

SOPRONI EGYETEM
ERDŐMÉRNÖKI KAR
ROTH GYULA ERDÉSZETI ÉS VADGAZDÁLKODÁSI TUDOMÁNYOK DOKTORI ISKOLA
E3 ERDŐVAGYON-GAZDÁLKODÁS PROGRAM

DOKTORI (PHD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

FAÁLLOMÁNYOK FELMÉRÉSE ÉS MODELLEZÉSE TÁVÉRZÉKELÉSI ÉS
GEOINFORMATIKAI MÓDSZEREKKEL

Készítette: Barton Iván

Sopron
2021

DOKTORI ISKOLA: ROTH GYULA ERDÉSZETI ÉS VADGAZDÁLKODÁSI TUDOMÁNYOK
DOKTORI ISKOLA VEZETŐ: PROF. DR. FARAGÓ SÁNDOR

PROGRAM: E3 ERDŐVAGYON-GAZDÁLKODÁS
VEZETŐ: PROF. DR. LETT BÉLA

TÉMAVEZETŐK: DR. KIRÁLY GÉZA & DR. CZIMBER KORNÉL

Tartalomjegyzék

1. A téma aktualitása	4
2. A kutatás célkitűzései.....	4
3. A kutatás hipotézisei	5
4. A kutatás módszerei.....	7
5. A kutatás eredményei, következtetések.....	8
6. A kutatások legfontosabb eredményeit összefoglaló tézisek	9
7. Az értekezés témakörében készült publikációk.....	10

1. A téma aktualitása

Az erdőgazdálkodás jelenlegi gyakorlatában a gazdálkodók az erdőtervezésnél felmért paraméterek, terepi bejárások alkalmával szerzett tapasztalatok és további mérések alapján kezelik az erdőket. Ez a hibrid módszer már közel két évszázada van használatban, ami homogén állomány szerkezet mellett vágásos üzemmódban kezelt erdőknél bizonyítottan jól működik. A módszer megbízhatóságának hátterét a statisztikai mintavételezés nyújtja, amelyen az erdőbecslés alapul. Az erdő leírása 10 éves ciklusokban készül el a Körzeti Erdőtervezéshez kapcsolódva. A faállományokról pontosabb összképet csak a terepi látogatás során nyer a gazdálkodó, mivel az erdőleíró adatok elsősorban vertikálisan írják le az erdőt a különböző állományrészekben keresztül.

A hagyományos erdőleírás során gyűjtött adatok interpretálása a döntéshozatalhoz nem feltétlenül igényel részletesebb helyismereteket, amennyiben az adatgyűjtés reprezentatív mintaszámmal történt meg. Heterogén faállományok esetén 30-50%-kal több minta szükséges egyes erdőbecslési eljárásoknál homogén faállományokhoz képest. Az erre fordított időtöbblet és a körzeti erdőtervezéssel járó adminisztrációs teher növekedése az erdőleírás hatékonyságát csökkentette az utóbbi évtizedekben, aminek következtében az ország egyes területein rendszeressé vált az átmeneti erdőtervek alkalmazása. A munkavállalók magasabb fluktuációjának következtében a korábbi, csak egyes személyekhez kötődő, hosszú idő alatt megszerzett helyismeretek nem feltétlenül adódnak át objektívan az utódnak, ami az erdőleírásnál a hatékonyság további visszaeséséhez vezethet. Ezeket a helyi szinten megjelenő problémákat az egyes feladatok automatizálásával lehetne feloldani, aminek következtében kevesebb élőmunka befektetéssel hasonló teljesítményt lehet elérni.

Az utóbbi években egyre gyakrabban olvasható civil szervezetek kritikája az állami erdőgazdaságok tevékenységeiről. Ezek a kritikák ugyan lokális problémákra mutatnak rá, de a háttérükben egy olyan, egyre jobban bizonyított, és a társadalom által fontosabbnak tartott nézetek állnak, melyeket a 21. században már nem lehet teljesen figyelmen kívül hagyni, mint például a klíma változását. A gazdálkodók részéről az átláthatóbb gazdálkodással és szélesebb köröket elérő kommunikációval lehetne a társadalom felé nyitni.

A jelenlegi erdőleírás erdőrészlet szinten történik, ami egy néhány hektár területű egységet jelöl. A homogén termőhely és egységes faállomány kezelés miatt a rajta álló faállomány is egységesnek tekinthető a legtöbb esetben. Az egységes faállományokat modellezni lehet, részletes felméréseik alapján születnek meg a fatermési és erdőnevelési modellek. Az erdők jövőjének tervezése, mely Magyarországon a Körzeti Erdőtervezés keretében történik, ezeket a modelleket alkalmazzák. Ezek a modellek rendszerint hektárra fajlagosított értékeket tartalmaznak, így a modellek alapján kiszabott erdőnevelési beavatkozásoknál a faállományok pontos kiterjedésének az ismerete nagyon fontos.

Magyarországon 2015-ben közel 60 000 hektár olyan erdőterület volt, ahol a korábbi vágásos erdőműveléssel kezelt erdők vegyeskorúvá alakítása van előírva. Ezek az erdők erdőtervezés szempontjából nagyobb kihívást jelentenek, így nyilvántartásukra fokozottabb figyelmet kell fordítani, mivel a hagyományos módszerekkel nagyon sűrű terepi mintavétel segítségével lehet csak pontosan felmérni a fakészletüket.

A felsorolt problémák arra mutatnak rá, hogy szükség van olyan objektív erdőleírtásra lokális szinten, ami a mostaninál gyakoribb frissítéssel rendelkezik, több térbeli paramétert tartalmaz, ezzel támogatva az erdő fenntartható és jobban átlátható kezelését, amivel az erdő jövőjét alapozzuk meg hosszú távon. Egy ilyen rendszer csak magasan automatizált adatgyűjtési módszerek mellett lenne fenntartható. Egy lehetséges útja az ilyen típusú adatszerzésnek a távérzékelés.

A tartamos és természetközeli erdőgazdálkodás alapfeltétele, hogy tisztában legyünk az erdőben található biomaszra minél pontosabb mennyiségével és a faállományok minőségével. A szakmai és társadalmi elvárásoknak megfelelően a klasszikus vágásos kezelésű erdőkből átalakított vegyes korú faállományok leírása egyre komplexebb, a régi módszerekkel egyre nehezebben leírható. Ennek érdekében olyan fejlesztésekre van szükség, amelyekkel minél pontosabb modellt tudunk alkotni az erdő múltjáról, jelenéről és jövőjéről.

2. A kutatás célkitűzései

A doktori kutatás célja olyan távérzékelésen alapuló munkafolyamatok fejlesztése volt, amelyeknek segítségével idő- és költséghatékonyan lehetséges különböző faállomány paraméterek meghatározása nagy felbontású optikai űrfelvételeken.

A kutatás célkitűzéseinek részletesebb megfogalmazása:

- Bemutatni, hogy a nagy felbontású űrfelvételeken látható faállományok milyen formában jelennek meg és ezeket milyen szerkezeti és környezeti tényezők befolyásolják.
- Megvizsgálni, hogy a Sentinel-2 műhold ingyenesen elérhető, nagy felbontású űrfelvételeiből lehetséges-e olyan idősorok összeállítása, amelyen a faállományok különböző paramétereit kiértékelhetők.
- A Sentinel-2 műhold különböző előfeldolgozottsági szintű termékeinek vizsgálata faállományokon.
- Elemzésre kész, konzisztens Sentinel-2 űrfelvétel-idősor előállításához automatizált feldolgozó lánc fejlesztése, ami kifejezetten a faállományok spektrális és időbeli jellegzetességeit veszi figyelembe a radiometriai korrekció során.
- Idősor alapú távérzékelési munkafolyamat fejlesztése, amivel a faállományokban létrehozott mesterséges és természetes lékek területe pontosan becsülhető szubpixel szinten.
- Faállomány-típusok térképezéséhez olyan távérzékelési munkafolyamat fejlesztése, amely a lehető legjobban figyelembe veszi az állományok spektrális-térbeli-időbeli jellegzetességeit.

A munka három esettanulmányból áll össze, melyek a fenti kitűzött célokra koncentrálnak:

1. Kiértékelhető Sentinel-2 űrfelvételek vizsgálata a magyarországi erdőállományokra: Az optikai földmegfigyelő műholdak felvételeit erdőterületekre csak felhő- és felhőárnyék mentes képeken lehetséges kiértékelni. Régióink felett magas az átlagos felhőborítottság (~70%), ezért kevés teljesen felhőmentes kép érhető el. Egy olyan adatbázist hoztam létre Sentinel-2A űrfelvételek alapján, amely erdőrészt szinten nyújt információt arról, hogy milyen időpontokban áll rendelkezésre kiértékelhető űrfelvétel. Az adatbázison végzett vizsgálatok alapján teljesebb képet kaptam az idősorok alkalmazhatóságáról és azoknak korlátairól.
2. Lékek detektálása Sentinel-2 űrfelvételeken a Börzsöny hegységben: A Sentinel-2 műhold 10 m felbontású felvételeivel lehetőség nyílt arra, hogy olyan kisebb mértékű erdészeti beavatkozásokat is megfigyelhessünk, mint a mesterséges lékek. A kis méretű lékek területkimutatása szubpixeles megoldásokkal kiértékelhető. A magas időbeli felbontást kihasználva évente több térkép készíthető egy adott állapotról, azonban ilyenkor a felvételek rögzítési körülményei különböznek. A kutatás során olyan módszert alkalmaztam, amely képes kezelni a különböző felvételi körülményeket, így a

létrehozott térképekből összeállított idősoron nagyobb pontossággal meg lehet határozni az erdővel és lékekkel borított állományrészek térbeli kiterjedését, mint egy időpont alapján. Az esettanulmány további célja volt, hogy a különböző előfeldolgozottsági szintű űrfelvétel idősorok alapján képet kapjak az eredményre gyakorolt hatásukra.

3. Faállomány-típusok térképezése Sentinel-2 űrfelvételeken a Börzsöny hegységben: A faállomány felső lombkoronaszintjének fajösszetételét az űrfelvétel idősorok spektrális, idő- és térbeli jellemzői alapján lehet meghatározni. Annak ellenére, hogy az idősor csak a korona felszínről szolgáltat információt, a faállomány-típusra következtetni lehet a detektált főfafaj alapján. A kutatás során egy űrfelvétel-idősor előfeldolgozási láncot fejlesztettem, amelynek segítségével az erdőborítást pontosabban lehet kiértékelni, mint az adatszolgáltató által nyújtott megoldással. Az előfeldolgozott képanyagon történt meg a faállomány-típusok kiértékelése a homogén erdőfoltokon, erdőrészet szint alatti felbontásban a Börzsöny hegységben. A kutatásban mély konvolúciós neurális hálózatokra épülő képosztályozási eljárások erdészeti alkalmazhatóságát vizsgáltam nagy felbontású űrfelvétel idősorokon, ami az idősor spektrális-térbeli-időbeli jellemzőit használta fel az egyes faállomány-típusoknak. Az elért osztályozási pontosságot egy Random Forest típusú osztályozó modell teljesítményével hasonlítottam össze, ami csak a spektrális-időbeli képjellemzőket használta fel. Az összehasonlítás célja az osztályozó modellek létrehozásához szükséges befektetett élő munkának vizsgálata volt.

3. A kutatás hipotézisei

H1: Az egyes erdőrészekre sűrűbb idősor állítható össze, ha nem Sentinel-2 csempe (1000000 ha), hanem erdőrészet (átl. 3.7 ha) alapon történik a vizsgálat.

H2: Topográfiai és atmoszférikus korrekción átesett Sentinel-2 űrfelvétel-idősor alapján jobban meghatározható és monitorozható a mesterséges lécek kiterjedése hegyvidéki faállományokban.

H3: A Sentinel-2 űrfelvétel-idősor előfeldolgozási lánc fejlesztése faállományokra jellemző spektrális-időbeli-jellegzetességei alapján javítja a távérzékelési elemzés végső eredményét.

H4: Az erdőterületek fölött a Sentinel-2 idősorban, Kálmán-szűrésen alapuló módszerrel jelentősen pontosabb felhőmaszkok hozhatók létre, mint a Sen2Cor szoftverben egy időpont alapján.

H5: A faállományok megvilágítottságát is figyelembe véve olyan idősor alapú térkép hozható létre, ami szubpixeles felbontásban mutatja a lécek kiterjedését nagy pontossággal.

H6: A faállomány-típusok térképezése nagy pontossággal lehetséges Sentinel-2 űrfelvétel-idősorokon olyan mély konvolúciós neurális hálózatokkal, melyek a spektrális-térbeli-időbeli jellegzetességek használják fel.

4. A kutatás módszerei

Az esettanulmányok műholdas távérzékelésen alapuló munkafolyamatokon keresztül valósultak meg. A távérzékelés olyan információgyűjtési eljárás, melynek során általában az elektromágneses hullámok közvetítésével egységes adatrendszert kapunk, leggyakrabban a földfelszínről. Az érzékelőműszerek, ami az esettanulmányokban egy műholdra szerelt multispektrális szenzor volt, a tárgyakról visszavert sugárzást rögzítik. A távérzékelte adatok begyűjtése után előfeldolgozáson esetenként át a beszerzett Sentinel-2 műholdprogramból származó nagyfelbontású űrfelvételek. Az előfeldolgozás célja, hogy az atmoszféra tetején rögzített képekből az atmoszféra és domborzat okozta zavaró tényezőket kiküszöbölje és elemzésre kész felvételeket vagy felvétel-idősorokat szolgáltatson. Ennek a munkafolyamatnak része az atmoszférikus korrekció, a felhő és felhőárnyék maszkolás, topográfiai normalizáció és az adathiányos területek pótlása. Az előfeldolgozott űrfelvétel-idősorok kiértékelése az esettanulmányokban adatosztályozási módszerek segítségével történt meg. A kiértékelés során tematikus térképek és geoinformatikai adatbázisok jöttek létre, melyek a faállományok egyes paramétereit tartalmazták.

A Kiértékelhető Sentinel-2 űrfelvételek vizsgálata a magyarországi erdőállományokra című esettanulmány célja a Sentinel-2 műholdprogram egy műholdja (Sentinel-2A) által készített képanyag kiértékelhetőségének vizsgálata volt. Az Országos Erdőállomány Adattárban található erdőrészlet poligonok a Sen2Cor szoftver által létrehozott felhőmaszkok alapján végzettem a vizsgálatot, és az eredményeket egy adatbázisba foglaltam. Az adatbázisból különböző tematikus térképeket állítottam elő, amelyek mutatták a kiértékelhető, teljesen felhőmentes erdőrészletek számát, valamint faállomány-típus szinten is vizsgáltam a kiértékelhető felvételek időbeli eloszlását a 2015-2017 közötti időszakban.

A Lécek detektálása Sentinel-2 űrfelvételeken a Börzsöny hegységben című esettanulmányban három különböző előfeldolgozottsági szinten vizsgáltam a Sentinel-2 felvételeket a megjelölt célra. A különböző adattípusok vizsgálata azon a feltételezésen alapult, hogy az előfeldolgozás nagy befolyással lehet a kimutatott területek méretére. A tölgyes mintaterületeken összesen 9, a bükkös mintaterületen 6 darab 2015-2016 között készült felvételből készült el az idősor. A lécek kiértékelése spektrális szétkeveréssel történt az egyes időpontokban. A feldolgozás során a hegyvidéki terület különböző megvilágítottságú részei felügyelet nélküli módszerekkel több kategóriába lettek sorolva, hogy a modellek szórása csökkenjen. A spektrális szétkeverés eredményének kiértékelése két féle módszerrel történt meg. Az egyik módszer az egyes időpontokban kimutatott lék területek leíró statisztikáit vizsgálta az idősoron. A másik módszer az egyes időpontokban a pixelen tapasztalható lék részarányokat valószínűségként vette figyelembe, majd ebből egy összesített térkép készült. A kimutatott lékterületeknek az érvényesítése légi távérzékelte anyagok és terepi mérések segítségével történt.

A Faállomány-típusok térképezése Sentinel-2 űrfelvételeken a Börzsöny hegységben című esettanulmányban a munkafolyamat része volt az űrfelvétel előfeldolgozási lánc fejlesztése. A fejlesztés keretében multitemporális felhő és felhőárnyék maszkoló algoritmus készült, ami a Kálmán-szűrő állapot vektora alapján szűri ki a felhőket, felhőárnyékokat és a párák képrészeket egy teljesen felhőmentes megfigyeléshez viszonyítva. A maszkolás után létrejött adathiányos területek pótlása adatvezérelt lineáris modellel történik az idősorban. A domborzati árnyalódás kiküszöbölésére az empirikus forgatás módszere került be az előfeldolgozási láncba. A faállomány-típusok osztályozása felügyelt osztályozási módszerekkel történt. A faállomány-típus osztályok a felsőkoronaszintben található főfajok alapján lettek kialakítva, ami a Börzsöny hegységben és szűk környezetében megtalálhatók. Az esettanulmányban a spektrális-időbeli-térbeli képjellegzetességek alapján tanított mély konvolúciós neurális hálózat típusú és spektrális-időbeli képjellegzetességek alapján tanított Random Forest osztályozó modellek teljesítményét hasonlítottam össze összesített pontosság és befektetett munka szempontjából. A modellek tanításához

használt anyagok mesterséges adatkiterjesztésen estek át, hogy a kiválasztott 12 osztályban közel egyenlő legyen a mintaszám. A spektrális jellegzetességek a Sentinel-2 10 és 20 m felbontású sávjaiból, a térbeli jellegzetességek a Multi-Resolution szegmentálás során létrejött homogén képegységekből és az időbeli jellegzetességek az egy vegetációs időszakot lefedő idősből származtak. A tematikus térkép érvényesítése terepi mérések és az Országos Erdőállomány Adattár alapján történt.

5. A kutatás eredményei, következtetések

A kutatás során a faállományok különböző paramétereit határoztam meg optikai űrfelvételekből, melyekkel modellezni lehet az állományok kiértékelhetőségét, kiterjedést és faállomány-típusát. A létrehozott módszerek nagy területekre kiterjeszhetők, de mindegyiknek megvan a felhasználási korlátja. Az esettanulmányokban létrehozott osztályozó modellek közvetlenül nem adaptálhatók más területekre, paraméterezésük eset függő. Ennek ellenére a kutatás eredményei továbblépést jelentenek a teljesen automatizált, felügyelet nélküli módszerek felé, melyek megkönnyítenék az erdőgazdálkodás hétköznapijait.

A bemutatott esettanulmányokban idősor alapú vizsgálatot végeztem, melynek segítségével az egyes felvételeken kevésbé egyértelmű információk valószínűségét lehetett megállapítani, vagy a faállományok időbeli változása közben nyújtott jellemzőit lehetett kihasználni. A felhasznált Sentinel-2 felvételek már olyan térbeli és radiometriai felbontással rendelkeznek, amelyen a faállományok legfelső koronaszintjén megjelenő árnyalások nem simulnak el, mint a korábbi hasonló célú Landsat műholdprogram felvételein. Ennek köszönhetően a hazai viszonylatban a közepes magasságú és koronaméretű faállományok olyan részletesen jelennek meg a felvételeken, hogy a faállomány szerkezetre következtetni lehet a felvételek alapján, amit korábban csak nagyon időigényes terepi vagy költséges légi felmérésekkel lehetett elvégezni.

Az űrfelvételek előfeldolgozási szintjének nagy hatása van az elemzések végső eredményén. Atmoszférikus korrekció nélküli Sentinel-2 idősorokon a lékek kimutatott mérete többszöröse lehet, mint a korrekciókon átesett felvételekből származó terület. Az előfeldolgozási lánc fejlesztése néhány százalékos javulást mutat faállomány-típusok térképezése esetén. A kutatásban fejlesztett multitemporális felhőmaszk jelentősen magasabb felhasználói pontossággal rendelkezik, mint a nyilvánosan elérhető Sen2Cor program által készített maszk.

A hazai faállományokon végzett vizsgálat alapján kijelenthető, hogy a Sentinel-2 program egy műholdja nem képes a legtöbb esetben még erdőrészlet szinten sem havonta több felhőmentes felvételt készíteni egyenletes eloszlásban. A megvizsgált faállomány-típus csoportok különböző eloszlást mutattak a kiértékelhető felvételek számában, amit részben a vertikális elterjedésük részben a levélszerkezetük határoz meg.

A koronafelületben lévő lékek detektálásához fejlesztett módszert olyan közép- és időskorú állományokban lehet alkalmazni, ahol a lékeken kívül magas a koronaszint záródása. Tölgyerdőkben lévő mesterséges lékek nyilvántartásához és különösen a változásuk vizsgálatához alkalmas módszer készült a kutatás során. Bükkösökben, ahol a természetes bolygatásoknak köszönhetően teljesen más jellegű és méretű lékek vannak, ott a terület kimutatás kevésbé megbízható, de a változások követésére alkalmas az idősor alapú módszer. A létrehozott szubpixeles felbontású lék térképek magas korrelációt mutattak tölgyerdőkben a referencia területekkel (>0.63), a bükkös erdőben az eltérő lék karakterisztika miatt alacsonyabb korreláció volt tapasztalható (0.21).

A faállomány-típusok detektálása fiatal erdőkon is alkalmazható, amennyiben már záródott a koronaszint, és nem a talajon lévő egyéb növényzet jele rögzül az űrfelvételen. A térképezés összesített pontossága 88

%-ot ért el. A mély konvolúciós neurális hálózat alapú osztályozó módszerek néhány százalékos javulást mutatnak a korábban alkalmazott más gépi tanulási modellekhez képest. Amennyiben terület alapú erdészeti szolgáltatás igénybevételéhez készül terv, mint az ápolások, tisztítások vagy gyérítések, akkor a csupán néhány százalékkal pontosabb térkép is pontosabb előzetes költségkalkulációt tesz lehetővé. Az ilyen modellek tanítása és futtatása jelentősen több számítási időt vesz igénybe, mint a hagyományos modellek. A mély konvolúciós neurális hálózat alapú osztályozáshoz a modell architektúrájának tervezésén kívül kevesebb szakértői munka elegendő, így a keretrendszerek felhasználó felületének javításával idővel a hétköznapi használatba is bekerülhetnek.

A magassági adatok bevonása a legtöbb esetben nélkülözhetetlen. Mivel az optikai űrfelvétel és a légitfotó is csak a koronafelszínt rögzíti, amiből a magassági információkat ki lehet nyerni, nincs feltétlenül szükség pontosabb légi lézeres letapogatáson alapuló magassági információkra a teljes vizsgált területre. Egyes esetekben, mint például a lékdetektáláshoz szükséges hibaszűrési küszöbértékek meghatározásához, nagyon részletes felszínmodellre van szükség. Az űrfelvételek geometriai korrekciójánál és topográfiai normalizációjánál is alkalmazhatók lennének ezek a frissebb, pontosabb magassági modellek.

A bemutatott esettanulmányok teljes reprodukálásához még nem áll rendelkezésre kereskedelmi forgalomban kapható megoldás, így alkalmazása más területeken korlátokba ütközik. A technológiai előrehaladásával ez változni fog. A doktori kutatásom ideje alatt több olyan platform született, melyek segítségével a jövőben sokkal könnyebben megismételhetővé válnak a bemutatott módszerek.

6. A kutatások legfontosabb eredményeit összefoglaló tézisek

T1: A Magyarországot fedő 2015 és 2017 készült Sentinel-2 felvételek felhőborítottságának pixel szintű vizsgálata alapján megállapítható, hogy nagyon sűrű interannuális idősor (havonta több megfigyelés) csak erdőrészlet szinten állítható össze. Minél nagyobb a vizsgált terület mérete, annál nehezebb teljesen felhőmentes vagy nagyon alacsony felhőborítású idősort összeállítani.

T2: A különböző előfeldolgozáson átesett Sentinel-2 űrfelvételek közül az atmoszférikus korrekción és topográfiai normalizáción átesett adattípus a legmegfelelőbb hegyvidéki faállományokban található lécek területének vizsgálatára és monitorozására. Az atmoszférikus és topográfiai korrekció során a refelktancia nem lineáris transzformációja olyan irányba javítja a kontraszt viszonyokat, hogy a korona felszín és az árnyalt lécek között nő a spektrális távolság. A megnövekedett különbségnek köszönhetően megnő az a tartomány a spektrális szétkeveréssel kapott lék valószínűségeken, ahol a lék és korona osztályok közötti küszöbérték elhelyezhető, így pontosabb területkimutatások készíthetők.

T3: A Sentinel-2 űrfelvétel-idősor előfeldolgozásához több szabad felhasználású alkalmazás érhető el, melyek általános felszínborítás térképezéshez nyújtanak megfelelő alapot. A kifejezetten faállományok kiértékeléséhez továbbfejlesztett előfeldolgozási lánc segítségével 5%-os pontosság javulást lehetett elérni faállomány-típusok osztályozása esetén. A fejlesztés magába foglalta a felhőmaszkok létrehozását idősor alapon, topográfiai normalizációt és az adathiányos területek pótlását adatvezérelt módon. Az adatvezérelt megoldásoknak köszönhetően más területek feldolgozásához is könnyen adaptálható a feldolgozási lánc.

T4: A Kálmán-szűrésen alapuló multitemporális felhőmaszk a vizsgált képanyagon 74%-kal jobb felhasználói pontosságot mutatott, mint a Sen2Cor szoftverben készült maszk. A fejlesztett módszer azon a jelenségen alapul, hogy a vegetációs időszakban a magas lombkorona záródású

faállományok látható kék tartományban rögzített reflektanciája igen stabil, így a kisebb mértékű kiugrások is már atmoszférikus zajt mutatnak.

T5: A Sentinel-2 űrfelvétel-idősor egyes felvételein spektrális szétkeverés segítségével előállítható pixelenként a lék-korona részarány. A lék és korona elkülönítése az idősorban azon a feltételezésen alapszik, hogy a lékeken tapasztalható reflektancia vagy jelentősen alacsonyabb, vagy jelentősen magasabb a fekvésük és méretük függvényében, mint a koronafelszín reflektanciája. Az idősorban található lék részarányokból levezethető egy valószínűségi érték, ami megmutatja, hogy milyen mértékben tekinthető léknek az adott pixel területe. A domborzat megvilágítotttsági állapotát figyelembe véve ki lehet küszöbölni a topográfiai normalizáció okozta hibákat azzal, hogy több megvilágítási kategóriára bontjuk a vizsgált területet, majd a kategóriák tematikus eredményeit a folyamat végén egyesítjük.

T6: A faállomány-típusok térképezése lehetséges olyan mély konvolúciós neurális hálózatokkal, melyek a Sentinel-2 űrfelvétel-idősor spektrális-térbeli-időbeli jellegzetességeit használják fel. A vizsgált mintaterületen 88 %-os összesített pontosságot ért el az osztályozó 12 típuson. Más gépi tanulási módszerekkel összehasonlítva a mély konvolúciós neurális hálózat típusú osztályozóval kevesebb befektetett élómunkával lehet hasonló vagy jobb eredményeket elérni faállomány-típusok térképezésénél.

7. Az értekezés témakörében készült publikációk

Lektorált folyóiratcikkek:

BARTON I., KIRÁLY G., CZIMBER K., HOLLAUS M., PFEIFER N.: Treefall Gap Mapping Using Sentinel-2 Images; *FORESTS 8: Paper 426. 27 p. (2017)*

MOKROŠ M., VÝBOŠŤOK J., MERGANIČ J., HOLLAUS M., BARTON I., KOREŇ M., TOMAŠTÍK J., ČERŇAVA J.: Early stage forest windthrow estimation based on unmanned aircraft system imagery; *Forests 8:(9) Paper 306. 17 p. (2017)*

BARTON I., KIRÁLY G., CZIMBER K.: Lékek kimutatása Sentinel-2A űrfelvételidősorok alapján tölgyerdőben; *Geomatikai Közlemények / Publications in Geomatics XX: 1 pp. 87-97., 10 p.*

BARTON I., CZIMBER K., KIRÁLY G., MOSKAL L. M.: Konzisztens Sentinel-2 űrfelvétel-idősor készítése erdőterületek kiértékeléséhez *Geomatikai Közlemények / Publications in Geomatics XXII. pp. 65-76., 12 p. (2019)*

Konferencia kiadványban megjelent cikkek:

BARTON I., CZIMBER K., KIRÁLY G.: Sopron 182B erdőrészlet (Roth féleszálaló erdő) korona és újulat térképezése távérzékelési módszerekkel; *In: Bidló, A; Facskó, F (szerk.) V. Kari Tudományos Konferencia - Nyugat-magyarországi Egyetem Erdőmérnöki Kar; Sopron, Magyarország : Nyugat-magyarországi Egyetem Kiadó, (2015) pp. 61-65., 4 p.*

BARTON I., KIRÁLY G., CZIMBER K.: Sentinel-2A űrfelvétel-idősorozatok sűrűség vizsgálata az országos erdőállományra; *In: Bidló, A; Facskó, F (szerk.) Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar VI. Kari Tudományos Konferencia; Sopron, Magyarország: Soproni Egyetem Kiadó, (2018) pp. 123-127., 5 p.*

BARTON I., KIRÁLY G., CZIMBER K.: Képfeldolgozó program fejlesztése nagy mennyiségű földmegfigyelési adat feldolgozásához és kiértékeléséhez; *In: Bidló, A; Facskó, F (szerk.) Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar VI. Kari Tudományos Konferencia; Sopron, Magyarország: Soproni Egyetem Kiadó (2017) pp. 164-167., 4 p.*

KIRÁLY G., BALLA C., BARTON I., MÉSZÁROS G., PETRÁNYI B., SZABÓ K.: Borított felszínmodellek erdészeti felhasználása; In: *Bidló, A; Facskó, F (szerk.) Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar VI. Kari Tudományos Konferencia; Sopron, Magyarország: Soproni Egyetem Kiadó (2018) 266 p. pp. 118-122., 5 p.*

BARTON I., CZIMBER K., KIRÁLY G., MOSKAL L. M.: Faállomány-típusok térképezése Sentinel-2 űrfelvétel időszorozaton Deep learning osztályozóval; In: *Király, Gergely; Facskó, Ferenc (szerk.) Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar VII. Kari Tudományos Konferencia: konferencia kiadvány; Sopron, Magyarország: Soproni Egyetem Kiadó, (2019) pp. 41-47., 7 p.*

BARTON I.: Faállomány-szerkezet vizsgálat a Szigetközben a koronafelszín változatossága alapján Sentinel-2 űrfelvételeken; In: *Gribovszki et al.(szerk) Jankó Sándor Emlékkülés 2019 konferencia kiadvány; Sopron, Magyarország: Soproni Egyetem Kiadó, (2019) pp. 29-34., 5 p.*

Könyv, könyvrészlet:

TANÁCS E., BARTON I., BELÉNYESI M., BURAI P., CZIMBER K., KIRÁLY G., KRISTÓF D.: Távérzékelte adattípusok felhasználásának lehetőségei az erdőállapot-értékelésben; In: *Standovár Tibor, Bán Miklós, Kézdy Pál (szerk.); Erdőállapot-értékelés középhegységi erdeinkben. 612 p. Budapest: Duna-Ipoly Nemzeti Park Igazgatóság, 2017. pp. 37-107.; (Rosalia; 9.) (ISBN:978 615 5241 20 8)*

Szóbeli előadások:

BARTON I., CZIMBER K., KIRÁLY G.: A Sopron 182/B erdőrészlet (Roth féle száraló erdő) korona és újulat térképezése távérzékelési módszerekkel; *Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar: V. Kari Tudományos Konferencia; Sopron, 2015.10.21.*

BARTON I., BROLLY G., CZIMBER K., KIRÁLY G.: 3D GIS tool for visualization and analyze of detailed forest inventory data; *Young Scientist Days on Forestry (YSDoF); Krakow, Poland, 2016.09.15-16.*

BARTON I., KIRÁLY G.: Satellite based monitoring system for observing natural forest dynamic in the fragments of virgin forest of Carpathian region, *4th Forum Carpathicum Future of the Carpathians: Smart, Sustainable, Inclusive; Bucharest, Romania, 2016.09.28-30.*

BARTON I., KIRÁLY G., CZIMBER K.: Sentinel-2A űrfelvétel-időszorozat sűrűség vizsgálata az országos erdőállományra; *Soproni Egyetem Erdőmérnöki VI. Kari Tudományos Konferencia; Sopron, 2017.10.24.*

BARTON I., CZIMBER K., KIRÁLY G., MOSKAL L. M.: Konzisztens Sentinel-2 űrfelvétel időszorozat készítése erdőterületek kiértékeléséhez; *XI. Geomatika Szeminárium; Sopron, 2018.11.8-9.*

BARTON I., CZIMBER K., KIRÁLY G., MOSKAL L. M.: Faállomány-típusok térképezése Sentinel-2 űrfelvétel időszorozaton Deep learning osztályozóval; *Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar VII. Kari Tudományos Konferencia; Sopron, 2019.02.12.*

BARTON I.: Faállomány-szerkezet vizsgálat a Szigetközben a koronafelszín változatossága alapján Sentinel-2 űrfelvételeken; *Soproni Egyetem: Jankó Sándor Emlékkülés 2019; Sopron, 2019.06.13*

Poszter prezentációk:

KIRÁLY G., BARTON I.: Pilóta-nélküli repülő, és az általuk készített felvételek felhasználása az erdészeti gyakorlatban, különös tekintettel a folyamatos erdő- borításra; *Nyugat-magyarországi Egyetem, Erdőmérnöki Kar: V. Kari Tudományos Konferencia; Sopron, 2015.10.21.*

- BARTON I., KIRÁLY G.:** Monitoring system for natural forest dynamic in the fragments of virgin forest of Carpathian region, *ESA Living Planet Symposium 2016; Prague, Czech Republic, 2016.05.09-13.*
- BARTON I., KIRÁLY G.:** Capturing the dynamics in the fragments of virgin forest of Carpathian region using dense satellite image time series; *6th EARSeL SIG LU/LC & 2nd EARSeL LULC/NASA LCLUC Workshop; Prague, Czech Republic, 2016.05.06-07.*
- BARTON I., KIRÁLY G.:** Monitoring system for natural forest dynamic in the fragments of virgin forest of Carpathian region; *SCERIN-4 Capacity Building Workshop (CBW); Zvolen, Slovakia, 2016.07.18-21.*
- BARTON I., KIRÁLY G.:** Monitoring system for natural forest dynamic in the fragments of virgin forest of Carpathian region; *ESA 8th EO Summer School, Frascati, Italy, 2016.08.01-12.*
- BARTON I., KIRÁLY G., CZIMBER K.:** Műholdas változásvizsgálat hatékonyságának növelése erdőkön árnyékmodellezéssel; *X. Geomatika Szeminárium; Sopron, 2016.11.10-11.*
- BARTON I., KIRÁLY G., CZIMBER K., HOLLAUS M., PFEIFER N.:** Treefall gap mapping on Sentinel-2A images; *SCERIN-5 Capacity Building Workshop (CBW); Pécs; 2017.06.13.*
- BARTON I., KIRÁLY G., CZIMBER K., HOLLAUS M., PFEIFER N.:** Kartierung der Löcher im Blätterdach mit Sentinel-2A Bilder; *Angewandte Geoinformatik (AGIT) Symposium 2017; Salzburg, Austria, 2017.07.05.-07.*
- BARTON I., KIRÁLY G., CZIMBER K.:** Képfeldolgozó program fejlesztése nagy mennyiségű földmegfigyelési adat feldolgozásához és kiértékeléséhez; *Soproni Egyetem Erdőmérnöki Kar VI. Kari Tudományos Konferencia; Sopron 2017.10.24.*
- LENDZIOCH T., LANGHAMMER J., BARTON I.:** Using Landsat time series for attributing forest disturbance dynamics in Sumava National Park, Czech Republic; *European Geosciences Union (EGU) General Assembly 2018; Vienna, Austria, 2018.04.08.*
- BARTON I., CZIMBER K.:** Multiresolution image segmentation algorithm development for Sentinel-2 satellite imagery; *University of Washington GIS Symposium; Seattle, USA 2018.05.17.*