Erdészettudományi Közlemények 11. évfolyam 1-2. szám 2021

DOI: https://doi.org/10.17164/EK.2021.009 83–94. oldal

A SÁRVÁRI FARKAS-ERDŐ SENTINEL-2 ŰRFELVÉTEL ALAPÚ ERDŐMONITORING TERVE

Molnár Tamás[1,2] és Király Géza[2]

[1]Soproni Egyetem, Erdészeti Tudományos Intézet, Ökológiai és Erdőművelési Osztály
[2]Soproni Egyetem, Erdőmérnöki Kar, Geomatikai és Kultúrmérnöki, Földmérési, Geoinformatikai és Távérzékelési Tanszék

Kivonat

A Sárvári Farkas-erdőre kifejlesztett űrfelétel alapú távérzékelési erdőmonitoring rendszer olyan felhőszolgáltatásokon alapul, ahol a nagyfelbontású ESA Sentinel-2 űrfelvételek feldolgozása, elemzése és megjelenítése online a Google Earth Engine rendszerében történik. A monitoring rendszer célja az erdő egészségi állapotváltozásának folyamatos és térbelileg pontos megfigyelése és elemzése a vizsgálati időszakra, 2017 és 2020 között, vegetációs és nedvességi indexekből készült térképek és grafikonok segítségével. Validálásként a terepi kárbejelentő lapokkal vetettük össze a távérzékelt adatokat.

Kulcsszavak: erdőmonitoring, távérzékelés, űrfelvétel, felhőszolgáltatás, Sentinel-2, Google Earth Engine

A FOREST MONITORING PLAN OF FARKAS-ERDŐ OF SÁRVÁR BASED ON SENTINEL-2 SATELLITE IMAGES

Abstract

The satellite based remote sensing forest monitoring system of Farkas-erdő of Sárvár was created to utilize high resolution ESA Sentinel-2 images and cloud computing, where processing, analysing, and displaying of health state changes of forests takes place online, in the Google Earth Engine. The system aims to monitor the forest health state change constantly with high precision in the investigation period of 2017–2020, using maps and graphs based on vegetation and moisture indices. Remotely sensed data was compared to field-based damage reports for validation purposes.

Keywords: forest monitoring, remote sensing, Sentinel-2, satellite image, Google Earth Engine, cloud solutions

BEVEZETÉS

A felhőszolgáltatások felhasználásával olyan erdőmonitoring rendszereket lehet létrehozni, melyek térbelileg és időbelileg is nagyfelbontású űrfelvételeken alapulnak, és amelyeknél az adatok tárolása, elemzése és megjelenítése is a felhőben, online megírt programokkal történik, jelentősen csökkentve a felhasználó erőforrásigényét.

Levelező szerző/Correspondence:
Molnár Tamás, H-1227 Budapest Pf. 17. E-mail: molnar-tamas@uni-sopron.hu

A távérzékelési erdőmonitoring rendszer kifejlesztésének célja ennek az új technológiának a gyakorlatba való átültetése, a Google Earth Engine (GEE) programozási platformjának segítségével (Gorelick et al 2017). A GEE alkalmazásának célja az erdők területét és egészségi állapotát érintő változások folyamatos monitorozása az ESA Sentinel-2 űrfelvételein, földrajzilag pontosan lehatárolható és rendszeresen frissített formában. Korábbi tanulmányok alapján, a GEE segítségével felszínborítás változás (Osei et al 2019) illetve degradáció is kimutatható trópusi (Hamunyela et al 2020) és mérsékelt övi (Chen et al 2021) erdőkben is 91%-os pontossággal.

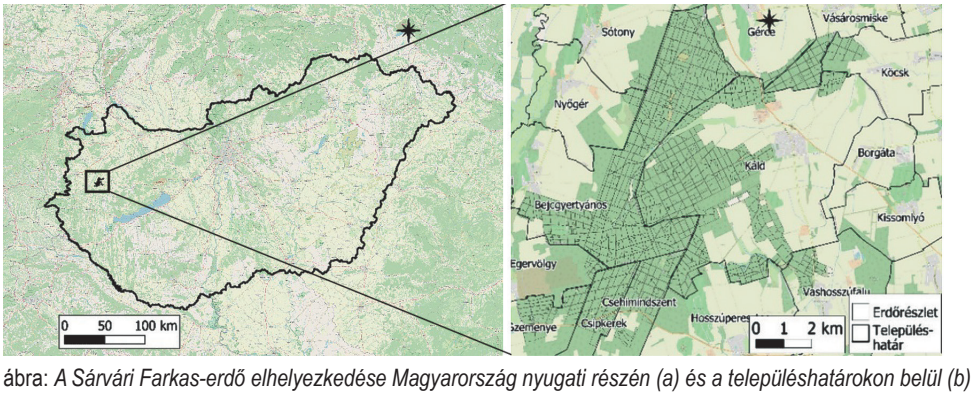
A GEE felhőalapú monitoring rendszer fejlesztési előzménye a Soproni Egyetem Erdészeti Tudományos Intézetében (SOE ERTI) kifejlesztett Távérzékelésen alapuló Erdőállapot Monitoring Rendszer („TEMRE"), mely a NASA Terra műholdjának MODIS, az ESA Sentinel-3 OLCI és Sentinel-2 MSI érzékelői által készített, ingyenesen elérhető, 250×250, 300×300 ill. 10x10 méteres, közepes ill. nagyfelbontású műholdképeit használja fel (Somogyi et al 2018a, 2018b). Az adatok begyűjtése, hibaszűrése, maszkolása és térképi megjelenítése automatikusan, R és php nyelveken írt algoritmusokkal történik, Geoserver használatával. Az így létrehozott, a vegetációs időszak alatt 12–16 naponta frissített térképek az erdők aktuális és múltbeli fotoszintetikus aktivitásának mértékét mutatják, Z NDVI (standardizált NDVI) értékekkel. Az új monitoring rendszer fejlesztésénél az itt alkalmazott módszertant vettük alapul.

Ezt a rendszert a Sárvári Farkas-erdőn teszteltük, és a mintaterület kiválasztását több tényező is indokolta: a vizsgálati módszer kapacitásának megfelelő, összefüggő erdőtömb megléte, az erdőgazdálkodónál rendelkezésre álló terepi adatok és az elmúlt években bekövetkezett erdőkárok, melyek kimutathatóságát kívántuk tesztelni a GEE segítségével. Az új rendszer hatékonyságát az Országos Erdőkár Nyilvántartási Rendszer terepi káradataival és a TEMRE-ben készült műholdképekkel is összevetettük.

ANYAG ÉS MÓDSZER

A Sárvári Farkas-erdő mintaterület

A Sárvár és Káld települések között található 7200 hektáros kocsányos tölgyes-bükkös-gyertyános elegyes erdő a Nyugati-Dunántúli erdészeti nagy-, Kemeneshát közép- és Alsó-Kemeneshát kistájhoz tartozik, ahol a Szombathelyi Erdészeti Zrt. Sárvári Erdészete felel az erdőgazdálkodásért. Ennek az erdőnek a Sárvártól délre eső 5500 hektáros egybefüggő védett részében a fő fafajok a kocsányos (*Quercus robur*), kocsánytalan (*Quercus petraea*) és cser tölgyek (*Quercus cerris*), a bükk (*Fagus sylvatica*), a gyertyán (*Carpinus betulus*), az erdeifenyő (*Pinus sylvestris*) és az akác (*Robinia pseudoacacia*). A cikk vizsgálatai területe a védett tömb 5160 hektárát érinti (1. ábra), mely az erdővel nem borított erdőrészleteket (vízfelület, rakodó, vadföld, utak stb.) már nem tartalmazza.

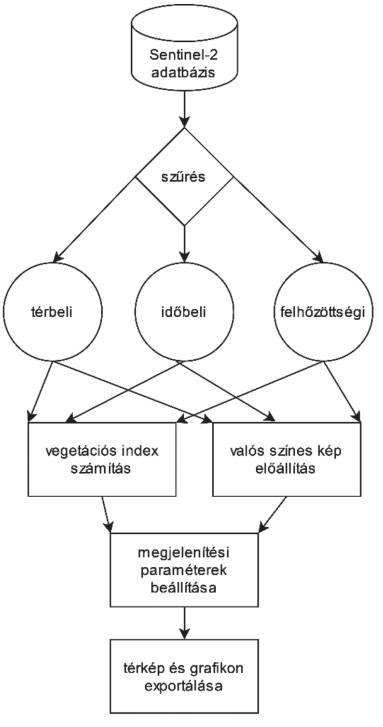


1. ábra: *A Sárvári Farkas-erdő elhelyezkedése Magyarország nyugati részén (a) és a településhatárokon belül (b)*
Figure 1: *Location of Farkas-erdő of Sárvár in Western-Hungary (a) and inside the municipality borders (b)*

Google Earth Engine

A Google Earth Engine (GEE) egy a nagy méretű geoinformatikai adatok (big data) felhőalapú, online feldolgozására alkalmas platform (Gorelick et al 2017), mely kiválóan használható többek között a felszínborítás és a földhasználat-változás nyomon követésére Osei et al (2019) szerint, és az erdőmonitoring céljaira is Hamunyela et al (2020) kutatásai alapján. A GEE kódszerkesztői felületén JavaScript nyelven megírt algoritmusokkal online, gyorsan, nagy területen és ingyenesen lehetséges az erdő monitorozása.

A GEE felhőtárhelyén elérhető geoadatbázisok közül az Európai Űrügynökség (ESA) Sentinel-2 műholdjainak űrfelvételeit használtuk az erdő egészségi állapotának és annak változásának meghatározására. A TEMRE-hez alapjaiban hasonlító új erdőmonitoring rendszer már a nagyfelbontású, 10×10 m-es Sentinel-2 A és 2B MSI érzékelőjének multispektrális műholdfelvételeket használja, melyek elérése, tárolása, feldolgozása, elemzése és megjelenítése, az interneten keresztül, a felhőben valósul meg.
A GEE-ben alkalmazott módszertan több lépésből áll (2. ábra).



2. ábra: *A Sárvári Farkas-erdő GEE monitoring rendszertervének folyamatábrája*
Figure 2: *The GEE flowchart of the planned monitoring system of Farkas-erdő of Sárvár*

Az első lépés a Sentinel-2 L2A (COPERNICUS/S2_SR) atmoszférikusan korrigált, felszíni reflektanica értékeket tartalmazó gyűjtemény kiválasztását jelenti a GEE központi adatbázisából.
Másodikként a felhőszűrés történik meg két lépésben. Az első előszűrést jelent, ahol csak az 5% alatti felhőborítású képeket tartottuk meg (az 5% a csempénkénti adatokra vonatkozik), a másik lépés a GEE-ben használt QA60-as bitmaszk sáv használatát, ahol a 60×60 m-es felhőmaszk csatorna 10-es és 11-es bitjének 0-s értéke a felhők hiányára utal, ezzel végezve a szűrést.

Az időtartam szűrés a vegetációs időszak első és utolsó napjának megadásával minden évre külön (pl. 2020-ra: 2020. április 15-től szeptember 30-ig) történik, mely alapján éves kompozit térképek készíthetők a vegetációs időszak pixeleinek összevonásával és a középértéket mutatva. Az aggregáció a vizsgálati terület összes képpontjára és a vegetációs időszak összes elérhető felvételére vonatkozik.

A harmadik lépésben az adatösszesítés történik: minimum, átlag, középérték, maximum, szórás alapján az adatokat össze kell vonni, hogy a nagyszámú pixel ellenére lehetséges legyen a további feldolgozás, elemzés és megjelenítés. Ennek módja hasonló az időtartam szűréshez. Ezt követi negyedikként a Vegetációs Indexek (VI) számítása az aggregált adatokból: NDVI (Normalizált Vegetációs Index), NDWI (Normalizált Nedvesség Index) és Továbbfejlesztett Vegetációs Index (EVI) térképek, majd ötödikként a VI változás rétegek számítása: NDVI Z standardizációval és NDVI változás különbség képzéssel.

A fotoszintetikus aktivitás becslésére a Normalizált Vegetációs Indexet (NDVI) (1) használja mind a TEMRE, mind a GEE rendszer, melynek számítása módja:

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (1)$$

ahol a NIR a közeli infravörös, a RED a vörös csatatornában mért felszíni reflektancia érték. A TEMRE-ben használt NASA által készített MOD13Q1 termék már tartalmazza az NDVI-t (NASA 2022), a Sentinel-ek esetében ezeket elő kellett állítani (ESA 2022a, 2022b) a GEE-ben. A cikkben alkalmazott vegetációs és vízindex-ekhez különböző érzékelők csatornáinak értékeit használtuk fel (1. táblázat), tartományban (MODIS és Sentinel-2) illetve központi hullámhosszban megadva (Sentinel-3).

1. táblázat: *A MODIS, OLCI és MSI műszerek spektrális érzékelési tartományai*
Table 1: *The spectral range of MODIS, OLCI and MSI sensors*

	MODIS		Sentinel-3 OLCI		Sentinel-2 MSI	
	sáv száma	tartomány (nm)	sáv száma	közép (nm)	sáv száma	tartomány (nm)
RED	*B1*	*620–670*	*Oa8*	*665*	*B4*	*650-680*
NIR	*B2*	*841–876*	*Oa17*	*778,75*	*B8*	*785-899*
SWIR	*B6*	*1628–1652*	–	–	*B11*	*1565-1655*
BLUE	*B3*	*459–479*	*Oa3*	*442,5*	*B2*	*458-523*

Ha az erdő egészségi állapotát egy 0-tól 1-ig terjedő NDVI skálán jelöltük, ahol a 0 közeli, alacsony értékek vegetációmentes talajfelszínt vagy alacsony fotoszintetikus aktivitású vegetációt jelentenek, míg a magasabb értékek dús lombozatú, egészséges erdei vegetációt. A valóságban az NDVI kb. 0,9 között tetőzik és változik a vegetációs periódus és a növényzet állapotának (kor, koronazáródás, nedvességtartalom stb.) és típusának megfelelően. Az ettől a maximumtól jelentősen eltérő (pl. 0,5–0,7) értékek bolygatottságot jeleznek, melyek az erdőkárok után jelentkeznek.

Az NDVI értékei azonban időben nagy változatosságot mutatnak, és önmagukban nem tájékoztatnak az átlagos viszonyoktól való eltérés mértékéről. Ezért a fotoszintetikus aktivitás jellemzésére az NDVI standardizált változatát (NDVI Z) (2) használjuk, melyet az alábbi képlet segítségével számítunk ki:

$$NDVI\ Z = \frac{NDVI - \overline{NDVI}}{\sigma\ \text{NDVI}} \quad (2),$$

ahol az NDVI az év adott időszakában mért érték, NDVI az adott időszaknak megfelelő többéves átlag (2000–2020 a MODIS esetében, 2017–2020 a Sentinel-nél), σ NDVI pedig az adott időszakra vonatkozó szórás. Az NDVI Z értékek színskáláján a negatív eltérések citromsárgával (Z<0), narancssárgával (Z <–1) illetve vörössel (Z <–2), a pozitív eltéréseket világos- (Z=0–1), illetve sötétzöld színekkel vannak jelölve (Z>1).
Az NDVI változás (3) két egymás utáni év NDVI kompozit-érték különbségét jelenti:

$$NDVI_{\text{változás}} = \text{NDVI}_{\text{év2}} - \text{NDVI}_{\text{év1}} \quad (3).$$

Az állapotváltozást mutató értékek egy –1-től 1-ig terjedő skálán helyezkednek el, jelen cikkben –0,5 és 0,5 közötti skálát használtunk, mert ilyen értékeket vett fel az index. Az erdőkárokra a negatív, míg a regenerációra (vagy fásításra) a pozitív értékek utalnak.

A Normalizált Nedvesség Index (NDWI) a vegetáció és a talaj víztartalmára érzékeny nedvességi vagy víz index (Gao 1996), ami azon alapszik, hogy a közeli infravörös (NIR) tartományban a falevél száraz részei visszaverik a sugárzást, míg a vízzel telítettek nem. A rövid hullámhosszú infravörös sugárzás (SWIR) mindkét esetben elnyeli a sugárzást és a kettő kombinációja kiszűri a levél belső szerkezete és szárazanyag tartalma miatti eltéréseket, csak a nedvességtartalmat mutatva. A NDWI képlete (4) a következő:

$$NDWI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (4).$$

Az NDWI elviekben –1 és 1 közötti értékeket vehet fel. A vizsgált esetben 0 és 0,5 közötti értékeket kaptunk, amiket fehértől sötétkékig terjedő kék színskálán jelöltünk. A sötétedő kék a magasabb víztartalomra utal, a világosabb a szárazodásra. Jelen tanulmányban a B11-es SWIR csatornát (1610 nm) használtuk, amit Ji et al (2011) szerint már a Normalizált Infravörös Index (NDII) kategóriába is lehet sorolni a hullámhosszak alapján.
A Továbbfejlesztett Vegetációs Index (EVI) (5): magas záródású lombkorona esetén hasznos, a kék csatorna (BLUE) a talajról visszaérkező jelek és az atmoszféra hatásait csökkentve javítja az NDVI pontosságát (Huete et al 2006):

$$EVI = 2{,}5 * \frac{NIR - RED}{\text{NIR} + 6 * \text{RED} - 7{,}5 * \text{BLUE} + 1} \quad (5).$$

Az EVI is –1 és 1 közötti skálát használja, ahol az egészséges, zárt vegetáció általában kb. 0,2–0,8 közötti értékeket vesz fel.

A hatodik lépés a valósszínes képek (RGB) elállítása a Sentinel-2 MSI felvételek RGB (vörös, zöld és kék) csatornáinak kompozitaként. Ezt követi a megjelenítési paraméterek beállítása: paletták, határok, sávok meghatározása: színskála, vonalvastagság, középpont stb.).

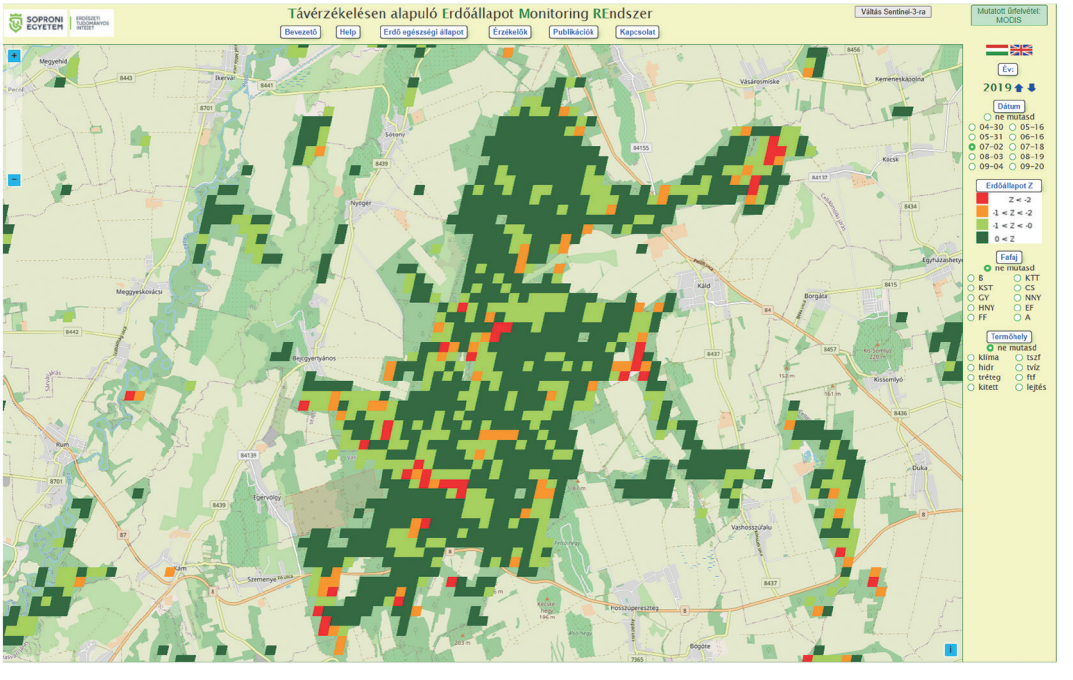
A hetedik és a nyolcadik lépésben történik a térképi megjelenítés a GEE platformon, az RGB és VI térképeké is, végül a grafikonoké: VI állapot és változás térképek éves és több éves változása összevont vonaldiagramon idősoros megjelenítéssel. Az utolsó két pontban történik a térképek kinyerése, exportálással a Google Drive-ra TIFF formátumban további elemzésre és a grafikonok kinyerése is, CSV, SVG vagy PNG formátumban szintén további elemzésre.

A rendszer tesztelése terepi káradatokkal

Az erdőmonitoring rendszer legfontosabb funkciója az erdőkárok felmérése és hatásainak műholdról történő, objektív nyomonkövetése. Ennek igazolására terepi referenciára is szükség van, melyhez az NFK és a SOE ERTI Országos Erdőkár Nyilvántartási Rendszerének (OENyR) adatait használtuk fel. Az erdőkártérképek elérhetőek az NFK weblapján 2013-tól kezdődően és évente frissítik őket (NFK EF 2020). Ezek a térképek az erdőgazdálkodók által kitöltött erdővédelmi kárbejelentőlapokra épülnek, feltüntetve a kárgyakoriságot és a kárerélyt. A gyakoriság az érintett területen, egy adott fafaj károsodással érintett egyedeinek aránya ugyanazon fafaj összes egyedeihez képest, százalékban kifejezve (0–100%). A kárerély hasonló skálán a kár súlyosságot jelzi. Ezen adatok mellett a kárral érintett területet is rögzítik, hektárban. Az így kitöltött táblázatos kárbejelentőkből geoinformatikai szoftverekkel térbeli poligonként lehet megjeleníteni az erdőrészletekhez rendelve. A távérzékelt adatokból (aszálykár, fagykár fiatalosban, vadkár) készült raszterek és a poligonok térbeli átfedését megvizsgáltuk, hasonló mintázatot keresve.

EREDMÉNYEK ÉS MEGVITATÁSUK

A fenti módszertannal készülő valósszínes, NDVI, NDWI, EVI, NDVI-változás és NDVI Z térképek az utóbbi négy év (2017–2020) állapotát és változását mutatják, így ezek kompozitok önmagukban és egymáshoz viszonyítva is érdekes tanulságokkal szolgálnak. A kompozitok kiértékelése során megvizsgáltuk a különböző felbontású VI térképek és a terepi káradat poligonokból készült térképek térbeli átfedését minden évben.

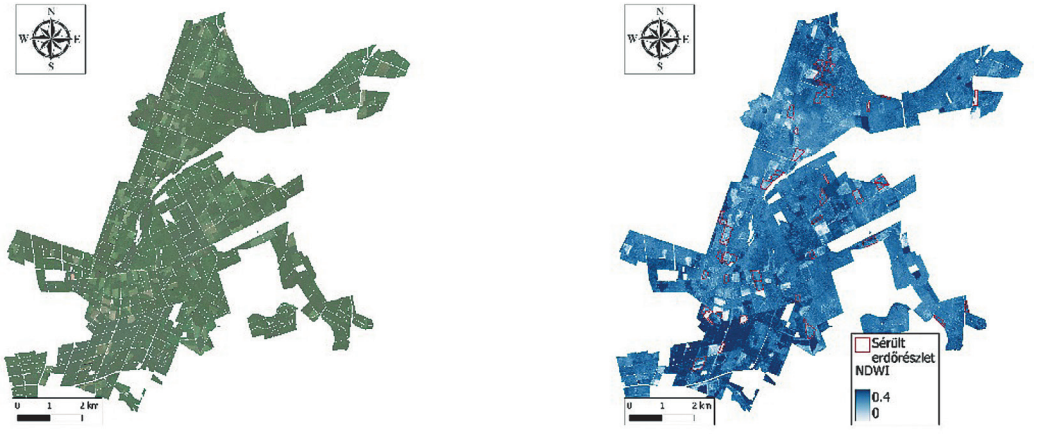


3. ábra: *A Sárvári Farkas-erdő MODIS NDVI anomália alapú egészségi állapota 2019 augusztusában, a TEMRE-ben. Az erdő bolygatottságát a narancssárga és piros pixelek jelzik*

Figure 3: *Forest health state of Farkas-erdő of Sárvár in August 2019 based on MODIS Z NDVI from TEMRE. Forest disturbances are marked with orange and red coloured pixels*

A Farkas-erdő középső részén már a közepes felbontású TEMRE-ben készült térképeken is láthatóak elváltozásra utaló sárga, narancssárga és piros pixelek 2018-ban és 2019-ben, melyek a későbbiekben részletezett vad- és aszálykárral lehetnek összefüggésben (3. ábra). Azonban a közepes felbontás nem elégséges az erdőrészleten belüli vizsgálathoz, ehhez a Sentinel-2 felvételeket használtuk.

A nagyfelbontású Sentinel-2 NDVI térképeket kiértékelve elmondható, hogy 2017-ben Nyőgér, Bejcgyertyános, Egervölgy, Hosszúpereszteg és Káld településhatárokon belül is számos alacsonyabb fotoszintetikus aktivitással rendelkező erdőrészlet látható (4., 5., 6., 7. ábra). 2018-ban ezek az erdőrészletek magasabb értékekkel, javulást mutattak, ami 2019-ben tovább folytatódott, egyre több zöld pixellel a térképen. Ugyanakkor ebben az évben Egervölgyben több új valószínűsíthető erdőkár keletkezett, aminek hatása 2020-ban újfent csökkent, bár látható maradt, és újabb sérült erdőrészleteket is észleltünk Bejcgyertyánoson.



4. ábra: *A Sárvári Farkas-erdő Sentinel alapú valós színes (a) és NDWI térképe 2019-ben (b). Az erdő bolygatottságát a valós színes képen a világosbarna, míg az NDWI térképen a fehér képpontok jelzik*
Figure 4: *Forest health state of Farkas-erdő of Sárvár in 2019 based on Sentinel RGB (a) and NDWI (b). Forest disturbances are marked by light brown and white coloured pixels*

A feltehetőleg sérült erdőrészletek (NDVI = 0,2–0,7) jelentős területi átfedést mutatnak az OENyR adataiból származó kártérképekkel, ugyanakkor itt az erdőrészleten belüli kár mértéke és térbeli eloszlása is kimutatható. Azonban az NDVI csökkenés oka fakitermelés, illetve fafajok közti elérés is lehet, nem minden esetben erdőkár, illetve az erdőkár hatása a későbbi években is jelentkezhet, nem feltétlenül azonnal.

A valószínes kompoziton ugyancsak kimutatható 2019-ben (4a. ábra), hogy több a szürkés-barnás erdőrészlet a korábbi zöldhöz képest 2018-ban. Ugyanakkor ennek az okai termőhelyi és erdőgazdálkodási sajátosságok is lehetnek, egyelőre ez nem meghatározható teljes biztonsággal. 2020-ban még egyértelműbben látszik a vegetációmentes, barnás-szürkés talajfelszín Bejcgyertyánoson, melyek valószínűleg fakitermelés eredményei. Ez ugyanakkor lehet a korábbi erdőkár következménye is.

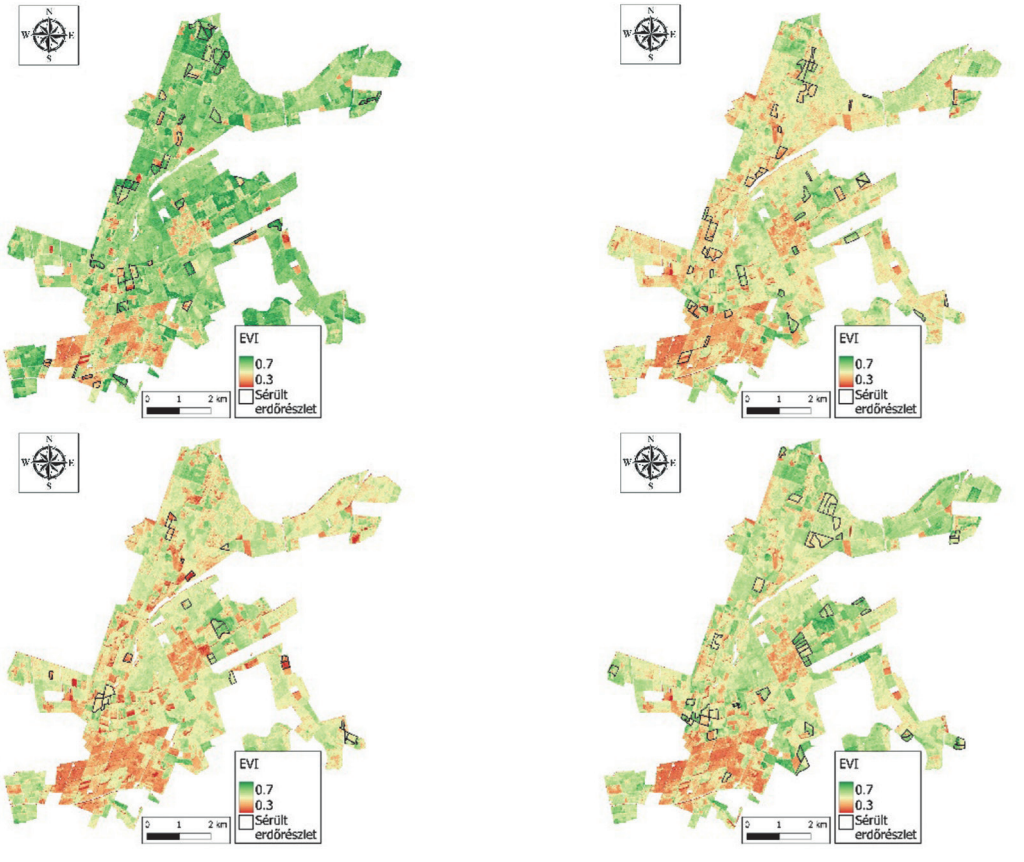
Ha az elmúlt évek közötti NDVI eltérést vizsgáljuk, akkor látható a különbségtérképen, hogy a 2017-ben bekövetkezett jégkár, a 2018 nyarán bekövetkezett aszálykár (narancssárgával jelölve) számos erdőrészletet érintett Bejcgyertyános közigazgatási határán belül, ami még 2019-ben és 2020-ban is kimutatható 2020-ban újabb öt helyen észlelhető jelentős negatív változás (pirossal mutatva), ugyanakkor a korábban észlelt sérülések regenerálódni látszanak (sötét zölddel jelölve).

Az aszálykár és részben a vadkár látható a nedvességtartalmat mutató NDWI térképeken (4b. ábra), utóbbi foltokban, nehezebben észlelhetően, hiszen a műhold a lombkorona állapotáról ad információt, tehát nem észleli a törzset ért károsodást, ami azonban idővel jelentkezhet a lombozaton is. A 2017-es kezdőállapothoz

képest a következő két évben általános szárazodás figyelhető meg éves szinten, amit 2020-ban egy nedvesebb periódus követett. Szembetűnő a Farkas-erdő déli részén lévő erdei fenyő állományok jelentősen magasabb nedvességtartalma a középső részen általános kocsányos tölgy és a gyertyán állományokhoz képest. A monitoring rendszer tehát alkalmas a különböző fafajok állapotváltozásának követésére is.

Az NDVI különbségtérképen is megfigyelhető a fafajok elkülönülése, az erdeifenyő állományok kisebb változatosságot mutatnak állapotukat tekintve (homogén sárga terület), míg a középső részen a gyertyán és a tölgy nagyobbat (narancssárga foltok csoportosan és elszórva is). Ha egy adott fafajra részletesebb elemzést szeretnénk készíteni, lehetséges az adatok szétválogatása és elemzések futtatása a kívánt célfajra, amivel pontosabban skálázott térképeket kaphatunk.

A Továbbfejlesztett Vegetációs Index (EVI) térképek is érzékenyebbek a fafaj különbségekre, mind a négy éves medián kompizittérképen jól látható a Farkas-erdő északi és középső, túlnyomóan lombos és a déli, főként tűlevelű erdővel borított részének különbsége. Továbbá Káld községhatáron belül (az erdő középső részén) megfigyelhető egy kocsánytalan tölgyes-cseres tömb elkülönülése is a környezetétől (5. ábra).

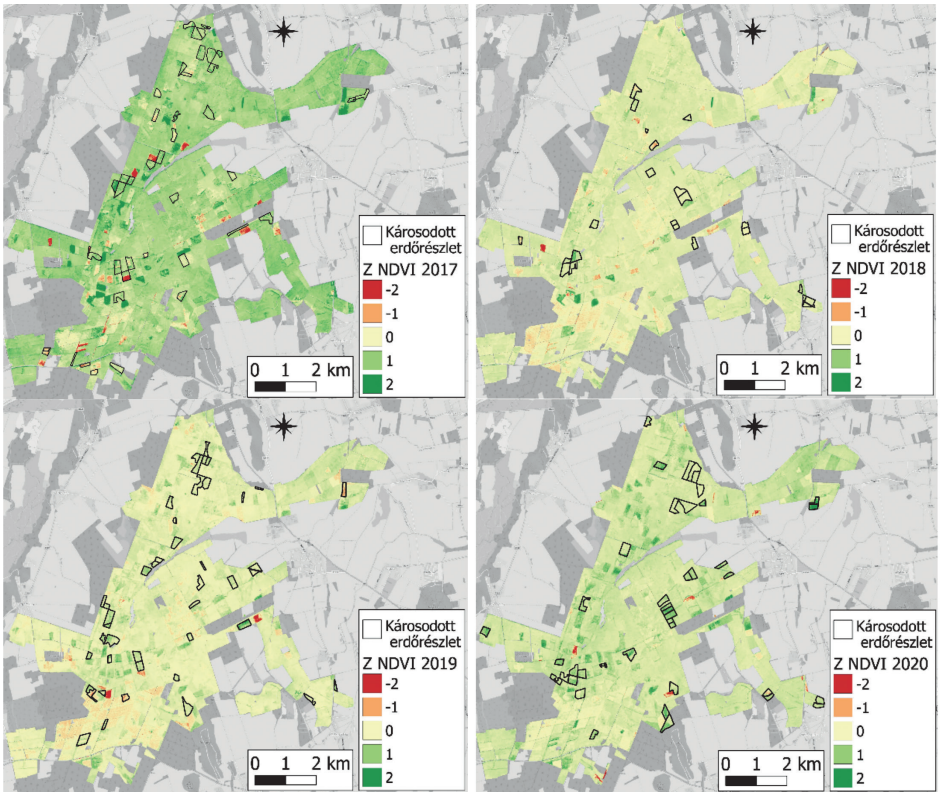


5. ábra: *A Sárvári Farkas-erdő éves medián EVI állapottérképe 2017-ben (a), 2018-ban (b), 2019-ben (c) és 2020-ban (d) a GEE monitoring rendszerben. Látható az erdő déli részén elterülő fenyvesek elkülönülése a lombhullató erdőktől*

Figure 5: *Annual median EVI maps of Farkas-erdő of Sárvár in 2017 (a), 2018 (b), 2019 (c) and 2020 (d) in the GEE monitoring system. Separation of coniferous stands from deciduous stands is visible on the southern part of the forest*

Az NDVI állapot és NDVI változás térképeken kívül előállítottuk a standardizált NDVI-t (Z NDVI), aminek kiszámításához felhasználtuk a GEE-ben elérhető összes műholdképet 2017 és 2020 között. A Z NDVI az adott év középértékét hasonlítja az elmúlt évek összesített középértékéhez és szórásához, így még jobban ki lehet mutatni a hosszú távon a 'normális' állapottól való eltérést, mint egy egyszerűbb különbségtérképen. Fontos megemlíteni, hogy a 2017 óta elérhető Sentinel-2 L2A felvételek száma korlátozó tényező, trendszámítás szempontjából nem hasonlítható megbízhatóságában a 21 éves MODIS idősorhoz. Ez tehát egyelőre a rendszer bizonytalanságának is tekinthető, ami az évek során javulni fog, ahogy folyamatosan nő a felhasználható, újabb űrfelvételek száma.

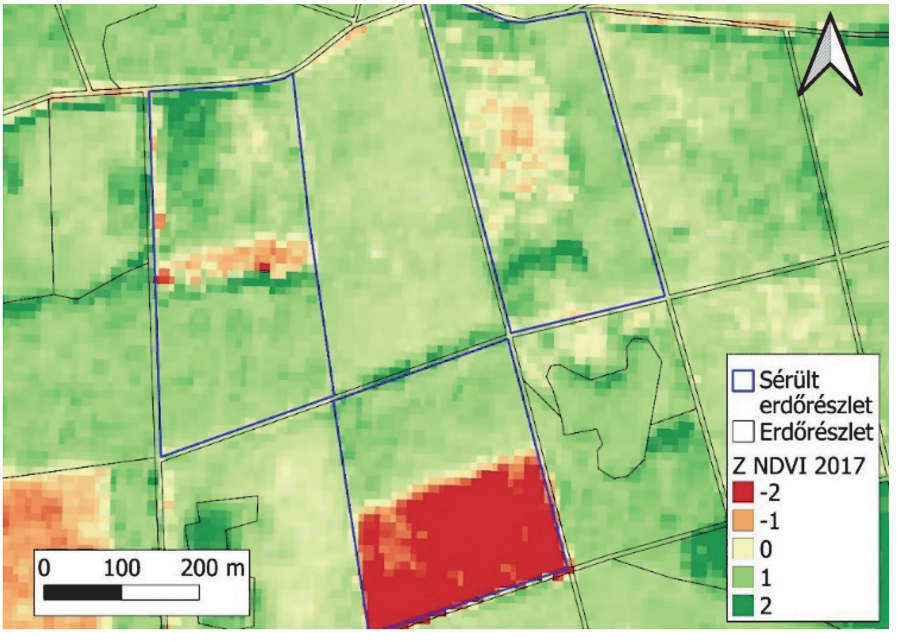
Az elmúlt négy évről készült Z NDVI térképeken (6. ábra) pirossal (Z NDVI < –2,5) jelennek meg a negatív irányban változott erdőrészletek (fakitermelés vagy erdőkár), sárgával a kis változást mutató területek (–0,5 <Z NDVI <0,5) és sötétzölddel, a jelentősebb, de pozitív irányú változások (Z NDVI > 2,5), melyek regenerálódásra utalnak. A 2017-es alapállapothoz képest 2018-ban és 2019-ben állapotromlást lehet kimutatni ezzel az index-el is sárga alapszínnel, majd 2020-ban javulást zölddel. A jelentős károsodások vagy fakitermelések pirossal jelennek meg mindegyik térképen, jól elkülöníthető módon. A terepi felméréssel készült káradatok kék kerettel jelennek meg és 2017-ben a Farkas-erdő középső és déli részén (Bejcgyertános, Csipkerek) átfedést mutatnak egymással, míg 2018-ban és 2019-ben kevesebb sérülés mutatható ki a műholdképeken, sőt 2020-ban regeneráció figyelhető meg az erdő ugyanezen részein, az említett községhatárokon belül.



6. ábra: *A Sárvári Farkas-erdő éves Z NDVI értékeken alapuló erdőállapottérképe 2017-ben (a), 2018-ban (b), 2019-ben (c) és 2020-ban (d) a terepi kárbejelentőkkel összevetve*

Figure 6: *Forest health state maps of Farkas-erdő of Sárvár based on annual Z NDVI values in 2017 (a), 2018 (b), 2019 (c) and 2020 (d) compared to field surveys*

A VI térképek nagy felbontása láthatóvá teszi az alrészlet szintű változásokat is (7. ábra). A 2019-es évben terepi felmérés alapján bejelentett erdőkárok területi lefedettsége csak részben egyezik meg az űrfelvételeken detektált, többnyire negatív irányú változásokat mutató képpontokkal, de a súlyos sérülést elszenvedett részleteket mindkét módszer kimutatta. A Bejcgyertyános 68A és 71A erdőrészletet jó példák erre. Ugyanakkor a tarvágások is megjelennek a térképeken a Bejcgyertyános 64A, 66C, 67C, 69B részletekben, amik nem erdőkárok, bár alacsony NDVI értékeket mutatnak a megváltozott erdőborítás miatt. A gyenge és/vagy elszórtan jelentkező károsodásokat pl. a Bejcgyertyános 64B esetében nem mutatta ki a távérzékelési módszer, így erre a célra csak korlátozottan alkalmazható. Fontos megjegyezni még, hogy a két módszer adatgyűjtési ideje nem egyezik meg teljesen, tehát előfordulnak állapotváltozások (főleg tarvágások), amik a műholdkép készítés idején még nem voltak jelen vagy látható a képeken olyan sérülés, amit még a terepen nem rögzítettek abban az évben.

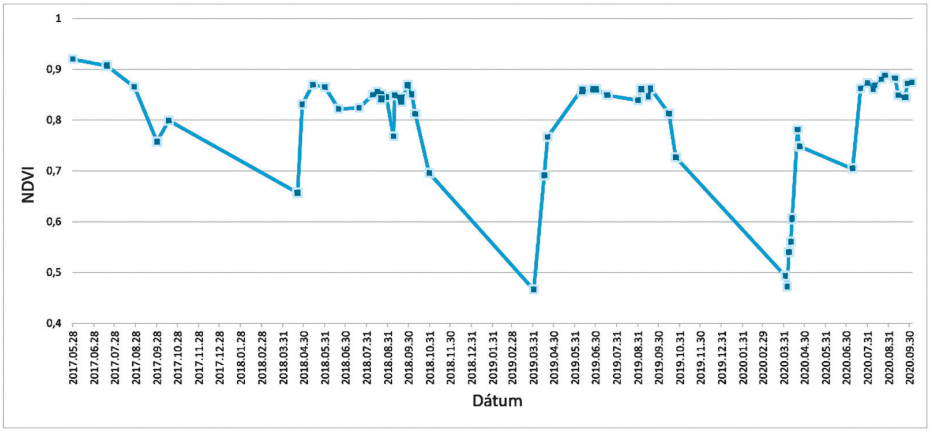


7. ábra: *A Sárvári Farkas-erdő egészségi állapotváltozása Z NDVI értékekkel 2017-ben az erdővédelmi kárbejelentő lapokon bejelentett sérülésekkel összevetve*
Figure 7: *Forest health change of Farkas-erdő of Sárvár derived from NDVI (a) between 2018 and 2019 and based on field survey aggregation from 2019 (b)*

Az antropogén beavatkozások (fakitermelés, gyérítés, fafajcsere) az erdőkárokhoz hasonlóan negatív irányba mozdítják el a VI értékeket, melyek térbeli lehatárolásában az erdőgazdálkodó által szolgáltatott fakitermelési adatok tudnak segítséget nyújtani. Az erdőgazdálkodás során a változások követik az erdőrészlet határokat, míg az erdőkárok esetén nem, így részben meg lehet különböztetni a kétfajta változást (7. ábra).

A térképi megjelenítés mellett grafikonon is ábrázoltuk az adatokat. Ezek kiértékelése történhet heti, havi és éves kompozitokkal is, a részletes idősoros adatelemzés alapjaként. Az adatok grafikonon való megjelenítésére és letöltésére példa egy tipikus NDVI görbe (8. ábra), mely a teljes Farkas-erdő medián értékeit ábrázolja. Láthatjuk a vegetációs időszak elejének megfelelő gyors felfutást minden év áprilisában a lombfakadáskor, a tetőzést júliusban (teljes lombozat és növekedés) és lassú csökkenést szeptemberig. Ősszel a fotoszintetikus aktivitás jelentősebben elkezd csökkenni, majd késő ősszel és télen eléri a minimumot, a vegetáció nyugalmi állapotában.

Ha károsodás következik be az erdőben, a görbe lefutása eltér a normálistól, az eltérés mértéből tudunk következtetni a károsodás súlyosságára. A 2018-as látszik egy tizedes visszaesés az NDVI görbén, ami a fotoszintetikus aktivitás csökkenésével van összefüggésben az adott időszakban, ami bolygatottságra utal, ami akár az aszály hatása is lehet. A 2019-es év lefutási görbéje közelít az ideálishoz, bár ez a felhasznált műholdképek mennyiségétől is függ, aminek fejlesztésén még dolgozni kell, hiszen adathiány is látható a görbén.



8. ábra: *A Sárvári Farkas-erdő egészségi állapota NDVI medián grafikonon ábrázolva 2017 és 2020 között.*
Figure 8: *NDVI median graph of Farkas-erdő of Sárvár between 2017 and 2020 in the GEE monitoring system.*

Elviekben minél több képet használunk fel, annál több időpontról lesz adatunk és finomodik az elérések detektálása is, ami kevés képnél problémás lehet, mert pl. 2019 szeptemberében hiány látható a grafikonon, vagy 2020 júliusára sincs egyetlen elérhető közel felhőmentes felvétel sem, így törés látható a görbén. Illetve a 2018 júliusi csökkenés is lehet az 5% alatti felhőborítás hatása. Ezt a felhőmaszk továbbfejlesztésével lehetne korrigálni, hiszen a felhasznált űrfelvételek számát nem lehet akármeddig növelni, tehát a meglévő felvétlek felhős pixeit kell jobban kiszűrni. Továbbá a VI görbék fafaj specifikus szűréssel tehetők még pontosabbá és több információt hordozóvá. Mindezek publikus térképi megjelenítése a Google App Engine segítségével lehetséges.

ÖSSZEFOGLALÁS

A GEE felhőszolgáltatásán alapuló rendszer sikeresen alkalmazható a Sárvári Farkas-erdőre. A vizsgálati időszakra, 2017 és 2020 között, a nagyfelbontású ESA Sentinel-2 űrfelvételek feldolgozása, elemzése és megjelenítése éves index és valósszínes kompozitok formájában történt meg, melyekkel lehetővé vált az erdő egészségi állapotváltozásának folyamatos és térbelileg pontos nyomonkövetése mind térképi, mind grafikonos formában. A vegetációs és nedvességi indexekből készült térképekkel és grafikonokkal a szárazodás és a fagykár hatásait is ki lehetett mutatni, a közepes felbontású MODIS felvételekhez képest pontosabban, így a rendszer fejlesztése sikerült.

Ugyanakkor a rendszer továbbfejlesztése szükséges. A helyi erdőgazdaság közreműködésével korábbi terepi erdőkár, illetve fakitermelési adatok rendszerbe integrálása lenne célszerű, továbbá a felhőmaszk fejlesztése és a fafajspecifikus index létrehozása is indokolt és hasznos volna. Ehhez a TEMRE adatsorai is felhasználhatóak, hiszen ott minden főfajra 20 éves távérzékelési adatsor áll rendelkezésre, ami akár a GEE alapú monitoring számítási képleteibe is beépíthető.

Ezt a monitoring rendszert az elmúlt négy év erdőkárainak kimutatásával teszteltük, azonban alkalmas lehet a jövőbeli károk kimutatására is, továbbá az adatgyűjtést és feldolgozást automatizálni is lehet, amivel folyamatosan elő lehet állítani az erdőállapot térképeket, nemcsak éves, de akár havi, sőt heti rendszerességgel is.

KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Jelen publikáció az EFOP-3.4.3-16-2016-00022 „QUALITAS Minőségi felsőoktatás fejlesztés Sopronban, Szombathelyen és Tatán" című projekt támogatásával valósult meg.

A szerzők köszönetet mondanak Hirka Anikónak (SOE ERTI) és az NFK Erdészeti Főosztályának az OENyR adatokért, valamint a Szombathelyi Erdészeti Zrt-nek az erdőrészlet határokért. Külön köszönet Somogyi Zoltánnak (SOE ERTI) a lektorálásáért és a kézirattal kapcsolatos hasznos tanácsokért.

FELHASZNÁLT IRODALOM

Amerikai Nemzeti Repülési és Űrhajózási Hivatal (NASA) 2022: MODIS Specifications. Online: https://modis.gsfc.nasa.gov/about/specifications.php

Európai Űrügynökség (ESA) 2022a: Sentinel-2 MSI, Radiometric Resolutions. Online: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi/resolutions/radiometric

Európai Űrügynökség (ESA) 2022b: Sentinel-3 OLCI, Radiometric Resolution – 21 bands in VIS/SWIR. Online: https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-3-olci/resolutions/radiometric

Gao B.-C. 1996: NDWI – A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space. Remote Sensing of Environment, 58: 257–266.

Gorelick N., Hancher M., Dixon M., Ilyushchenko S., Thau D. & Moore R. 2017: Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. Remote Sensing of Environment.

Hamunyela E., Rosca S., Mirt A., Engle E., Herold M., Gieseke F. & Verbesselt J. 2020: Implementation of BFASTmonitor Algorithm on Google Earth Engine to Support Large-Area and Sub-Annual Change Monitoring Using Earth Observation Data. *Remote Sens.,12*: 2953.

Huete A. R., K. Didan Y. E., Shimabukuro P., Ratana S. R., Saleska L. R., Hutyra W., Yang R. R., Nemani & R. Myneni 2006: Amazon rainforests green-up with sunlight in dry season, Geophys. Res. Lett., 33, L06405, https://doi.org/10.1029/2005GL025583.

Nemzeti Földügyi Központ Erdészeti Főosztálya (NFK EF) 2020: Országos Erdőkár Nyilvántartási Rendszer. Online: https://erdoterkep.nebih.gov.hu/erdokar/index.htm

Osei J.C., Andam-Akorful S. & Osei Jnr E. 2019: Long Term Monitoring of Ghana's Forest Reserves Using Google Earth Engine. https://doi.org/10.20944/preprints201909.0016.v1.

Somogyi Z., Koltay A., Molnár T. & Móricz N. 2018a: Forest health monitoring system in Hungary based on MODIS products. In: Molnár V. É. (ed): Az elmélet és a gyakorlat találkozása a térinformatikában IX.: theory meets practice in GIS, Debreceni Egyetem, IX. Térinformatika Konferencia és Szakkiállítás. Debrecen, ISBN 978-963-318-723-4, 325-330.

Somogyi Z., Koltay A., Molnár T. & Móricz N. 2018b: Távérzékelésen alapuló Erdőállapot Monitoring Rendszer (TEMRE). Erdészeti Lapok, 153: 9:277–279.

Chen S., Woodcock C., Bullock E., Arevalo P., Torchinava P., Peng S. & Olofsson P. 2021: Monitoring temperate forest degradation on Google Earth Engine using Landsat time series analysis. Remote Sensing of Environment, 265. 112648. https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112648.

Érkezett: 2021. október 19.
Közlésre elfogadva: 2021. december 22.