez. A validáció során nagy szórást mutattak a determinációs koefficiensek a mért talajnedvesség és a számított index értékei között, mely mögött főleg a két adatforrás léptékbeli különbsége állhat. A felszíni mérőhálózat bővítése és nagyobb térbeli eloszlása a mintaterületen várhatóan a kapcsolat mértékének növekedését eredményezheti.

Az előrejelzések az éghajlati szélsőségek növekedését mutatják, ezért fontos, hogy a jelenleg a tájban zajló folyamatok tér- és időbeliségét monitorozzuk, az aszály kialakulását, hatását megfigyeljük. A közeljövőben kiépítendő aszálymonitoring rendszer keretében, spektrális indexek alapján működő, megbízható előrejelzés megvalósítása segítené az optimálisabb vízelosztást és -felhasználást, dinamikusan lehatárolható a legsúlyosabban érintett térségek. Az amerikai távérzékelési műholdak (AVHRR, MODIS) által több, mint három évtizede folyamatosan végzett megfigyelések folytonosságát az új generációs szenzor a VIIRS biztosítja 22 hullámhossz-tartományban, 375-750 m-es geometriai felbontással.

Köszönetnyilvánítás

A tanulmány a Bolyai János Kutatási Ösztöndíj, a TÁMOP-4.1.1. C-12/1/KONV-2012-0012 (ZENFE), valamint a HUSRB/1203/121/130 (WAHASTRAT) projekt támogatásával készült.

KOVÁCS FERENC
SZTE TTIK Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged
kovacs@geo.u-szeged.hu

VAN LEEUWEN BOUDEWIJN
SZTE TTIK Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged
leeuwen@geo.u-szeged.hu

LADÁNYI ZSUZSANNA
SZTE TTIK Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged
ladanyi@geo.u-szeged.hu

RAKONCZAI JÁNOS
SZTE TTIK Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged
J.Rakonczai@geo.u-szeged.hu

GULÁCSI ANDRÁS
SZTE TTIK Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged
gulandras90@gmail.com

IRODALOM

- BARTA K. – BATA T. – BENYHE B. – BRKÍČ, M. – DOGAN, V. – DOLINAJ, D. – FARSANG A. – GÁL N. – HENITS L. – JUHÁSZ L. – KISS T. – KOVÁCS F. – MEZŐSI G. – MUCSI L. – MÉSZÁROS M. – OBRADOVIĆ, D. – PAVIĆ, D. – RAKONCZAI J. – SAVIĆ, S. – SIPOS GY. – SÜMEGHY B. – SZATMÁRI J. – SZILASSI P. – TOBAK Z. – VAN LEEUWEN B. – ŽIVANOV, M. 2013: Inland excess water / Belvóz / Suvišne unutrašnje vode. – Szegedi Tudományegyetem, Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Univerzitet u Novom Sadu, Prirodno-matematički fakultet, Fakultet tehničk nauka, Szeged–Novi Sad, p. 154.
- BARTA K. – CRNOJEVIĆ, V. B. – BLANKA V. – LADÁNYI ZS. – FIALA K. – VUKOBRATOVIĆ, D. 2014: Terepi talajnedvesség megfigyelés az aszálykutatás szolgálatában. – In: BLANKA, V. – LADÁNYI, Zs. (szerk.) Aszály és vízgazdálkodás a Dél-Alföldön és a Vajdaságban – Suša i upravljanje vodama u južnojmađarskojraavnici i Vojvodini – Drought and Water Management in South Hungary and Vojvodina. – Szegedi Tudományegyetem Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék. pp. 245–258.
- BARTHOLY J. – PONGRÁCZ R. 2007: Regional analysis of extreme temperature and precipitation indices for the Carpathian Basin from 1946 to 2001. – *Global and Planetary Change* 57. 1–2. pp. 83–95.
- BIRÓ M. – RÉVÉSZ Á. – MOLNÁR ZS. – HORVÁTH F. – CZÚCZ B. 2008: Regional habitat pattern of the Danube-Tisza Interfluvium in Hungary II. The sand, the steppe and the river vegetation, degraded and regenerating habitats, regional habitat destruction. – *Acta Botanica Hungarica* 50. 1–2. pp. 19–60.
- BLANKA V. – LADÁNYI Z. (szerk.) 2014: Aszály és vízgazdálkodás a Dél-Alföldön és a Vajdaságban / Suša i upravljanje vodama u južnojmađarskojraavnici i Vojvodini / Drought and water management in South Hungary and Vojvodina. – Szegedi Tudományegyetem, Természeti Földrajzi és Geoinformatikai Tanszék, Szeged, p. 384.
- GU, Y. – BROWN, J. F. – VERDIN, J. P. – WARDLOW, B. 2007: A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States. – *Geophysical Research Letters* 34.
- GULÁCSI A. – KOVÁCS F. 2015: Drought monitoring with spectral indices calculated from MODIS satellite images in Hungary. – *Journal of Environmental Geography* 8. 3–4. pp. 11–19.
- HUETE, A. – DIDAN, K. – MIURA, T. – RODRIGUEZ, E.P. – GAO, X. – FERREIRA, L.G. 2002: Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. – *Remote Sensing of Environment* 83. 1–2. pp. 195–213.
- IVÁNYOSI SZABÓ A. 1994: A Duna–Tisza közti hátságon bekövetkezett talajvízszint-süllyedés hatása természetvédelmi területeinkre. – In: PÁLFAI I. (szerk.): A Nagyalföld Alapítvány kötetei 3. A Duna–Tisza közti hátság vízgazdálkodási problémái, Nagyalföld alapítvány, Békéscsaba, pp. 77–85.
- JACKSON, T.J. – CHEN, D. – COSH, M. – LI, F. – ANDERSON, M. – WALTHALL, C. – DORIASWAMY, P. – HUNT, E. R. 2004: Vegetation water content mapping using Landsat data derived normalized difference water index for corn and soybeans. – *Remote Sensing of Environment* 92. pp. 475–482.
- KOVÁCS F. 2007: Assessment of regional variations in biomass production using satellite image analysis between 1992 and 2004. – *Transactions in GIS*. 11. 6. pp. 911–926.
- KOVÁCS F. 2013: GIS analysis of short and long term hydrogeographical changes on a nature conservation area affected by aridification. – *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 8. 3. pp. 97–108.
- KOZÁK P. 2015: Élővízvédekezés és a vizek használata az Alsó-Tisza vidékén. Országos Mezőgazdasági Vízgazdálkodási és Belvízvédelmi Konferencia, SzIE, Szarvas.
- MALLICK, K. – BHATTACHARYA, B.K. – PATEL, N.K. 2009: Estimating volumetric surface moisture content for cropped soils using a soil wetness index based on surface temperature and NDVI. – *Agricultural and Forest Meteorology* 149. 8. pp. 1327–1342.

- MEZŐSI G.–BLANKA V.–LADÁNYI ZS.–BATA T.–URDEA, P.–FRANK, A.–MEYER, B. 2016: Expected mid- and long-term changes in drought hazard for the South-Eastern Carpathian Basin. – *Carpathian Journal of Earth and Environmental Sciences* 11. 2. pp. 355–366.
- MIKA J. 2014: Szünetelő melegedés – kihívások és következtetések az IPCC jelentéseiben (2013–2014). – In: SANSUMNÉ MOLNÁR, J.–SISKÁNÉ SZILASI, B.–DOBOS, E. (szerk.): VII. Magyar Földrajzi Konferencia kiadványa, Miskolc, pp. 421–428.
- NÉMETH A. 2015: Hosszú, forró nyár (Klímaváltozás a hétköznapokban). – *Heti Világ Gazdaság (HVG)* 31, pp. 6–9.
- OVF-ATIVIZIG 2016. Integrált vízháztartási tájékoztató és előrejelzés. Országos Vízügyi Főigazgatóság és Alsó-Tisza-vidéki Vízügyi Igazgatóság.
<https://www.vizugy.hu/index.php?module=documents&programelemid=108>
- PÁLFAI I. (szerk.) 1994: A Duna–Tisza közti hátság vízgazdálkodási problémái. – A Nagyalföld Alapítvány kötetei 3, Békéscsaba. p. 126.
- PATEL N.R.–ANAPASHISHA R.–KUMAR S.–SAHA S.K.–DADHWAL V.K. 2009: Assessing potential of MODIS derived temperature/vegetation condition index (TVDI) to infer soil moisture status. – *International Journal of Remote Sensing*, 30.1. pp. 23–39.
- PETROPOULOS G. (szerk.) 2014: Remote Sensing of Energy Fluxes and Soil Moisture Content. – CRC Press, Boca Raton, Florida, USA
- PUSKÁS I.–GÁL N.–FARSANG A. 2012. Impact of weather extremities (excess water, drought) caused by climate change on soils in Hungarian Great Plain (SE Hungary). – In: RAKONCZAI, J.–LADÁNYI, ZS. (eds.): Review of climate change research program at the University of Szeged, pp. 73–89.
- RAKONCZAI J. 2011: Effects and consequences of global climate change in the Carpathian Basin, In: BLANCO, J.–KHERADMAND, H. (eds.): Climate Change – Geophysical Foundations and Ecological Effects. Rijeka: InTech. pp. 297–322.
- RÉTHLY A. 2009: Időjárási események és elemi csapások Magyarországon 1700-ig és Időjárási események és elemi csapások Magyarországon 1701–1800-ig. – OMSZ. Budapest. pp. 450–622.
- ROY, D. P.–BORAK, J. S.–DEVADIGA, S.–WOLFE, R. E.–ZHENG, M.–DESCLOITRES, J. 2002: The MODIS Land Product Quality Assessment Approach. – *Remote Sensing of Environment* 83, pp. 62–76.
- SENEVIRATNE, S. I.–CORTI, T.–DAVIN, E. L.–HIRSCHI, M.–JAEGER, E. B.–LEHNER, I.–TEULING, A. J. 2010: Investigating soil moisture–climate interactions in a changing climate: a review. – *Earth-Sci. Rev.* 99. 3–4. pp. 125–161.
- SOLANO, R.–DIDAN, K.–JACOBSON, A.–HUETE, A. 2010: MODIS Vegetation Index User's Guide (MOD13 Series). The University of Arizona Vegetation Index and Phenology Lab. 38. p.
- VAN LEEUWEN, B.–LADÁNYI ZS.–BÁTORI D. 2016: Medium resolution satellite data based estimation of phenology and productivity parameters for drought monitoring. – In: BALÁZS B. (szerk.): Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában VII. Theory meets practice in GIS. Debreceni Egyetemi Kiadó, pp. 499–506.
- VICENTE, S. M.–SERRANO, PONS-FERNANDEZ, X.–CUADRAT-PRATS, J. M. 2004: Mapping soil moisture in the central Ebro river valley (northeast Spain) with Landsat and NOAA satellite imagery: a comparison with meteorological data. – *International Journal of Remote Sensing*, 25. 20. pp. 4325–4350.
- Vidékfejlesztési Minisztérium 2012: Az aszály kezelésének hosszú távú koncepciójáról. – Konzultációs anyag. Budapest. p. 88.
- WANG, Z. 1999: MODIS Land Surface Temperature Algorithm Theoretical Basis Document (LST ATBD) pp. 2–6.