

COPERNICUS HR-VPP NÖVÉNYFENOLÓGIAI PARAMÉTEREK STATISZTIKAI VIZSGÁLATA MAGYARORSZÁGI GYEPTERÜLETEKEN

Pacsó Vivien^(1, 2) , Barcza Zoltán⁽³⁾ , Petrik Ottó⁽⁴⁾

⁽¹⁾ ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,

Földtudományi Doktori Iskola, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

⁽²⁾ Lechner Tudásközpont, Térbeli Szolgáltatások Igazgatósága, Földmegfigyelési Operatív
Központ Főosztály, Űrtávérzékelési Osztály, 1111 Budapest, Budafoki út 59. E/3

⁽³⁾ ELTE Eötvös Loránd Tudományegyetem, Földrajz- és Földtudományi Intézet,

Meteorológiai Tanszék, 1117 Budapest, Pázmány Péter sétány 1/A

⁽⁴⁾ Lechner Tudásközpont, Térbeli Szolgáltatások Igazgatósága, Földmegfigyelési Operatív
Központ Főosztály, Földfelszín-monitorozási Osztály, 1111 Budapest, Budafoki út 59. E/3

e-mail: pacsco.vivien@gmail.com

Bevezetés

A fenológia a növényzet életműködésének periodikusan visszatérő eseményeit vizsgálja és dokumentálja. Ezen események közül legfontosabbak a tavaszi rügyfakadás, illetve intenzív növekedés, a virágzás, a termés kifejlődése és az őszi lombhullás, illetve levélszáradás. A fenológiai ciklus alapvetően befolyásolja az ökoszisztéma-szolgáltatásokat, a táplálékhalózatokat, valamint a víz és a szén globális körforgását. A fenológiai vizsgálatok az ökoszisztéma éghajlati tényezőkre, valamint az ember által okozott zavarokra adott válaszainak integrált mérését teszik lehetővé, és így lehetőséget kínálnak az ökoszisztémák állapotának és állapotromlásának nyomon követésére (Richardson et al., 2013).

A műholdas távérzékelés megjelenése lehetővé tette, hogy a pontszerű, többnyire vizuális megfigyelések mellett nagyobb területek fenológiai ciklusát is vizsgáljuk (Zhang et al., 2003; Piao et al., 2019; Kern et al., 2020; Dávid et al., 2022). Ezen vizsgálatok a növényekre jellemző spektrális információ alapján, ún. proxy (köztes) adatok alapján következtetnek a fenológiai jellemzőkre. Ilyen proxy pl. a közismert normalizált vegetációs index (NDVI), amelyik egy széles körben elterjedt indikátora az ökoszisztéma zöldességének, illetve fejlettségének. A műholdas távérzékelés segítségével a fenológiai vizsgálatok kibővültek, mivel a fent említett, hagyományos fenológiai események mellett a növényzet teljes életciklusát is monitorozhatjuk, műholdas proxy idősorok segítségével. Az idősorok alapján újabb mérőszámokat definiálhatunk, mint például a proxy idősor alatti terület (integrál), vagy a maximális proxy érték elérésének időpontja. Emellett az emberi beavatkozás is vizsgálható, ami bővíti a fenológiai események tárházát.

A gyepek fenológiáját viszonylag kevés tanulmány vizsgálja (Xin et al., 2015; Dávid et al., 2022). Magyarországon a gyepek igen érzékenyen reagálnak az időjárás változékonyságára, ami kihat a kapcsolódó ökoszisztéma szolgáltatásokra, amelyek közül talán a legfontosabb a produkció. Ennek ellenére a hazai gyepek produktivitásának vizsgálata nem jól kutatott terület. Mára már több adatbázis is rendelkezésre áll, ami alapján komplex, gyeppenológia vonatkozású vizsgálatokat végezhetünk Magyarország területére.

Az egyik legújabb növényfenológiai termékcsomagot – a “High-Resolution Vegetation Phenology and Productivity”, röviden HR-VPP termékeket – a Copernicus Land Monitoring Service (CLMS) állítja elő a Sentinel-2 műholdak multispektrális adataiból, 10 méteres térbeli felbontásban [1 – CLMS]. A Sentinel-2 felvételekből idősorokat konstruálnak, és a létrehozott fenológiai görbékből évente maximum két szezonra (vagyis két jól elhatárolható növekedési időszakra) vegetációs fenológiai paramétereket (VPP) is származtatnak, amelyek a

növényfejlődés egyes szakaszait jellemzik; mindezt természetesen minden 10×10 méteres pixelre.

Jelen kutatásban a 2017 és 2023 közti időszakra vizsgáltuk a VPP bizonyos rétegeit a magyarországi gyepekre vonatkozóan. Ezen rétegek többek között a növekedési időszakok kezdete, maximális értéke, illetve a fenológiai görbe alatti integrált területek. A hazai gyepterületeket ürfelvétel-idősorokon tanított térbeli osztályozással térképeztük fel (Pacskó et al., 2023). Célunk bemutatni a Copernicus HR-VPP adatbázis felépítését és felhasználásának lehetőségeit a hazai gyepek produkció-vizsgálata terén. Vizsgáltuk bizonyos VPP mennyiségek térbeli és évek közötti változékonyságát hazai gyepekre, valamint a mennyiségek közötti kapcsolatot. Tapasztalataink megalapozzák egy jövőbeli, a gyepek relatív produktivitás-különbségén alapuló térbeli szegmentálás megvalósítását, valamint a tér- és időbeli különbségek meteorológia változókkal való ok-okozati összefüggés-vizsgálatát.

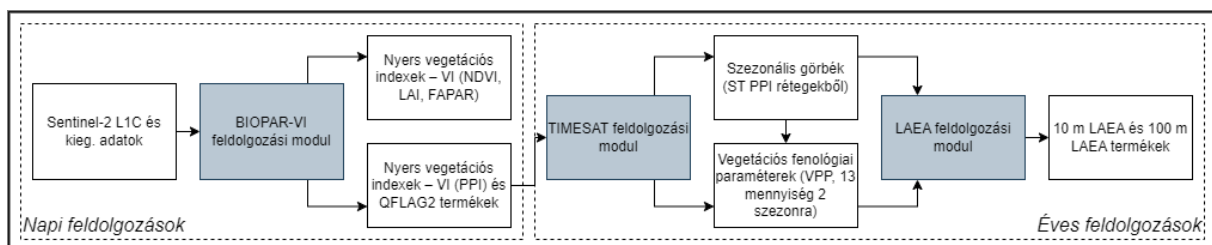
Adatok és módszerek

Copernicus HR-VPP adatbázis

Ahogy a bevezetőben már említettük, a HR-VPP termékeket a Sentinel-2 műholdak adataiból állítják elő, és 2017. január 1-től kezdve az egész EGT39 (32 EU tagállam, az Egyesült Királyság és 6 együttműködő nyugat-balkáni ország) területére elérhetőek [CLMS – 1]. Az adatbázis leírásánál érdemes szó szerint idézni az alkotók vízióját, mert nagyon jól összefoglalja a lényeget: „A Copernicus Land Monitoring szolgáltatás új HR-VPP terméke lehetővé teszi a növényzet zavarokra adott reakcióinak részletesebb és gyakoribb értékelését a korábban elérhetőnél nagyobb térbeli felbontással. A félautomata feldolgozási folyamatnak köszönhetően a termelés felgyorsul, ami lehetővé teszi számunkra, hogy az ökoszisztémákra gyakorolt éghajlati és antropogén hatásokról aktuális mutatókat származtassunk.” (Eva Ivits, az EEA HR-VPP termékcsomagért felelős műszaki tisztviselője, [2 – WEkEO]).

A HR-VPP termékcsomag 3 termékcsoporthot tartalmaz (1. ábra):

- (i) A nyers vegetációs indexek (VI), mint a levélfelületi index (LAI), az elnyelt fotoszintetikusan aktív sugárzás aránya (FAPAR), az NDVI és az úgynevezett növényi fenológiai index (Plant Phenology Index, azaz PPI). Ezen indexeket naponta, közel valós időben és csempénként szolgáltatják.
- (ii) A PPI indexből származtatott szezonális görbék (ST) rétegeit évente, a vegetációs időszak(ok) vége után publikálják 10 napos időbeli felbontással (2. ábra).
- (iii) A vegetációs fenológiai paraméterek (VPP) rétegeit a fenti ST görbékől származtatják évente két vegetációs időszakra (3. ábra).



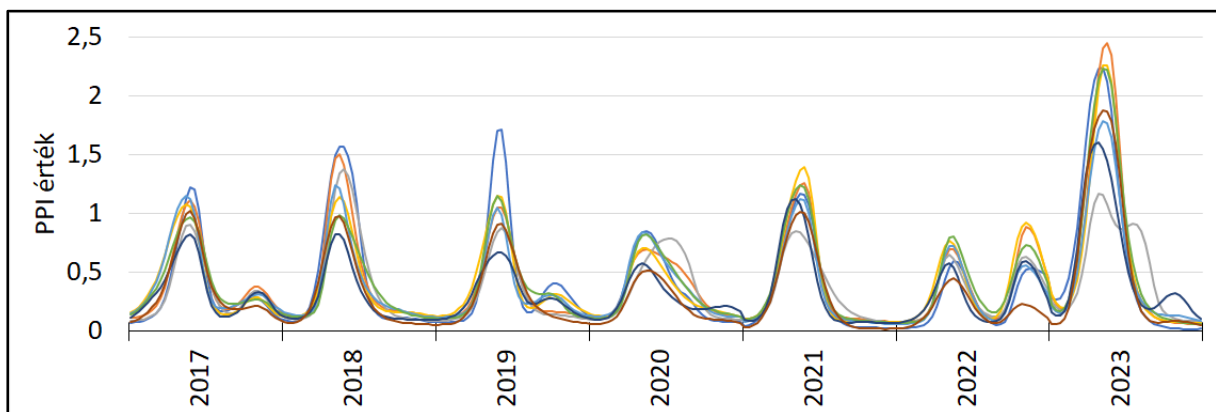
1. ábra: A HR-VPP termékek előállításának folyamatábrája (Smets et al., 2023a nyomán).

A fent leírtak szerint a növényzet fenológiai ciklusát távérzékeléssel hagyományosan vegetációs indexek idősorai segítségével követik nyomon, amelyek jellemzően a zöld biomasszával, így a fotoszintetikus aktivitással korrelálnak (Silleos et al., 2006). Az említett növény fenológiai index (PPI) egy fizikai alapú vegetációs index, amelyet a különbségi vegetációs indexből (Difference Vegetation Index, azaz DVI) vezettek le az alábbiak szerint:

$$PPI = -K \cdot \ln \frac{MDVI - DVI}{MDVI - DVI_{soil}}, \quad (1)$$

ahol K növényzet szerkezetétől függő erősítési tényező (részletesen lásd Jin & Eklundh, 2014), az $\ln$ a természetes alapú logaritmus, a DVI a tényleges megfigyelés különbségi vegetációs index értéke, azaz a közeli infravörös és a vörös reflektanciák különbsége, az $MDVI$ az egyes képpontok időbeli maximális DVI -értékét jelenti az adatperiódus során (amelyet ötévente újraszámolnak), a DVI_{soil} pedig a talajra vonatkozó érték, amelyet a rendelkezésre álló felhőmentes felvételek tér- és időbeli statisztikai alapján becsülnek (részletesen lásd Smets et al., 2023a).

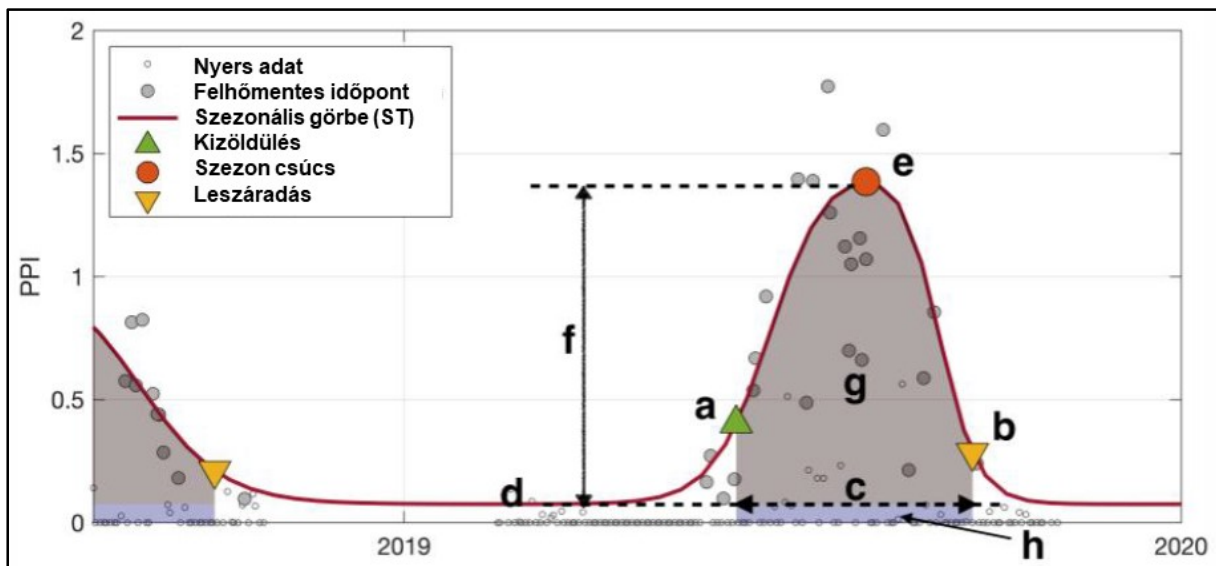
A HR-VPP dokumentációja kiemeli, hogy a PPI-t választották a produktum kapcsán az alapvető vegetációs indexnek, mert ez adja a legjobb eredményeket az ST-k és VPP-k levezetéséhez, különösen a vegetációs időszak kezdetének észleléséhez (Tian et al., 2021), és erős korrelációt mutat a fotoszintézis (GPP) értékeivel (Jin et al., 2017; 2019). A HR-VPP kalibrálása során a PPI-t átfogó földi megfigyelésekkel, többek között eddy kovariancia mérésekkel (EC-GPP, 49 helyszín), PhenoCam zöld szinkordináta-mérésekkel (Green Chromatic Coordinate, GCC, 39 helyszín) és terepi mintavételezésből származó fenológiai fázisokkal (Páneurópai Fenológiai Adatbázis, PEP725, 1321 helyszín) vetették össze. Tian et al. (2021) azt állapították meg, hogy a PPI erősebb kapcsolatban áll az EC-GPP által reprezentált ún. fotoszintetikus fenológiával, mint az NDVI és az ún. kétsatornás továbbfejlesztett vegetációs index (Two-band Enhanced Vegetation Index, EVI2). Eredményeik nem voltak meggyőzőek a GCC fenológia tekintetében, amelyre egyik index sem mutat következetesen jobb eredményt a többinél. A minőségértékeléssel kapcsolatos további részletek a kalibrációs (Eklundh et al., 2021) és a validálási jelentésben (Camacho et al., 2021) találhatóak. A módszer korlátai közül szeretnénk kiemelni, hogy a PPI kevésbé reagál a ritka növényzetre, mint az NDVI, ami az őszi vetésű gabonák vagy a takarónövények alulbecsléséhez vezethet a tavaszi fő növekedési időszak kezdete előtt. Ezekben a helyzetekben célszerű lehet a PPI-t NDVI-vel kiegészíteni. A PPI zajérzékenységének korlátozása érdekében a HR-VPP-ben az indexet 3,0-ra korlátozták. Alább néhány hazai gyepterületen szemléltetjük a PPI időbeli változását (2. ábra).



2. ábra: PPI idősoros görbék néhány hazai gyepterületére. Az ábrán a parcellák átlagos PPI értékeit jelenítettük meg évente 36 időpontban. Igen jól látható az évek közötti változékonyság.

Az ST-k előállításához az ún. TIMESAT 4 (Jönsson & Eklundh, 2004) [3 – TIMESAT] algoritmust alkalmazzák a PPI idősorokra (és a vonatkozó Quality Flag 2 idősorokra; további részletekért lásd Smets et al., 2023a; 2023b), mivel megbízható teljesítményt nyújt az adatokban jelen lévő zaj és adathiányok kezelésére. Elsőként a téli adathiányok kitöltése

történik annak biztosítása érdekében, hogy a téli időszakban keletkezett adathiányokat szezonon kívüli időszakként kezeljék. A következő lépésben a növekedési időszakok hozzávetőleges helyét egy simító spline (Woltring, 1986) és szűrés segítségével határozzák meg. Ezt követi a Jönsson et al. (2018) által leírt módszer alkalmazása, mely szerint dupla logisztikus függvényt (Fischer, 1994) illesztnek minden, az előző lépésben azonosított lehetséges szezonra. Majd a TIMESAT minden egyes potenciális növekedési időszak esetében meghatározza, hogy nagyságrendje alapján tekinthető-e külön szezonnak, valamint, hogy két közeli szezont össze kell-e vonni. Ha egy évben kettőnél több szezont találnak, a TIMESAT a két legnagyobbat tárolja, időrendi sorrendben. Az algoritmus 4.1.8 verziójától kezdve (V105-ös termékek) egy további előfeldolgozási lépést is bevezettek: az alacsonyabb maximummal rendelkező szezont nem tárolják, ha maximuma kisebb a fő szezon maximumának 15%-ánál. A növekedési időszak kezdetét és végét ott határozzák meg, ahol a PPI görbe eléri a maximumának 15, illetve 25%-át (3. ábra), mivel ezek az értékek biztosítják a legerősebb kapcsolatot a fent említett terepi fenológiai mérésekkel (Tian et al., 2021). További, a közvetlen és közvetett validálással, valamint az időbeli és térbeli konzisztenciával kapcsolatos részletek a validálási jelentésben (Camacho et al., 2021) találhatóak.



3. ábra: A szezonális görbe egyes szakaszai, azaz vegetációs fenológiai paraméterek (VPP): növekedési időszak a) kezdete (dátum, PPI-érték és meredekség), b) vége (dátum, PPI-érték és meredekség), c) hossza, d) minimuma, e) csúcsa (dátum és PPI-érték), f) amplitúdója, g) kis integrált értéke, g+h) nagy integrált értéke. A kis integrált érték a napi értékek összege a növekedési időszak kezdete és vége között az alapvonal levonásával, míg a nagy integrált érték ugyanez, az alapvonal levonása nélkül. Míg előbbi a szezonális (SPROD), úgy utóbbi a teljes produkcióval (TPROD) feleltethető meg.

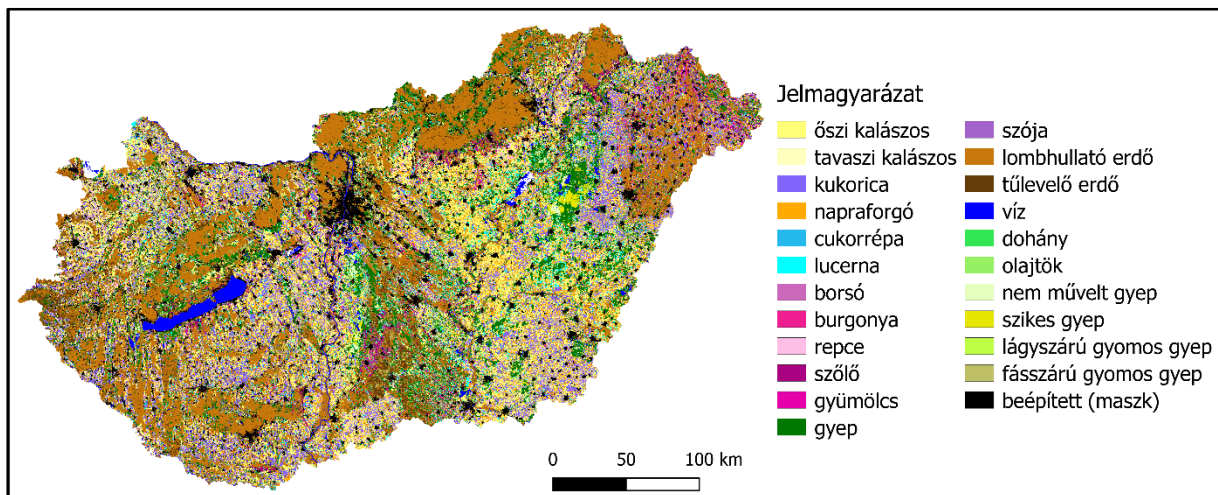
Gyepterületek azonosítása

A gyepterületek térképezése, különösen közepes és nagy térbeli felbontáson a hazai (Rada et al., 2017; Nádor et al., 2018; Bekő et al., 2020; Henits et al., 2022) és nemzetközi szakirodalomban (Ali et al., 2016; Reinermann et al., 2020) is élenként kutatott terület. Tapasztalataink szerint a leghatékonyabb megoldását egy olyan, közepes felbontású űrfelvétel-idősoron alapuló gyepter- és vetésszerkezeti térkép elkészítése nyújtja, amely a gyepter kategória mellett változatos szántóföldi és egyéb természetes felszínborítási típusokat is tartalmaz. A Lechner Tudásközpont Űrtávérzékelési Osztályán több éve készítünk ilyen tematikus térképeket egy egységesített módszertan alapján, melyek évenként országos információt hordoznak a gyepekről és a mezőgazdasági területekről (Pacsó et al., 2023).

Jelen vizsgálataink során a 2015–2023 időszakra készített vetésszerkezeti térképeink gyepek osztályozott pixeleit tekintettük gyepterületeknek, így röviden bemutatjuk azok elkészítésének módszertanát.

Az országos vetésszerkezeti térképeinket Python környezetben implementált Random Forest algoritmussal (Breiman, 2001; Pedregosa et al., 2011) állítottuk elő. A beállított paramétereket mintaterületen optimalizáltuk (Pacsó, 2019). A két legfontosabb Random Forest paramétert rögzítettük, a fák számát, valamint a famagasságot sorrendben 200, illetve 30 értékben. Az osztályozásokat nem országosan, hanem 34 úgynevezett strátumra végeztük el technikai és szakmai megfontolásból, melyek felszínborítási és felszínhasználati szempontokat, valamint a kistájhatárokat figyelembe véve kerültek kialakításra.

Felhőmentes Sentinel-2 felvételeket [4 – ESA], és a belőlük származtatott spektrális indexeket használtunk fel az osztályozáshoz, szükség esetén Landsat 8 és/vagy 9 felvételeket [5 – USGS] is bevontunk. Ez a márciustól októberig tartó vegetációs időszakból strátumtól és vizsgálati évtől függően 6-10 időpontot jelent évente. Mindezekon felül Sentinel-1 radarfelvételekből [4 – ESA] származtatott időbeli integrálokat is felhasználtunk, amelyek nagyban segítik bizonyos növénykategóriák szétválasztását (Nádor et al., 2018). A műhold adatokat egységesen 20×20 méteres EOVS rácsra mintavételeztük újra, így az eredménytérképeink térbeli felbontása is 20 méteres (4. ábra).



4. ábra: A 2023. évi gyepek- és vetésszerkezeti térkép.

A Magyar Államkincstár által rendelkezésünkre bocsátott Egységes Kérelmek anonimizált adatbázisa adta a terepi referenciaadataink nagy részét, mely téradatbázis szántóföldi és gyepek kategóriákat tartalmaz. Évektől függően 14-23 kategóriára növeltük a térképeink tematikus felbontását úgy, hogy erdőkre, vízre és a részletes gyepek kategóriákra (azaz nem művelt, szikes, vizenyős, lágyszárú vagy fűszárú gyomosossággal érintett gyepek) vonatkozó poligonokat is integráltunk a referencia-adatrendszerbe a Mezőgazdasági Parcella Azonosító Rendszer (MePAR) felszínborítási adatainak ezekre vonatkozó tematikus jelölőiből (flagekből) (Naszados et al., 2017). Az így kialakított vektoros adatbázist 50-50% arányban osztottuk fel tanító- és tesztadatra (más szóval validációs adatra) poligononként, majd rasterizáltuk. Átlagosan a strátumok területének 18,55%-án tanítottunk, 17,52%-án teszteltünk, mely utóbbi átlagosan az összes referenciaadat 48,5%-a pixelszinten.

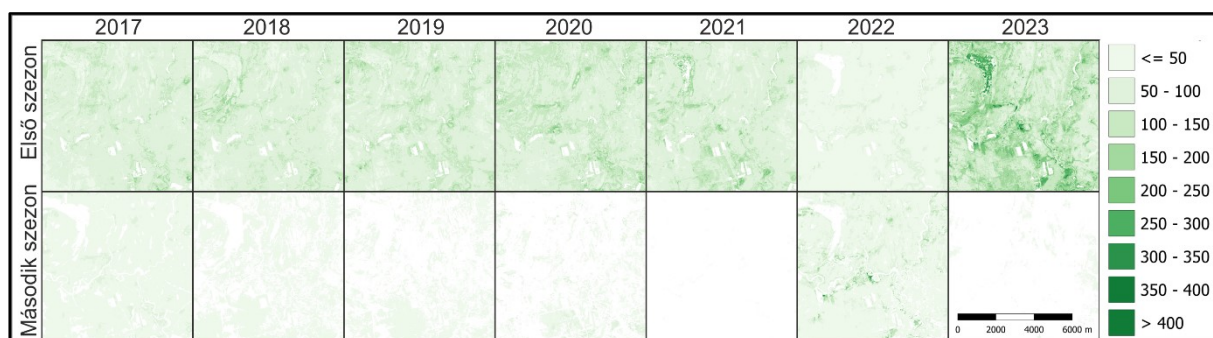
A Scikit-learn Python csomag (Pedregosa et al., 2011) beépített teljes pontosság (overall accuracy, OA), Cohen Kappa (Kappa), precision, recall és F1-score metrikáival mértük az elkészült eredmények pontosságát. A térben átlagolt teljes pontosságok évek között is átlagolt

értéke 95,20% (szórás = 1,52), míg a Kappáké 93,97% (szórás = 0,89), a gyepterület átlagos precision, recall és F1-score értékei sorrendben 85,94%, 94,71% és 90,03%.

Statisztikai és korrelációs vizsgálatok

Ahogy korábban már említettük, a HR-VPP vegetációs fenológiai paramétereket évente két vegetációs időszakra származtatják 10 méteres felbontásban. Az egyes paramétereket egyrétegű TIFF fájlok formájában, Sentinel-2 csempénként és szezononként teszik közzé minden évben. Vizsgálataink idején a 2017–2023 időszakokra álltak rendelkezésre adatok. A fent ismertetett paraméterek (3. ábra) közül ebben a tanulmányban a növekedési időszakok kezdetének (SOSD), az időszakok maximális PPI-értékének (MAXV), valamint a kis (SPROD) és a nagy integrált értékek (TPROD) évek közötti változásaira irányuló vizsgálatainkat mutatjuk be kizárólag a hazai gyepekre koncentrálva.

Magyarország teljes lefedéséhez 22 darab Sentinel-2 csempe szükséges, ezekből EOV vetületű országos mozaikokat állítottunk elő minden évre, mindkét szezonra, a fenti négy mennyiségből. Elkészült továbbá egy-egy olyan réteg is, ami az éves teljes produktivitást hivatott jellemezni, azaz technikailag a TPROD és az SPROD mennyiségek két szezonra vett összege, valamint egy abszolút maximum réteg, ami a két szezon legmagasabb értékét reprezentálja. Ezekből a rétegekből azok a pixelek kerültek kiválasztásra minden évben, amelyek az adott évi gyepterület térképén gyepterület kategóriába tartoztak (5. ábra). Azok a pixelek, ahol a VPP rétegek nodata értéket tartalmaznak – mert például nem jelent meg második fejlődési csúcs a fenológiában, így a második növekedési időszakra vonatkozó réteg nem értelmezhető –, nem vizsgáltuk.



5. ábra: TPROD értékek változása a 2017–2023 időszakban egy hazai gyepterületen.

Az így kapott VPP pixelértékekből hisztogramok készültek. Jelen vizsgálataink során egymástól függetlenül kezeltük az egyes évek gyepterületeit, amelyeken az évek között ingadozás mutatkozik az összes gyepterület nagyságában. Azért, hogy az egyes évek összehasonlíthatók legyenek annak ellenére is, hogy az egyes években eltérő darabszámú gyepterület pixelét vizsgáltunk, a gyakoriságot az adott évi gyepterület pixel darabszámával normáltuk, és az eredményeket százalékban közöljük (6–11. ábra). A vizsgálat célja megfigyelni, hogy országos léptékben mutatkozik-e eltérés a gyepek viselkedésében az egyes évek között.

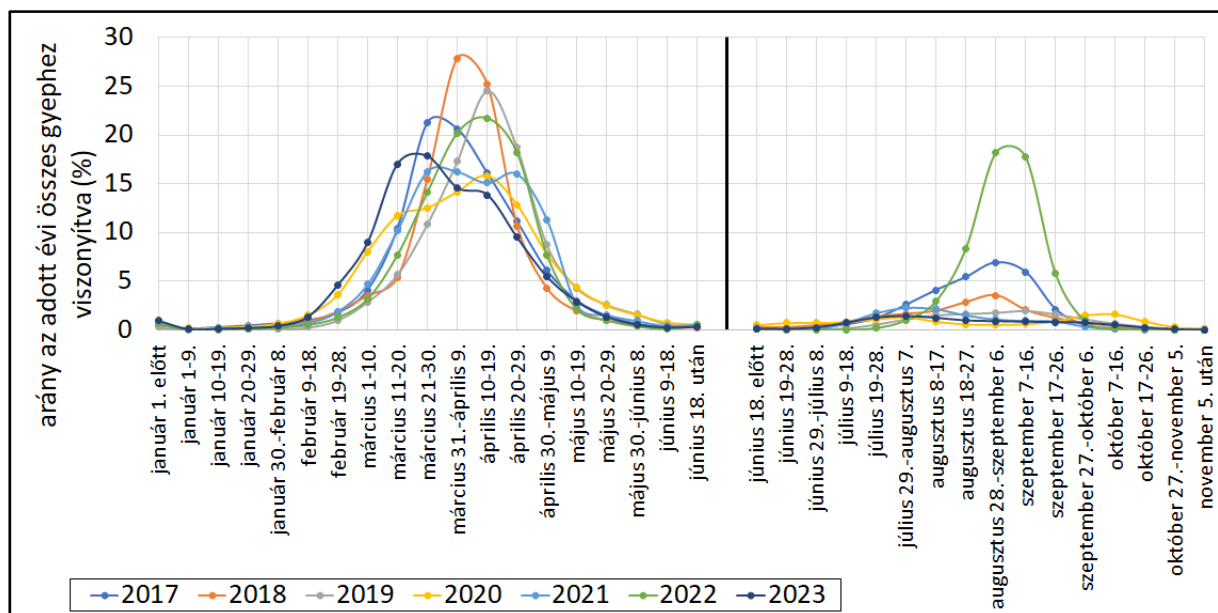
Célunk volt továbbá megállapítani, hogy gyepek esetén a VPP rétegek közül melyek mutatnak erős korrelációt egymással. A korrelációs vizsgálatokba a fenti négy mennyiség mellett a növekedési időszakok csúcsának napját (MAXD), az időszakok végének napját (EOSD) és az időszakok hosszát (LENGTH) is bevontuk. Minden évre és minden szezonra – a két szezon összevont rétegeit is beleértve – kiszámítottuk az egyes rétegek közötti korrelációt, szintén pusztán a gyepterület pixelre szűkítve az elemzést, majd kiszámítottuk az átlagos korrelációt az évek között (1. táblázat).

Eredmények

Gyepterületek VPP értékeinek időbeli változása

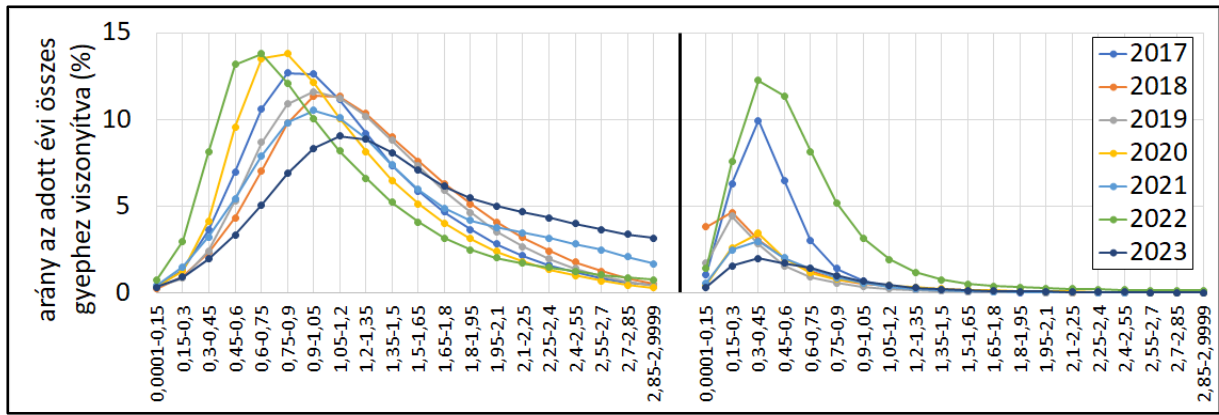
Korábban a vegetációs időszak kezdő dátumát gyepparcellákban vizsgálva arra a következtetésre jutottunk, hogy – habár a parcellahatár gyepek esetén nem feltétlenül jelent művelési határt is úgy, mint a szántóföldi növények esetén – a parcellákat viszonylag homogén növekedési kezdet jellemzi (Pacsó et al., 2024). A parcellákban belüli SOSD szórása legtöbb esetben kevesebb, mint két hét. Mindezek ellenére jelen kutatást nem parcellaszinten, hanem pixelszinten végeztük.

Az első növekedési időszak SOSD értékeinek eloszlását tekintve megfigyelhetjük, hogy 2023-ban március 21–30. tíznapos intervallumban indult növekedésnek a legtöbb gyepparcella – itt éri el a hisztogram a maximumát –, míg 2019-ben és 2022-ben legalább 20 nappal későbbre tolódnak a leggyakoribb értéket jelentő csúcsok (6. ábra bal oldala). A második szezon vizsgálva szembevetve, hogy 2022-ben és 2017-ben a többi évhez viszonyítva a gyepek jelentős százaléka rendelkezett második szezonnal, mely jellemzően augusztus végén–szeptember elején kezdődött (6. ábra jobb oldala).

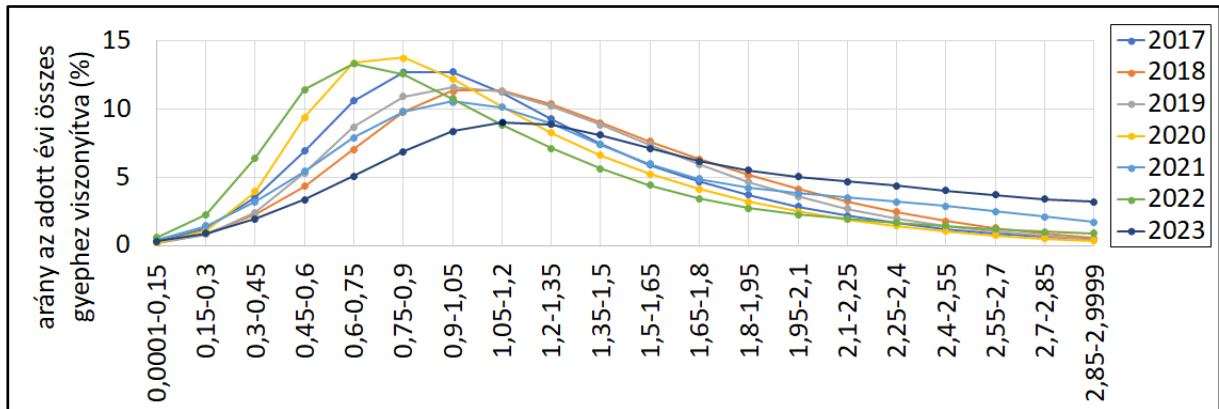


6. ábra: A növekedési időszak kezdetének dátuma az első és a második szezonra a 2017–2023 években.

A maximális PPI értékekre vonatkozó hisztogramokat vizsgálva szintén egyértelmű a második maximum megjelenése 2022-ben és 2017-ben (7. ábra jobb oldala), ahogy azt az SOSD hisztogramokon már láthattuk. Azt is megfigyelhetjük, hogy mind az első szezonban (7. ábra bal oldala), mind a két szezon összevont maximumának hisztogramján (8. ábra) felállítható egy sorrendiség a hisztogramok maximum értékei alapján: míg 2022-ben az alacsonyabb maximum PPI értékeknél tetőzik a hisztogram, úgy 2023-ban a magasabb maximumok felé tolódik a görbe.

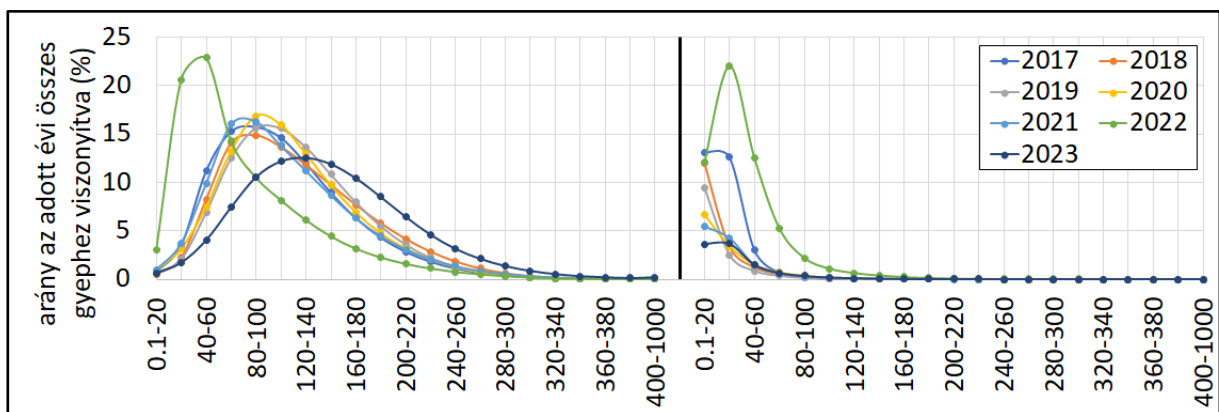


7. ábra: Maximális PPI értéktartományok az első és a második szezonra külön.

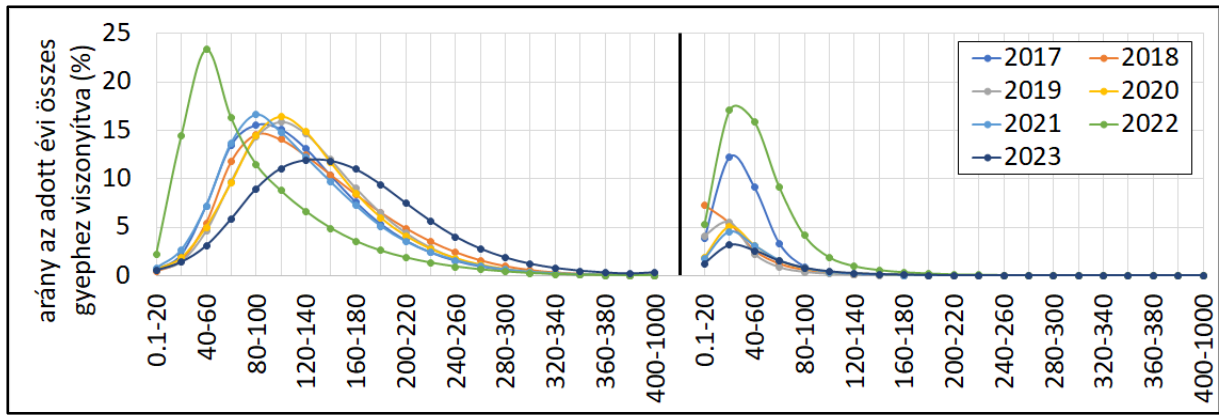


8. ábra: Maximális PPI értéktartományok az első és a második szezonra összevonva.

Fentieket a két szezonra vonatkozó SPROD és TPROD hisztogramok is alátámasztják (9–10. ábra): 2022 sok pixel esetén kiugróan alacsony produktíót mutat, azonban a legtöbb pixel második növekedési időszakkal is rendelkezik, eközben 2023-ban jelentősen magasabbra tolódik a produkció az első szezonban, de második szezon jellemzően nem jelentkezik.

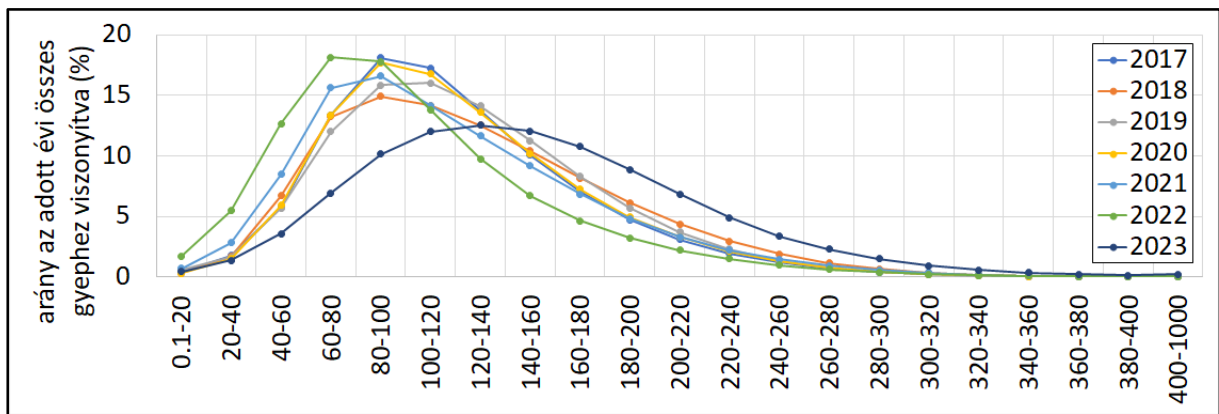


9. ábra: SPROD értéktartományok az első és a második szezonra.

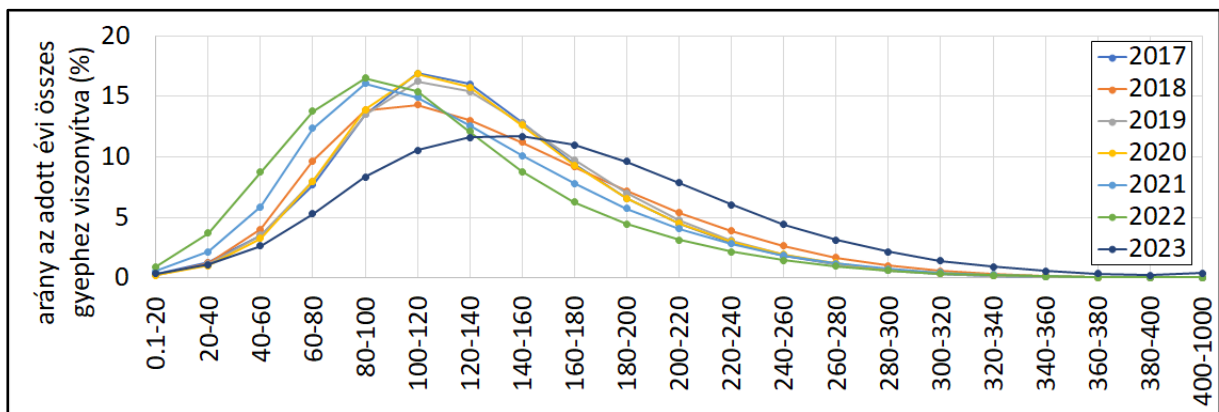


10. ábra: TPROD értéktartományok az első és a második szezonra.

A két szezon összegzett produkcióját szemléltető hisztogramokon azonban igazán érdekes jelenséget figyelhetünk meg (11–12. ábra). Ugyan a 2022-es év a két növekedési időszakot külön-külön vizsgálva kiugróan alacsony produkció értékekkel rendelkezett, az összesített produkciója nem számottevően alacsonyabb, mint a 2017–2021 éveké. A 2023 év összesített produkciója viszont továbbra is jelentősen a magasabb értékek felé mozdul el.



11. ábra: SPROD értéktartományok az első és a második szezon összegére.



12. ábra: TPROD értéktartományok az első és a második szezon összegére.

Megfigyeléseinket értelmezve azt feltételezzük, hogy habár 2022-ben a nyári aszály a gyepek produkciójának csökkenését okozták, a nyár végi második kizöldüléssel összesítve a produkciójuk megközelíti a többi vizsgált év produkcióját. A 2023-as év jelentős csapadéktöbblete azonban egyértelműen megemelte a gyepek produktivitását. Ezen

feltételezés alátámasztása és a produkció-különbségek térbeli eloszlásának vizsgálata céljából a jövőben meteorológiai adatokkal tervezzük összevetni a VPP rétegekből származó eredményeket.

VPP rétegek korrelációja gyepeken

Az egyes VPP rétegek közötti átlagos korreláció értékeit az 1. táblázat tartalmazza. Megfigyelhetjük, hogy a szezon maximuma (MAXV) és a két görbe alatti terület nagysága mindkét szezonban erősen összefügg – SPROD esetén 0,76 és 0,90 a korreláció, míg TPROD-ra 0,74 és 0,87. Az abszolút maximum és az összesített hozamok közti korreláció is magas – SPROD-ra 0,79, míg TPROD-ra 0,78. Nyilvánvaló, hogy minél magasabbra emelkedik a fenológiai görbe, annál nagyobb lesz az értékek összege is. Hasonlóan, a két görbe alatti terület nagysága is erősen korrelál egymással – 0,98, 0,94 a két szezonra és 0,97 az összegzett rétegre –, hiszen a TPROD érték az SPROD és a viszonylag állandónak tekinthető alapvonal összege minden időpontban.

1. táblázat: Átlagos korreláció értékei az első (balra) és a második szezon rétegei (középen), valamint a két szezonra összegzett rétegek között (jobbra).

S1	LENGTH	MAXD	MAXV	SOSD	SPROD	TPROD	S2	LENGTH	MAXD	MAXV	SOSD	SPROD	TPROD	S1+S2	SPROD	TPROD
EOSD	0,74	0,36	-0,16	0,15	0,27	0,28	EOSD	0,44	0,59	-0,30	0,48	-0,18	-0,14	MAXV	0,79	0,78
LENGTH		0,16	-0,31	-0,18	0,27	0,31	LENGTH		0,09	-0,20	-0,15	0,09	0,20	SPROD		0,97
MAXD			0,00	0,34	0,16	0,12	MAXD			-0,42	0,89	-0,36	-0,36			
MAXV				0,18	0,76	0,74	MAXV				-0,34	0,90	0,87			
SOSD					0,12	0,08	SOSD					-0,35	-0,38	-1	0	1
SPROD						0,98	SPROD						0,94			

Szembevetendő továbbá, hogy az első növekedési időszak hossza (S1 LENGTH) korrelál az időszak végének dátumával (S1 EOSD) – a korreláció értéke 0,74 –, míg a második szezonban az időszak kezdő (S2 SOSD) és maximális dátuma (S2 MAXD) mutat jelentős összefüggést – a korreláció 0,89.

Tapasztalatainkat összefoglalva azt javasoljuk, hogy egy osztályozásban, ami a hazai gyepeket relatív hozam alapján hivatott kategóriákba sorolni, és amelyhez a lehető legkevesebb bemenő réteget szeretnénk felhasználni, mindkét szezon kezdő dátuma (SOSD) és hossza (LENGTH), az első szezon csúcsának napja (S1 MAXD), valamint a két szezonra összesített TPROD rétegek mindenképp kapjanak helyet, ezek egymástól legtöbbször statisztikailag független információt hordoznak.

Összefoglalás és kitekintés

Munkánk során a Copernicus HR-VPP termékcsalád vegetációs paramétereit vizsgáltuk a magyarországi gyepek területére 10 méteres felbontásban több évre, amely területeket korábban ürfelvétel idősor alapú tanított térbeli osztályozással térképeztünk fel.

Eredményeink azt mutatják, hogy az évjáráthatások miatt az egyes évek között akár 20-30 nap különbség is lehet a gyepek vegetációs időszakának kezdetében, valamint, hogy a szezon maximális értékeinek hisztogramjai alapján felállítható egy relatív sorrend az egyes évek között.

Megfigyeltük, hogy nyári másodzöldülés, azaz második növekedési szezon nem jelentkezik minden évben, de ahol igen, ott mindkét szezon produkciója alacsony, míg az egy növekedési időszakkal leírható években a produkció jelentősen magasabb. A két szezon értékeinek összege azonban már nem kiugróan alacsonyabb azoknál az éveknél, ahol a legtöbb pixelt az egy szezon jellemzi, azaz a gyepek a második növekedési szezonnal képesek behozni a hozambeli lemaradást.

Az időbeli eltérések áttekintése mellett korrelációs vizsgálatokkal sikerült meghatároznunk, hogy mely VPP rétegeket szükséges mindenképp felhasználnunk egy jövőbeli relatív hozamra vonatkozó szegmentálás során, és melyek hordoznak kvázi redundáns információkat.

A jövőben további célunk a vizsgálatainkat kizárólag állandónak tekinthető gyepterületekre megismételni, az eredményeinket meteorológiai adatokkal is összevetni, ezzel lehetőség szerint magyarázva az évek közötti különbségeket, valamint valós hozamadatokkal – azaz parcellaszintű terepi mérésekkel és KSH statisztikai adatokkal [6 – KSH] – is összehasonlítani.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Kulturális és Innovációs Minisztérium Nemzeti Kutatási Fejlesztési és Innovációs Alapból nyújtott támogatásával, a KDP-2021 pályázati program finanszírozásában valósult meg. A kutatást az Éghajlatváltozás Nemzeti Multidiszciplináris Laboratórium RRF-2.3.1-21-2022-00014 számú projekt is támogatta. A HR-VPP adatok és a kapcsolódó dokumentáció joggyakorlója az © Európai Unió, Copernicus Land Monitoring Service 2022, Európai Környezetvédelmi Ügynökség (EEA). A HR-VPP adatokhoz a WEkEO DIAS Information adatbázisából jutottunk hozzá (WEkEO, 2021). Az Egységes Kérelem adatbázist és a MePAR adatokat a Magyar Államkincstár engedélyével használtuk fel anonimizált formában. Az űrfelvételek feldolgozása nyíltforrású Python csomagok használatával, a megjelenítésük és elemzésük QGIS 3.24.3 (2022) környezetben történt. Köszönet illeti mindazon szakértő kollégákat, akik az évek során az osztályozások technikai megvalósításában részt vettek. Külön köszönet Alföldy Bálintnak a HR-VPP adatok API-n keresztül történő letöltésében, valamint Richter-Cserey Mátyásnak a korrelációs elemzések automatizálásában nyújtott segítségéért. Köszönöm továbbá Bognár Gergőnek minden személyes és szakmai támogatását.

Hivatkozások

- Ali, I., Cawkwell, F., Dwyer, E., Barrett, B., Green, S., 2016: Satellite remote sensing of grasslands: from observation to management. *Journal of Plant Ecology*, 9(6): 649–671. <https://doi.org/10.1093/jpe/rtw005>
- Bekő, L., Burai, P., Kiss, A., Lénárt, Cs., Tomor, T., Schinogl, P., ... & Szabó, Sz., 2020: Vetésszerkezet meghatározása különböző multispektrális műholdfelvételek alkalmazásával. In: Az elmélet és gyakorlat találkozása a térinformatikában XI. (szerk.: Molnár, V. É.), Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen. 47–53. online: https://giskonferencia.unideb.hu/arch/GIS_Konf_kotet_2020.pdf
- Breiman, L., 2001: Random Forests. *Machine Learning*, 45(1): 5–32. <https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Camacho, F., Sánchez-Zapero, J., Swinnen, E., Bonte, K., Martínez-Sánchez, E., 2021: HR-VPP Validation Report Seasonal Trajectories and VPP parameters, Issue 2.0 © EEA.
- Dávid, R.Á., Barcza, Z., Kern, A., 2022: Magyarországi gyepek fenológiai ciklusának vizsgálata műholdas távérzékelés segítségével. *Egyetemi meteorológiai füzetek*, 34: 22–30. <https://doi.org/10.31852/EMF.34.2022.022.030>
- Eklundh, L., Tian, F., Cai, Z., Van Hoost, R., Bonte, K., Scheffinger, H., Hufkens, K., 2021: HR-VPP Calibration Report, Issue 1.7. © EEA.
- Fischer, A., 1994: A model for the seasonal variations of vegetation indices in coarse resolution data and its inversion to extract crop parameters. *Remote Sensing of Environment*, 48(2): 220–230. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90143-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90143-0)

- Henits, L., Szerletics, Á., Szokol, D., Szlovák, G., Gojdár, E., Zlinszky, A., 2022: Sentinel-2 Enables Nationwide Monitoring of Single Area Payment Scheme and Greening Agricultural Subsidies in Hungary. *Remote Sensing*, 14(16): 3917. <https://doi.org/10.3390/rs14163917>
- Jin, H., Eklundh, L., 2014: A physically based vegetation index for improved monitoring of plant phenology. *Remote Sensing of Environment*, 152: 512–525. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.07.010>
- Jin, H., Jönsson, A. M., Bolmgren, K., Langvall, O., Eklundh, L., 2017: Disentangling remotely-sensed plant phenology and snow seasonality at northern Europe using MODIS and the plant phenology index. *Remote Sensing of Environment*, 198: 203–212. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.015>
- Jin, H., Jönsson, A. M., Olsson, C., Lindström, J., Jönsson, P., Eklundh, L., 2019: New satellite-based estimates show significant trends in spring phenology and complex sensitivities to temperature and precipitation at northern European latitudes. *International Journal of Biometeorology*, 63: 763–775. <https://doi.org/10.1007/s00484-019-01690-5>
- Jönsson, P., Cai, Z., Melaas, E., Friedl, M., Eklundh, L., 2018: A Method for Robust Estimation of Vegetation Seasonality from Landsat and Sentinel-2 Time Series Data. *Remote Sensing*, 10(4): 635. <https://doi.org/10.3390/rs10040635>
- Jönsson, P., Eklundh, L., 2004: TIMESAT – a program for analyzing time-series of satellite sensor data. *Computers & Geosciences*, 30: 833–845. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.05.006>
- 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>
- Nádor, G., Birinyi, E., Pacskó, V., Friedl, Z., Rotterné Kulcsár, A., Hubik, I., Gera, D.Á., Surek, Gy., 2018: Country wide grassland mapping by fusion of optical and radar time series data [Poster presentation]. 3rd joint EARSeL LULC & NASA LCLUC Workshop; 38th Annual EARSeL Symposium, Chania, Crete, Greece.
- Naszádos, A., Szekeres, Á., Tüske, T., 2017: A MePAR felszínborítási adatának leírása. A 2015. és 2016. évi kezdő MePAR-ban szereplő felszínborítási kategóriák, valamint a felszínborítási adathoz köthető egyéb jelzések leírása. Budapest Főváros Kormányhivatala, Földmérési, Távérzékelési és Földhivatali Főosztály, Földmérési és Távérzékelési Részleg, MePAR Fejlesztési, Koordinációs és Üzemeltetési Osztály. <https://doi.org/10.34811/osz.alapterkep.dokumentum>
- Pacsó, V., 2019: Élőhely-térképezés radar és optikai űrfelvétel-idősorok alapján. Diplomamunka, ELTE TTK, geofizika MSc
- Pacsó, V., Belényesi, M., Barcza, Z., 2023: Vetésszerkezeti térképek idősorának kategóriánkénti pontosságvizsgálata. In: Az elmélet és gyakorlat találkozása a térinformatikában XIV. (szerk.: Abriha-Molnár, V. É.) Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen. 191–198. online: https://giskonferencia.unideb.hu/arch/GIS_Konf_kotet_2023.pdf
- Pacsó, V., Birinyi, E., Petrik, O., Barcza, Z., 2024: A növekedés kezdetének becslése szántóföldek és gyepek esetében Copernicus HR VPP fenológiai adatok felhasználásával. In: Az elmélet és gyakorlat találkozása a térinformatikában XV. (szerk.: Abriha-Molnár, V. É.), Debreceni Egyetemi Kiadó, Debrecen. 209–217. online: https://giskonferencia.unideb.hu/arch/GIS_Konf_kotet_2024.pdf
- Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., ... & Duchesnay, E., 2011: Scikit-learn: Machine Learning in Python. *Journal of Machine Learning Research*, 12(2021): 2825–2830. <https://doi.org/10.5555/1953048.2078195>

- Piao, S., Liu, Q., Chen, A., Janssens, I.A., Fu, Y., Dai, J., ... & Zhu, X., 2019: Plant phenology and global climate change: current progresses and challenges. *Global Change Biology*, 25: 1922–1940. <https://doi.org/10.1111/gcb.14619>
- Rada, M.M., Friedl, Z., Nádor, G., Surek, Gy., Kulcsár, A., Hubik, I., Gera, D.Á., 2017: Identification of grasslands by the fusion of Sentinel-1 and Sentinel-2 time series [Poster presentation]. Polinsar 2017, ESA-ESRIN Frascati, Rome, Italy.
- Reinermann, S., Asam, S., Kuenzer, C., 2020: Remote Sensing of Grassland Production and Management – A Review. *Remote Sensing*, 12(12): 1949. <https://doi.org/10.3390/rs12121949>
- 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>
- Silleos, N.G., Alexandridis, T.K., Gitas, I.Z., Perakis, K., 2006: Vegetation Indices: Advances Made in Biomass Estimation and Vegetation Monitoring in the Last 30 Years. *Geocarto International*, 21(4): 21–28. <https://doi.org/10.1080/10106040608542399>
- Smets, B., Cai, Z., Eklundh, L., Tian, F., Bonte, K., Van Hoost, R., ... & Jönsson, P., 2023a: HR-VPP Product User Manual Daily Raw Vegetation Indices, Issue 2.3 © EEA.
- Smets, B., Cai, Z., Eklundh, L., Tian, F., Bonte, K., Van Hoost, R., ... & Jönsson, P., 2023b: HR-VPP Product User Manual Seasonal Trajectories and VPP parameters, Issue 2.3. © EEA.
- Tian, F., Cai, Z., Jin, H., Hufkens, K., Scheffinger, H., Tagesson, T., ... & Eklundh, L., 2021: Calibrating vegetation phenology from Sentinel-2 using eddy covariance, PhenoCam, and PEP725 networks across Europe. *Remote Sensing of Environment*, 260: 112456. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2021.112456>
- Woltring, H.J., 1986: A Fortran package for generalized, cross-validatory spline smoothing and differentiation. *Advances in Engineering Software* (1978), 8(2): 104–113. [https://doi.org/10.1016/0141-1195\(86\)90098-7](https://doi.org/10.1016/0141-1195(86)90098-7)
- 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>
- Zhang, X., Friedl, M.A., Schaaf, C.B., Strahler, A.H., Hodges, J.C.F., Gao, F., ... & 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)

Internetes hivatkozások

- [1 – CLMS] Copernicus Land Monitoring Service Portfolio, Vegetation, <https://land.copernicus.eu/en/products/vegetation>
- [2 – WEkEO] CLMS releases HR-VPP product to assess ecosystems and biodiversity, <https://www.wekeo.eu/news/clms-releases-hr-vpp-product-to-assess-ecosystems-and-biodiversity>
- [3 – TIMESAT] A software package to analyse time-series of satellite sensor data, <https://web.nateko.lu.se/timesat/timesat.asp>
- [4 – ESA] Copernicus Sentinel data [2015-2023], processed by ESA. <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data>

[5 – USGS] Landsat 8 and Landsat 9 images courtesy of the U.S. Geological Survey.

<https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-data-access>

[6 – KSH] Központi Statisztikai Hivatal, Összefoglaló táblák (STADAT) rendszer,

<https://www.ksh.hu/stadat>

ORCID

Pacsó V.  <https://orcid.org/0000-0003-4673-6833>

Barcza Z.  <https://orcid.org/0000-0002-1278-0636>