

MAGYARORSZÁGI GYEPEK FENOLÓGIAI CIKLUSÁNAK VIZSGÁLATA MŰHOLDAS TÁVÉRZÉKELES SEGÍTSÉGÉVEL

Dávid Réka Ágnes ⁽¹⁾ , Barcza Zoltán ^(1, 2) , Kern Anikó ⁽³⁾ 

⁽¹⁾ ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,
Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

⁽²⁾ Czech University of Life Sciences Prague, Faculty of Forestry and Wood Sciences,
165 21 Prága, Kamýcká 129

⁽³⁾ ELTE Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A
e-mail: davidreka@caesar.elte.hu, zoltan.barcza@ttk.elte.hu, anikoc@nimbus.elte.hu

Bevezetés

A szárazföldi vegetáció fenológiai ciklusa szoros kölcsönhatásban áll az éghajlattal. Közepes és magas szélességeken kiemelt fontosságú a tavaszi kizöldülés időpontja, amit angol szakkifejezéssel gyakran “start of season”-ként (SOS) említene (Studer et al., 2007; Kern et al., 2020; Wood et al., 2021). Az SOS arra az időpontra utal, amikor megindul az intenzív levélnövekedés (lombhullatók esetén rügyfakadás, gyepek esetén ugrásszerű kizöldülés), és ezzel egyidejűleg a vegetáció fotoszintetikus aktivitása, valamint a növények növekedési folyamatai beindulnak. Az SOS időpontja nagyban befolyásolja a vegetáció szén-, víz- és energiaciklusának időbeli alakulását, illetve annak éves mérlegét (Richardson et al., 2013). Emiatt az SOS becslése az egyik legfontosabb paraméter a szárazföldi ökoszisztémák éghajlatváltozásra adott válasz- és visszacsatolási mechanizmusainak tanulmányozására (Wolkovich et al., 2012; Xu et al., 2022).

A felszíni és távérzékelési megfigyelések képezik az alapját a nagyskalájú fenológiai minták felismerésének (Schwartz, 1999). Szemben az egyedszintű (lokális) megfigyelésekkel az ún. Land Surface Phenology (LSP) a vegetáció szezonális regionális és globális léptékű vizsgálatával foglalkozik műholdas szenzorok által szerzett ismeretek alapján (Helman, 2018; Caparros-Santiago et al., 2021). A tapasztalatok azt mutatják, hogy a műholdas megfigyelésekből származó ún. vegetációs indexek (VI), amelyek tulajdonképpen a növényzet állapotára vonatkozó proxyk, szoros kapcsolatban állnak a növényzet fotoszintetikus aktivitásával, és alkalmasak arra, hogy nagy területre vonatkozóan fenofázisokat (azaz a növényzet egyedfejlődésének szakaszait) különböztessünk meg általuk (Zhang et al., 2003).

A gyepek kulcsfontosságú alkotóelemei a szárazföldi biomoknak, ám Európán belül a többi ökoszisztémához képest kevésbé kutatottak (Chang et al., 2017). A gyepekre vonatkozó fenológiai modellek fejlesztéséhez elegendő, megbízható minőségű objektív adatra van szükség (Xin et al., 2015). Jelen munkában ehhez kíséreltünk meg hozzájárulni Magyarország vonatkozásában.

A kizöldülés idejének megállapítására különböző módszerek ismertek a szakirodalomból (Piao et al., 2006; Shen et al., 2015; Eklundh & Jönsson, 2016; Moon et al., 2021). Ezek közül hármat adaptáltunk a magyarországi gyepek kapcsán. Több módszer felhasználása alkalmat adott arra, hogy a megfigyelésben rejlő bizonytalanságot is számszerűsíteni tudjuk. Továbbá az új NÖSZTÉP adatbázis alapján (Tanács et al., 2019) lehetőség nyílt arra, hogy elkülönítsük a „szikes és szikesedésre hajlamos gyept”, valamint a „zárt gyept kötött talajon vagy domb és hegyvidéken” kategóriákat, ezzel tovább árnyalva a vizsgálatokat.

Adatok

A növényfenológiára vonatkozó vizsgálatok hagyományos módszere szerint egy emberi megfigyelő rögzíti rendszeres időközönként a fenológiai állapot vizuálisan látható változásait. Ezek a megfigyelések azonban nem abszolút mérések, mivel bizonyos fokú szubjektív pontatlanságnak vannak kitéve (Menzel, 2002; Richardson et al., 2018). Az egyed-szintű, *in situ* megfigyelések hosszú időre állhatnak rendelkezésre, ám a térbeli lefedettségük értelemszerűen igen korlátozott. A műholdas távérzékeléssel történő növényi fejlettség meghatározása VI-ek segítségével olyan potenciált ígér a nagy térségű fenológiai megfigyelésekhez, amely másként nem lehetséges (Cleland et al., 2007). Ezeket az indexet azért alkották meg, hogy származtatni lehessen belőlük a vegetáció dinamikáját, miközben minimalizálják a külső tényezők hatását (Baret & Guyot, 1991).

Jelen tanulmányban a sok lehetséges VI közül az ún. Normalizált Vegetációs Indexet (NDVI) alkalmaztuk, amely a látható és a közeli infravörös tartományban történő eltérő sugárzás-visszaverődésen alapuló index (Zhang et al., 2003; Kern et al., 2016; Wood et al., 2021). Az NDVI értékek és a meteorológiai állapotjelzők a földrajzi elhelyezkedéstől és a növényzet típusától függően változnak, a közöttük lévő kapcsolat rendkívül összetett, és jelentősen változik a növények fenológiai ciklusán keresztül (Horion et al., 2012).

Az általunk felhasznált NDVI adatok a MODIS („MODerate resolution Imaging Spectroradiometer”) szenzorok produktumai, amelyek a Terra és Aqua műholdak fedélzetén végeznek méréseket. Az adatsor előfeldolgozása magában foglalta az adatok felhőszűrését és minőségi ellenőrzését. A felhasznált adatok a 2000–2020 időszakot fedik le, 8 napos időbeli és 500 m × 500 m térbeli felbontással.

A gyepek kategóriák leválogatására a “Nemzeti ökoszisztéma szolgáltatás-térképezés és -értékelés”, röviden NÖSZTÉP projekt eredményeit használtuk fel (Tanács et al., 2019). Ez az adatbázis gyeptípusok között is különbséget tesz. A NÖSZTÉP adatok aggregálva lettek, először 500 m × 500 m (HKM) rácsra. Ezen a felbontáson, ha egy pixel területének több, mint 90%-át fedte adott gyeptípus, valamint a szomszédjai minimum 60%-a gyepek, akkor gyepeknek tekintettünk rá és a terület a vizsgálat tárgya lett, ezek után az HKM rácsot tovább aggregáltuk 0,1° × 0,1°-ra, így „szikes és szikesedésre hajlamos gyepek”, továbbá „zárt gyepek kötött talajon vagy domb és hegyvidéken” kategóriákkal dolgoztunk. Ezzel az aggregálási módszerrel 0,1° × 0,1°-on 67 db „szikes és szikesedésre hajlamos gyepek” és 68 db „zárt gyepek kötött talajon vagy domb és hegyvidéken” pixelt kaptunk. Amikor a két kategóriát közösen vizsgáltuk, akkor 128 db pixelt vizsgáltunk, 7 db 0,1° × 0,1°-os pixel tartalmazta mindkét kategóriát, ilyenkor ezeknek az átlagával dolgoztunk, ahogy a többi pixelnél is.

Módszerek: SOS meghatározása különböző módszerek szerint

Az SOS műholdas adatok segítségével közvetlenül nem mérhető, különböző eljárásokat alkalmazva kell megbecsülni. Az eltérő módszerek eltérő eredményeket is adhatnak. Tekintve a tavaszi kizöldülés komplexitását, jelenleg nincs megegyezés abban, hogy melyik módszer a legalkalmasabb az SOS meghatározására (Helman, 2018).

Ebben a tanulmányban három eljárást mutatunk be az SOS időpontjának megállapítására. Ezeket rendre G50 (vagy G20) (White et al., 1997; Yu et al., 2010; Shen et al., 2014), CCR_{max} (Zhang et al., 2003; Shen et al., 2014; Xu et al., 2022) és β (Studer et al., 2007; Shen et al., 2014; Xu et al., 2022) módszerekként hivatkozunk.

Az NDVI adatok az eredeti (műhold-átthaladás által meghatározott) mérési dátumokon voltak elérhetőek, így első lépésben ezek interpolálva lettek, hogy napi adatokkal dolgozhassunk (Pan et al., 2017):

$$\frac{NDVI_{hiány} - NDVI_0}{DOY - DOY_0} = \frac{NDVI_1 - NDVI_0}{DOY_1 - DOY_0} \quad \#(1)$$

$$NDVI_{hiány} = NDVI_0 + (NDVI_1 - NDVI_0) * \frac{DOY - DOY_0}{DOY_1 - DOY_0} \quad \#(2)$$

ahol $NDVI_{hiány}$ a hiányzó napi NDVI adat, $NDVI_0$ és $NDVI_1$ a hiányzó adat előtti és utáni NDVI érték, DOY_0 és DOY_1 pedig az $NDVI_0$ és $NDVI_1$ -hez tartozó Julian naptár szerinti mérés dátuma. Az interpolálás után a részleges vagy teljes hótakaró által okozott irreálisan alacsony NDVI értékek kiküszöbölése céljából a 0,2 alatti értékeket 0,2-re cseréltük.

Mindhárom módszert logisztikus függvény illesztésével kezdtük:

$$NDVI(t) = \frac{c}{1 + e^{a+bt}} + d, \quad \#(3)$$

ahol t az idő DOY-ben kifejezve (angolul „day of year”, az év adott napja, pl.: január 1. = DOY 1), $NDVI(t)$ az NDVI érték t időpontban, a és b a Levenberg-Marquardt algoritmus (Moré, 1977) segítségével illesztett paraméterek, $c + d$ a maximum NDVI érték és d a kezdeti NDVI háttérérték (Zhang et al., 2003; Shen et al., 2014). Az illesztést az év elejétől a maximum NDVI értékig javasolja elvégezni a szakirodalom (Xu et al., 2022). Mi a maximumot DOY 200-ig kerestük, mivel a gyepeknél előfordul bizonyos években, hogy az NDVI maximuma ősze, a másodlagos tenyészidőszakra esik. Van, hogy januártól még csökken az NDVI (ilyenkor a logisztikus függvény konstans lehet), így "dinamikus" kezdő időponttal dolgoztunk, ami azt jelenti, hogy első lépésben DOY 1-től illesztjük a függvényt, ám, ha konstans eredményt kapunk, akkor egy nappal később kezdjük és így tovább, amíg konstans eredménytől különbözőt nem kapunk. Tehát az, hogy melyik naptól (DOY-ben) kezdjük az illesztést, az valójában hely- és időfüggő. Ezt a logisztikus függvényt vettük alapul a módszerek alkalmazásánál.

A β -módszer az NDVI növekedési ütemére fókuszál a vegetációs időszakban, amely az illesztett logisztikus függvény első deriváltja (β jelöli). Az SOS az az időpont, amikor a β eléri a(z első lokális) maximumát.

A G50 esetében egy úgynevezett $NDVI_{arány}$ -t definiálunk minden egyes napra, amely azt mutatja meg, hogy egy terület (a növényzet típusától függetlenül) maximális fejlettségének hány százalékánál tart:

$$NDVI_{arány} = \frac{NDVI(t) - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}}, \quad \#(4)$$

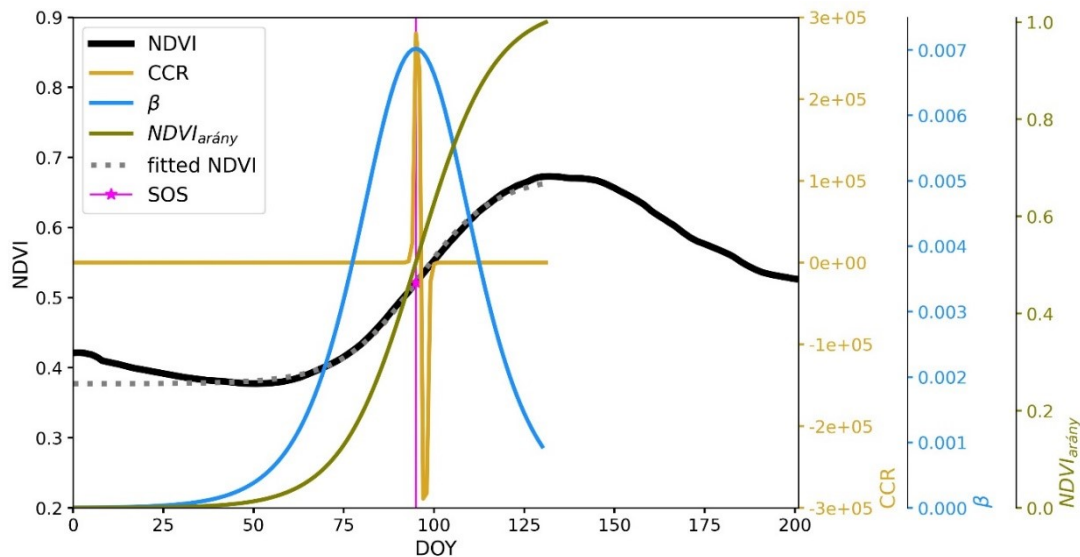
ahol $NDVI_{max}$ és $NDVI_{min}$ az illesztett függvény maximuma, illetve minimuma. A módszer akkorra teszi az SOS-t, amikor az $NDVI_{arány}$ eléri a 0,5-öt (White et al., 1997) vagy 0,2-t (Shen et al., 2014; Xu et al., 2022), amely azt jelzi, hogy elérte a maximális fejlettségének 50% (20%-)át. Jelen munka 0,5-es küszöböt használ.

A harmadik módszer, a CCR_{max} (angol rövidítés: „curvature change rate”) kiszámítja az illesztett logisztikus függvény görbületváltozási sebességét. A CCR első lokális maximumának helye jelöli az SOS-t (Zhang et al., 2003):

$$CCR = b^3 \left\{ \frac{3z(1-z)(1+z)^3[2(1+z)^3 + b^2c^2z]}{[(1-z)^4 + (bcz)^2]^{2.5}} - \frac{(1+z)^2(1+2z-5z^2)}{[(1+z)^4 + (bcz)^2]^{1.5}} \right\}, \#(5)$$

ahol $z = e^{a+bt}$, a , b és c jelentése pedig ugyanaz, mint a (3)-as egyenletben.

A három módszer gyakorlati alkalmazását az 1. ábra demonstrálja. A fekete görbe a magyarországi gyepek átlagos NDVI görbéje. A szürke szaggatott vonal az illesztett NDVI görbét mutatja a (3)-as egyenlet szerint, a kék görbe a β -módszer, a sárga a CCR_{max} -módszer (5), a zöld pedig a G50-módszer (4) megértését segíti. Rózsaszín csillag jelöli a származtatott SOS idejét. Jelen esetben (átlagos NDVI görbe a gyepekre) mindhárom módszer szerint ugyanazt a napot kapjuk (DOY 95, április 5.). Ez természetesen nem minden görbére van így.



1. ábra: Az SOS meghatározásának demonstrálása egy tipikus gyepes NDVI görbére.

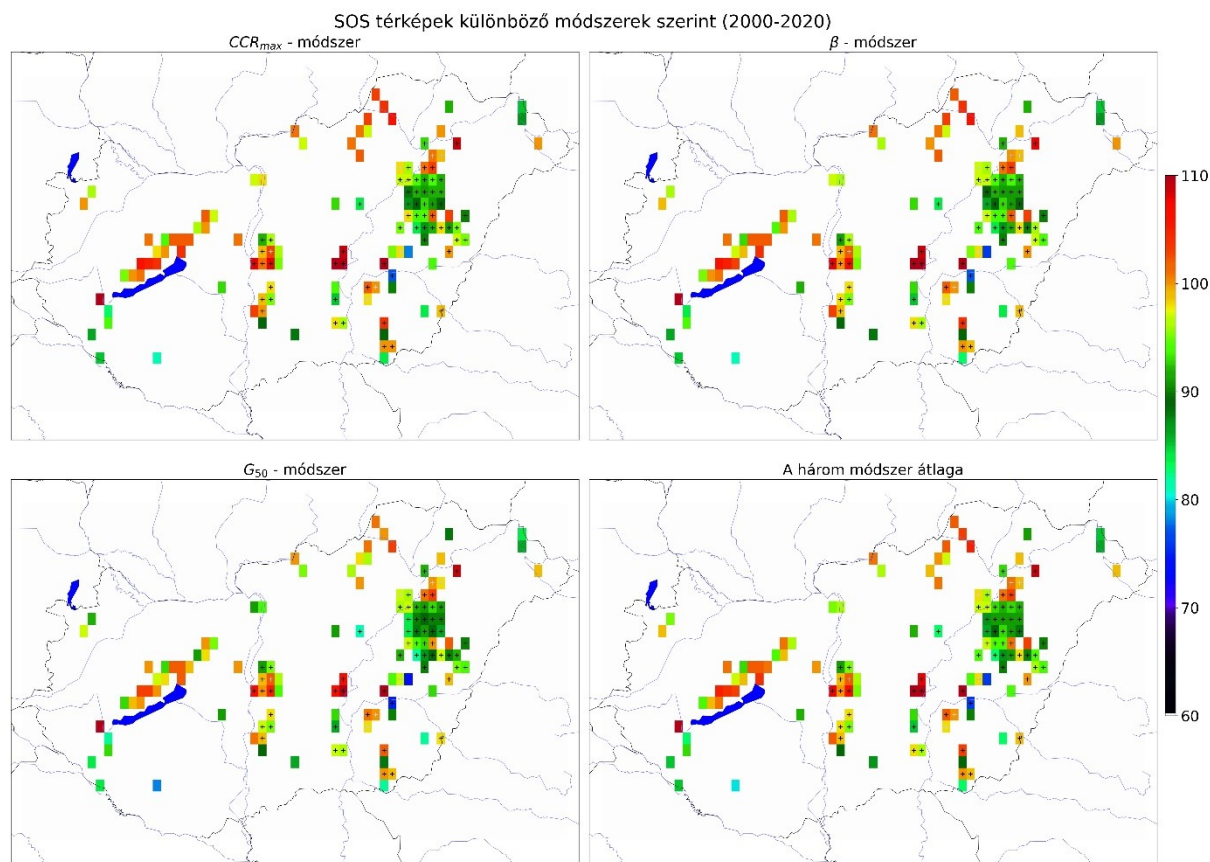
Az NDVI görbét fekete szín jelzi, szürke szaggatott vonal az illesztett NDVI görbe ((3)-as egyenlet), kék vonal a β -módszer ((3)-as egyenlet deriváltja), sárga vonal a CCR_{max} -módszer ((5)-ös egyenlet), zöld vonal pedig a G50-módszer ((4)-es egyenlet) megértését segíti. Rózsaszín függőleges vonal csillaggal jelöli az SOS idejét.

Eredmények bemutatása

A 2. ábra mutatja be a 2000–2020 közötti időszakra a három eljárással meghatározott SOS időpontját sokéves klimatológia formájában. Emellett a három módszer átlaga is bemutatásra kerül a jobb alsó térképen, továbbá a kétféle gyeptípus területi elhelyezkedése. Fekete kereszttel (+) jelöltük a „szikes és szikesedésre hajlamos” pixeleket, szürke kereszt mutatja a közös területeket és a jelöletlen pixelek reprezentálják a „zárt gyepek kötött talajon vagy domb és hegyvidéken” kategóriát. Az ábrán látható, hogy míg a „zárt gyepek kötött talajon vagy domb és hegyvidéken” kategóriához tartozó területek az országban elszórtan helyezkednek el, addig a „szikes és szikesedésre hajlamos” pixelek főként a Dunától keletre.

A három eljárás szerinti SOS értékek nagyon hasonlóan alakultak. A várakozásnak megfelelően a tengerszint feletti magasság növekedésével (Északi- és Dunántúli-

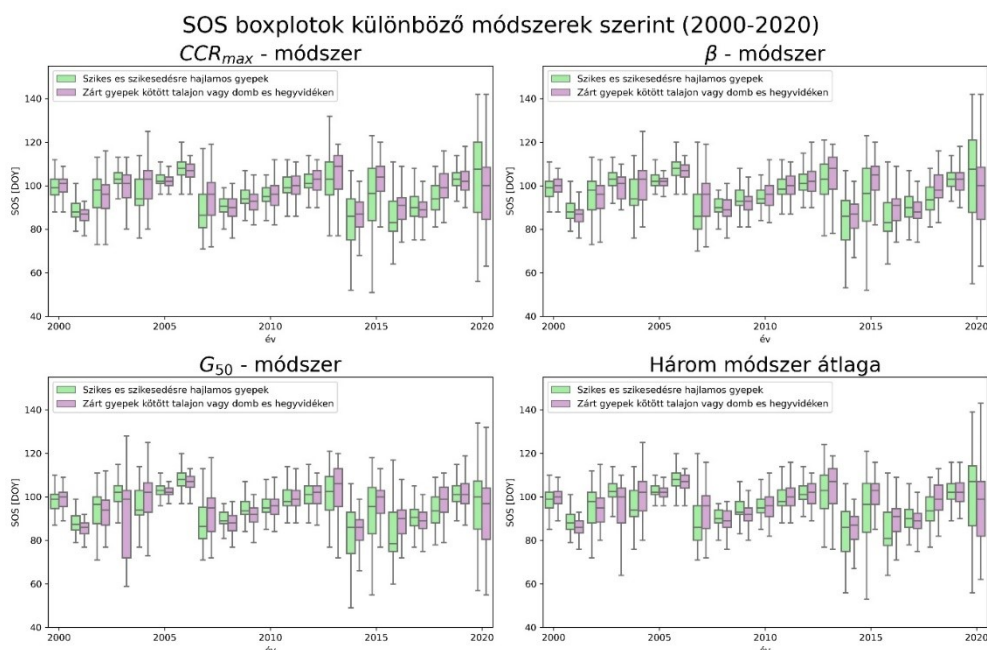
középhegység) későbbi SOS értékeket kapunk, a Tiszántúlra azonban a korábbi kizöldülés jellemző.



2. ábra: A hazai gyepek SOS klimatológiája CCR_{max} -, β - és G_{50} -módszer szerint, valamint ezen módszerekkel kapott SOS átlag. Az eredmények DOY-ban vannak kifejezve (az év hányadik napja).

Fekete keresztekkel jelöltük a „szikes és szikesedésre hajlamos” pixeleket, szürke kereszt mutatja a közös területeket és a jelöletlen pixelek reprezentálják a „zárt gyepek kötött talajon vagy domb és hegyvidéken” kategóriát.

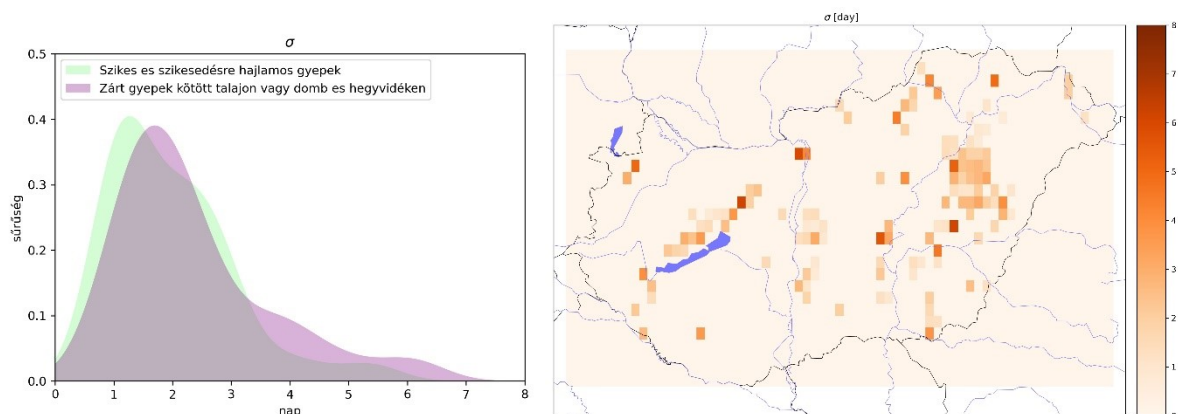
A 3. ábra betekintést ad az évek közötti változékonyságba. A módszerek között (a 2. ábrához hasonlóan) itt sem fedezhető fel számottevő különbség. Érdekes jelenség a néhány évente ismétlődő periodicitás, valamint feltűnő, hogy mindkét gyeptípusnak hasonló a menete. SOS-ük átlaga (DOY 96, április 6.) és 5. percentilisük (DOY 77, március 18.) egyenlő a felszín típusokra a 21 évre. A 95. percentilisben két nap eltérés van, a „szikes és szikesedésre hajlamos” kategória esetén ez DOY 114 (április 24.), a „zárt gyepek kötött talajon vagy domb és hegyvidéken” kategóriánál pedig DOY 112 (április 22.). A minimumok a század elejéhez, 2002-höz és 2004-hez köthetők, itt szintén két nap az eltérés: DOY 50 (február 19.) és DOY 48 (február 17.), ahol ismét a szikes kategóriához tartozik a későbbi érték, hasonlóan a maximumhoz, ami DOY 147 (2006. május 27.) és DOY 143 (2020. május 23.). A két gyeptípus időszora között 3,3 nap a négyzetes hiba, a korreláció pedig 0,86 ($p < 0,0001$).



3. ábra: Az SOS évek közötti változékonysága a kétféle gyeptípus alapján: „szikes és szikesedésre hajlamos gyepek” (zöld) és a „zárt gyepek kötött talajon vagy domb és hegyvidéken” (lila).

A box-whisker ábrán a színes téglalap az adatsorok kvartiliseit mutatja, a vízszintes vonal a téglalap közepén a medián, míg a dobozból kilógó vonalak („whiskerek”) a legnagyobb és a legkisebb értékre terjed ki az interkvartilis tartomány 1,5-szerese között.

A megfigyelés bizonytalanságát (σ ; 4. ábra) úgy definiáltuk, hogy pixelenként és évenként meghatároztuk a maximum és a minimum SOS értékek közötti különbséget, majd a kapott különbséget átlagoltuk az évekre, így megkaptuk a σ -át minden pixelre. A „szikes és szikesedésre hajlamos gyepek” kizöldülésének bizonytalansága többnyire 1–2 nap, a „zárt gyepek kötött talajon vagy domb és hegyvidéken” kategória bizonytalansága valamivel szélesebb skálán mozog, de számottevően nem tér el a szikesektől. Mindkét kategória bizonytalanságának mediánja (és átlaga is) 2 nap.



4. ábra: Az SOS megfigyelések bizonytalanságának (σ) eloszlása a két vizsgált NÖSZTÉP kategóriára.

Diszkusszió és konklúzió

A fenofázisok megfigyelése alapvető szerepet játszik a szárazföldi ökoszisztémák környezeti változásokra adott válaszában detektálásában, illetve – fenológiai modelleken keresztül – korszerű klímamodellek fejlesztésében (Caparros-Santiago et al., 2021). Mivel nagy területen a fenológiai változásokat közvetlenül megfigyelni nem lehetséges, ezért műholdas adatokhoz kell nyúlnunk, amelyekből különböző eljárásokkal származtatni tudjuk a tavaszi kizöldülés időpontját. Ám az így kapott megfigyelési adat is csupán proxyként szolgál, bizonytalansággal van terhelve.

Azért, hogy a megfigyelésben rejlő bizonytalanságot számszerűsíthessük, három széles körben alkalmazott eljárás szerint állapítottuk meg az SOS-t 2000–2020 között magyarországi „szikes és szikesedésre hajlamos gyepekre” és „zárt gyepekre kötött talajon vagy domb és hegyvidéken”. A módszereket a szakirodalomban általában további vizsgálatok nélkül a legkülönbözőbb vegetációtípusokra és földrajzi területekre alkalmazzák, annak ellenére, hogy ezek nagy mértékben eltérő eredményeket is adhatnak. A magyarországi gyepek esetében ezeket az eljárásokat tovább finomítottuk, így kiküszöbölve azt, hogy a különböző módszerek más időszakát fogják meg a tavaszi kizöldülésnek (korai fázis, vagy az időszak közepe). A mérési bizonytalanságot hely függvényében kaptuk meg, ami többnyire 1–3 nap között alakult, ami jól demonstrálja az adatsor megbízhatóságát és az SOS nagy bizonyossággal történő meghatározhatóságát. SOS megfigyelési adatok vizsgálata esetén az általunk használt ensemble módszer alkalmazása javasoljuk.

Hivatkozások

- Baret, F., Guyot, G., 1991: Potentials and limits of vegetation indices for LAI and APAR assessment. *Remote Sensing of Environment*, 35: 161–173. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(91\)90009-U](https://doi.org/10.1016/0034-4257(91)90009-U)
- Caparros-Santiago, J.A., Rodriguez-Galiano, V., Dash, J., 2021: Land surface phenology as indicator of global terrestrial ecosystem dynamics: A systematic review. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 171: 330–347. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2020.11.019>
- Chang, J., Ciais, P., Viovy, N., Soussana, J.F., Klumpp, K., Sultan, B., 2017: Future productivity and phenology changes in European grasslands for different warming levels: Implications for grassland management and carbon balance. *Carbon Balance and Management*, 12: 11. <https://doi.org/10.1186/s13021-017-0079-8>
- Cleland, E.E., Chuine, I., Menzel, A., Mooney, H.A., Schwartz, M.D., 2007: Shifting plant phenology in response to global change. *Trends in Ecology and Evolution*, 22: 357–365. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2007.04.003>
- Eklundh, L., Jönsson, P., 2016: Timesat for processing time-series data from satellite sensors for land surface monitoring. *Remote Sensing and Digital Image Processing*, 20: 177–194. https://doi.org/10.1007/978-3-319-47037-5_9
- Helman, D., 2018: Land surface phenology: What do we really ‘see’ from space? *Science of the Total Environment*, 618: 665–673. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.07.237>
- Horion, S., Cornet, Y., Erpicum, M., Tychon, B., 2012: Studying interactions between climate variability and vegetation dynamic using a phenology based approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 20: 20–32. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2011.12.010>
- Kern, A., Marjanović, H., Barcza, Z., 2016: Evaluation of the quality of NDVI3g dataset against collection 6 MODIS NDVI in Central Europe between 2000 and 2013. *Remote Sensing*, 8: 1–15. <https://doi.org/10.3390/rs8110955>

- Kern, A., Marjanović, H., Barcza, Z., 2020: Spring vegetation green-up dynamics in Central Europe based on 20-year long MODIS NDVI data. *Agricultural and Forest Meteorology*, 287: 107969. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2020.107969>
- Menzel, A., 2002: Phenology: Its importance to the global change community: An editorial comment. *Climatic Change*, 54: 379–385. <https://doi.org/10.1023/A:1016125215496>
- Moon, M., Seyednasrollah, B., Richardson, A.D., Friedl, M.A., 2021: Using time series of MODIS land surface phenology to model temperature and photoperiod controls on spring greenup in North American deciduous forests. *Remote Sensing of Environment*, 260: 112466. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112466>
- Moré J. J., 1977: The Levenberg-Marquardt Algorithm: Implementation and Theory. In: Numerical Analysis, matematika előadás jegyzet 630 (szerk.: Watson G. A.), Springer Verlag, Dundee. 105–116. <https://doi.org/10.1007/BFb0067700>
- Pan, Z., Hu, Y., Cao, B., 2017: Construction of smooth daily remote sensing time series data: a higher spatiotemporal resolution perspective. *Open Geospatial Data, Software and Standards*, 2: 25. <https://doi.org/10.1186/s40965-017-0038-z>
- Piao, S., Fang, J., Zhou, L., Ciais, P., Zhu, B., 2006: Variations in satellite-derived phenology in China's temperate vegetation. *Global Change Biology*, 12: 672–685. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2006.01123.x>
- Richardson, A.D., Keenan, T.F., Migliavacca, M., Ryu, Y., Sonnentag, O., Toomey, M., 2013: Climate change, phenology, and phenological control of vegetation feedbacks to the climate system. *Agricultural and Forest Meteorology*, 169: 156–173. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2012.09.012>
- Richardson, A.D., Hufkens, K., Milliman, T., Aubrecht, D.M., Chen, M., Gray, J.M., Johnston, M.R., Keenan, T.F., Klosterman, S.T., Kosmala, M., Melaas, E.K., Friedl, M.A., Froelking, S., 2018: Tracking vegetation phenology across diverse North American biomes using PhenoCam imagery. *Scientific Data*, 5: 1–24. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.28>
- Schwartz, M.D., 1999: Advancing to full bloom: Planning phenological research for the 21st century. *International Journal of Biometeorology*, 42: 113–118. <https://doi.org/10.1007/s004840050093>
- Shen, M., Zhang, G., Cong, N., Wang, S., Kong, W., Piao, S., 2014: Increasing altitudinal gradient of spring vegetation phenology during the last decade on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 189–190: 71–80. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2014.01.003>
- Shen, M., Piao, S., Cong, N., Zhang, G., Jassens, I.A., 2015: Precipitation impacts on vegetation spring phenology on the Tibetan Plateau. *Global Change Biology*, 21: 3647–3656. <https://doi.org/10.1111/gcb.12961>
- Studer, S., Stöckli, R., Appenzeller, C., Vidale, P.L., 2007: A comparative study of satellite and ground-based phenology. *International Journal of Biometeorology*, 51: 405–414. <https://doi.org/10.1007/s00484-006-0080-5>
- Tanács, E., Belényesi, M., Lehoczki, R., Pataki, R., Petrik, O., Standovár, T., Pásztor, L., Laborczi, A., Szatmári, G., Molnár, Z., Bede-Fazekas, Á., Kisné Fodor, L., Varga, I., Zsembery, Z., Maucha, G., 2019: Országos, nagyfelbontású ökoszisztéma- alaptérkép: módszertan, validáció és felhasználási lehetőségek. *Természetvédelmi Közlemények*, 25: 34–58. <https://doi.org/10.20332/tvk-jnatconserv.2019.25.34>
- White, M.A., Thornton, P.E., Running, S.W., 1997: A continental phenology model for monitoring vegetation responses to interannual climatic variability. *Global Biogeochemical Cycles*, 11: 217–234. <https://doi.org/10.1029/97GB00330>
- Wolkovich, E.M., Cook, B.I., Allen, J.M., Crimmins, T.M., Betancourt, J.L., Travers, S.E., Pau, S., Regetz, J., Davies, T.J., Kraft, N.J.B., Ault, T.R., Bolmgren, K., Mazer, S.J., McCabe, G.J., McGill, B.J., Parmesan, C., Salamin, N., Schwartz, M.D., Cleland, E.E.,

- 2012: Warming experiments underpredict plant phenological responses to climate change. *Nature*, 485: 494–497. <https://doi.org/10.1038/nature11014>
- Wood, D.J.A., Powell, S., Stoy, P.C., Thurman, L.L., Beever, E.A., 2021: Is the grass always greener? Land surface phenology reveals differences in peak and season-long vegetation productivity responses to climate and management. *Ecology and Evolution*, 11: 11168–11199. <https://doi.org/10.1002/ece3.7904>
- Xin, Q., Broich, M., Zhu, P., Gong, P., 2015: Modeling grassland spring onset across the Western United States using climate variables and MODIS-derived phenology metrics. *Remote Sensing of Environment*, 161: 63–77. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.02.003>
- Xu, Jingyi, Tang, Y., Xu, Jiahui, Chen, J., Bai, K., Shu, S., Yu, B., Wu, J., Huang, Y., 2022: Evaluation of Vegetation Indexes and Green-Up Date Extraction Methods on the Tibetan Plateau. *Remote Sensing*, 14: 1–19. <https://doi.org/10.3390/rs14133160>
- Yu, H., Luedeling, E., Xu, J., 2010: Winter and spring warming result in delayed spring phenology on the Tibetan Plateau. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 107: 22151–22156. <https://doi.org/10.1073/pnas.1012490107>
- Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.C.F., Gao, F., Reed, B.C., Huete, A., 2003: Monitoring vegetation phenology using MODIS. *Remote Sensing of Environment*, 84: 471–475. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(02\)00135-9](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(02)00135-9)
-

ORCID

- Dávid R. Á.  <https://orcid.org/0000-0002-7898-9715>
- Barcza Z.  <https://orcid.org/0000-0002-1278-0636>
- Kern A.  <https://orcid.org/0000-0002-3504-1668>