

DOKTORI (PhD) ÉRTEKEZÉS TÉZISEI

VARGA ZSÓFIA

**BUDAPEST
2022**



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

**A terepi távérzékelés és a roncsolásmentes növényvizsgálatok fejlesztési
lehetőségei**

Varga Zsófia

Budapest

2022

A DOKTORI ISKOLA:

megnevezése: Kertészettudományi Doktori Iskola

tudományága: Növénytermesztési és kertészeti tudományok

vezetője: Zámboriné Dr. Németh Éva,
egyetemi tanár, DSc
MATE, Kertészettudományi Intézet,
Gyógy- és Aromanövények Tanszék

Témavezetők: Dr. Jung András
habilitált egyetemi docens, PhD
ELTE IK Térképtudományi és Geoinformatikai Intézet

.....
Az iskolavezető jóváhagyása

.....
A témavezető jóváhagyása

I. A MUNKA ELŐZMÉNYEI, CÉLKITŰZÉSEK

A távérzékelő szenzorok fejlődésével a csökkenő szenzorméret mellett fokozatosan javul a spektrális és térbeli felbontás, melyek lehetővé teszik a terepi távérzékelési módszerek sokoldalú fejlesztését. Ennek eredményei pedig közvetlenül hasznosíthatók a precíziós gazdálkodással kapcsolatos növényvédelmi és tápanyagellátási kutatási területeken, illetve az Agrárium 5.0 fejlesztéseihez kapcsolódhat, mint például az önvezető és autonóm működést támogató technológiák, a döntéstámogató beavatkozások, vagy a beágyazott, automatizációt segítő rendszerek.

A spektrális adatokra építő műszaki megoldások kutatása a kertészeti szabadföldi és üvegházi gyakorlatot segítheti. Az olyan új műszaki berendezések, mint például a szabályozható LED rendszerek felhívták a figyelmet a fénnel kapcsolatos növénybiológiai kutatások fontosságára. A fény spektrális szabályozásának lehetősége egységes módszertant és megközelítést igényel a fény leírása során, miközben a gyakorlati megközelítés számos eltérő rendszert, mérőszámot használ, és a középpontban nem a növény fényigényei állnak.

A terepi távérzékelés leggyakrabban alkalmazott eszköze a spektrométer. A mérési módszerek fejlesztése során fokozatosan előtérbe kerülnek az automatizált rendszerekbe történő integrálás. Ezen rendszerek növekvő adatgyűjtési igényét a spektrométerek mellett új távérzékelési eszközhordozók, többek között drónok is segítik. Ezáltal egyre nagyobb területről van lehetőség akár napi szinten folyamatos monitoring adatokat gyűjteni.

A spektrális adatok bekapcsolása a döntéstámogatási rendszerekbe fokozatosan növekvő globális igény. Ennek érdekében az elsődleges feladat a közel valós idejű adatfeldolgozás elérése. A növekvő szenzorfelbontás, a gyors adatrögzítés, valamint a multiszenzoros érzékelés egyre nagyobb adatmennyiséget generál, amely újabb fejlesztési területeket nyit az adatfeldolgozással kapcsolatban. Értekezésemben a spektrométer adatgyűjtési módszereire építő műszaki fejlesztések vizsgálatával foglalkozom, összehasonlítva eltérő szenzorok megoldásaival a spektrális adatgyűjtés pontosságát, valamint a közel valós idejű beavatkozások során a spektrális adatfeldolgozás gyakrabban használt algoritmusait.

Doktori értekezésemben az alábbi célkitűzéseket fogalmaztam meg:

1. Célom a spektrométerrel történő mérési módszertant kiegészítő eszközök prototípusainak fejlesztése, valamint ezek alkalmazása mellett két kereskedelmi forgalomban lévő spektrométer pontosságának értékelése.
2. Célom vizsgálatokkal igazolni, hogy a spektrális adatok megfelelő pontosság mellett képesek-e kiváltani saláta (*Lactuca sativa* L.) klorofill-tartalom meghatározásának terepi, SPAD méter méréseit.
3. Célom feltárni a jelenleg elterjedt globális sugázmérés, luxmérés és PAR mérés ellentmondásait az új LED világítástechnikai rendszerek szabályozásának támogatási céljából, valamint célom létrehozni egy növényérzékelés központú, fényparaméterek optimalizálásához felhasználható, az adatvezérelt programozást támogató vezérlőtáblát.
4. Célom összehasonlítani a spektrális adatok és a víz és a nitrogén beltartalmi paraméterek közötti korrelációit és indexeit, valamint létrehozni ennek automatizálását segítő vezérlőtáblát.
5. Célom összehasonlítani a drónokon alkalmazott multispektrális kamerák eredményeinek spektrális pontosságát és napszakon belüli eltéréseit a spektrométerrel mért eredmények spektrális pontosságával és napszakon belüli eltéréseivel.
6. Célom összehasonlítani a drónokon alkalmazott multispektrális kamerák eredményeinek spektrális pontosságát a műholdas távérzékelés spektrális pontosságával.
7. Célom meghatározni a spektrális képi adatfeldolgozás algoritmusainak pontosságát, illetve futtatási idejét a közel valós idejű adatfeldolgozás szempontjából.

II. ANYAG ÉS MÓDSZER

2.1. Passzív terepi spektrométerek terepi mérési módszertanának támogatása

2.1.1. Prototípus klipsz mérőfej és állvány tervezése és kivitelezése

Egy állítható állványrendszert terveztem a Qmini spektrométer méretei alapján, mely segíti a szenzor fix távolságokban és szögben tartását a terepen. Az állvány egy szenzortartó kialakításból áll, mely 45 fokos szögben tartja a szenzort. A

szenzortartó 360 fokban képes az elfordulásra, és csúsztathatóan eltérő magasságokban is rögzíthető a két méretben rendelkezésre álló rúdra, mely egy stabilitást biztosító talprészhez csatlakozik.

Egy félgömb alakú mérőfejet terveztem AUTOCAD 2021 szoftverben, majd Creality Ender 3D nyomtatóval, ABS filament anyagból legyártottam. A mérőfej mérési terét bárium-szulfát festékkel vontam be. Fényforrásának G4 foglalatú mikroszkóp lámpát használtam, melynek foglalatát a mérőfej külsején lehet rögzíteni. Áramforrásként egy Parrot drón lítium-polimer akkumulátort és egy megszakító kapcsolót csatlakoztattam. A szenzor csatlakoztatásának céljából 2 bemeneti lehetőséget terveztem, egyet a transzmittancia mérések céljából a fényforrással szemben, 180 fokban, másikat a fényforrás oldalán 45 fokos szögállásban.

2.1.2. Spektroradiométerek összehasonlító mérései

A méréseket 2017. nyarán a Hajós-Bajai borvidéken, Borotán, a Koch Borászatban végeztem. 100 mintát ugyanazon ponton, egymás után felvételezve két spektroradiométer rendszerrel (*ASD Fieldspec2* spektroradiométer *Plant Probe* mérőfejjel; *Qmini* spektroradiométer a prototípus mérőfejjel). A statisztikai értékelést a feltételvizsgálatokat követően egytényezős varianciaanalízissel értékeltem (*Excel*), összehasonlítva a két rendszer pontosságát. Emellett megvizsgáltam a mérések során jellemző REP (Red Edge Point) értékeket, mivel ezen pont számos spektrális index alapját jelenti. Az értékeléseket a könnyebb összehasonlíthatóság miatt az értékek eltéréseinek átlagával és százalékos alakulásával jellemeztem.

2.2. Eltérő megvilágítási környezet mellett végzett vizsgálatok

2.2.1. Összehasonlító mérések Konica Minolta SPAD 502 mérőrendszerrel

A klorofill vizsgálat céljából három növénynevelő sátrat alakítottam ki, amelyben sátranként 20-20-20 db salátanövényt (*Lactuca sativa L.*) neveltem. A kísérleti környezetet mesterséges közetgyapot kockákban nevelve, ugyanazon tápoldat koncentrációt biztosítva, a klimatikus paramétereket állandósága mellett, megegyező világítási hosszt beállítva alakítottam ki. Eltérés egyedül a megvilágításban volt, így két sátorban nagyteljesítményű LED rendszerek biztosították a fényt (egy *KIND LED K5* panel és egy *Tungsrasm Research Modul*,

50% teljesítmény mellett), míg a harmadik esetben egy HPS rendszert (*Sylvania Grolux 600W*) alkalmaztam.

A SPAD mérésekhez a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem, Kertészeti Intézet, Zöldség- és Gombatermesztési Tanszék *Konica Minolta 502* SPAD készülékét használtam. Saláta növényenként 3-3 levelet mértem meg, mindkét szenzorrendszerrel háromszori ismételtsben. Végeredményül sátranként 58 db mérési adatot gyűjtöttem. A három sátorra vonatkoztatva mindösszesen 174 átlagolt adat adódott, melyből a további elemzés során 165-öt elemeztem. A vizsgált levelek összes klorofill tartalmát acetonos kivonást követően spektrofotometriásan adott hullámhosszokon mennyiségileg meghatároztam. A kivonást követően a szűrletet üveg küvettába töltöttem, majd az aceton vak mintával szemben mértem az abszorbanciát $\lambda=661,6$; $\lambda=644,8$; $\lambda=470\text{nm}$ -en, Helios-alpha spektrofotométerrel. Számítás: $Cl_a (\mu\text{g}/\text{mg}) = 11,24 \cdot A_{661.6} - 2,04 \cdot A_{644.8}$, $Cl_b (\mu\text{g}/\text{mg}) = 20,13 \cdot A_{644.8} - 4,19 \cdot A_{661.6}$, $C(x+c) (\mu\text{g}/\text{mg}) = (1000 \cdot A_{470} - 1,90 \cdot C_a - 63,14 \cdot C_b) / 214$. A méréseket 5 párhuzamos ismételtsben végeztem. Az analitikai mérésekkel meghatározott klorofill tartalmat vetettem össze a SPAD értékekkel, illetve a mért adataimból képzett spektrális indexek eredményeivel, párosított t-próbával vizsgáltam az eredményeket.

2.2.2. A világítási rendszerek szabályozását és a spektrális adatokból kiinduló fényparaméterek megadását segítő vezérlőtábla létrehozása

Munkám során bemutattam a globálsugárzásmérő piranométerek, a PAR tartományt mérő kvantumszenzorok, és a megvilágítás erősségét mérő luxmérők műszaki megközelítéseit, a gyakorlati oldalról használt mérőrendszerek érzékenységét és az adott megoldáshoz köthető fénytani paraméterek jellemzőit.

Gueymard 2004-es tanulmányában leírt napsugárzási adatokból kiindulva egy modellben egyesítettem a fizikai egyenleteket, melyek a Planck törvényből kiindulva a fotometriai egyenletekig terjedtek. Mivel adott mérőrendszer használja a *CIE S010/E:2004* szabványban rögzített fotopikus látás ($V(\lambda)$) görbét, így ezzel a modellben is korrigáltam a megfelelő értékeket. Emellett feldolgoztam az eltérő mérőrendszerek mérési érzékenységének jellemzőit. Ezek alapján bemutattam az eltéréseket.

A modell egyenleteit továbbfejlesztettem, hogy a tábla bármely spektrális mérés alapján automatikusan átszámolja és ábrázolja az aktuális fénytani paramétereket. Illetve új elemként a klorofill a és b elnyelési görbéje alapján is súlyozza a spektrális eredményeket. A fotonfluxust pedig a PAR tartomány mellett 380-700 nm és 380-750 nm között is megadja. Zárótábláján pedig egy referencia spektrummal veti össze a mért eredményeket, kijelezve hullámhosszak szerint bontva az eltéréseket.

A vezérlőtábla működését többféle világítási rendszer mérésén keresztül mutattam be. Egyúttal vizsgálva két nagyteljesítményű LED rendszer (*KIND LED K5* és *Tungsrham Research Modul*), egy fitotronban elhelyezett világítási rendszer (*SANYO*), egy HPS rendszer (*Sylvania GroLux*), illetve a Nap spektrális adatait mérve a fénytani paraméterek alakulását.

2.2.3. Beltartalmi paraméterek vizsgálata spektrális értékek alapján

2.2.3.1. Növényi vízstressz spektrométeres detektálása

A távérzékelési indexek és spektrális adatok vízstressz detektálásának értékelése céljából két növénynevelő sátrat alakítottam ki, a fényforrásban (*Tungsrham Research Modul*) is egységes volt a két kialakítás. A sátrakban paprika (*Capsicum annum L.*) növényeket neveltem kőzetgyapot kockákon, sátranként 25-25 egyeddel. Az első hónapban mindkét sátorban ugyanolyan mennyiségű öntözést és a második héttől kezdett tápoldat-adagolást (*Wuxal Super*) alkalmaztam. A második hónaptól kezdve a második sátorban nevelt növények vízutánpótlását a felére állítottam be.

Egy hónap elteltével végeztem el a spektrális méréseket háromszori ismétlésben a prototípus mérőfejet alkalmazva. Majd analitikai laboratóriumban megmértem a vizsgált levelek relatív víztartalmát, és ezen értékeket vetettem össze a spektrális adatokkal. Többféle spektrális vízindex korrelációját vizsgálva az analitikai vizsgálati eredményekkel.

2.2.3.2. Növényi nitrogén-ellátottság detektálása spektrométeres

A korábbi megközelítéshez hasonlóan két külön növénynevelő sátrat alakítottam ki, ugyanazon LED fényforrás használata mellett. Bazsalikomot (*Ocimum basilicum L.*) és salátát (*Lactuca sativa L.*), mindkét fajtából 25 – 25 palántát neveltem kőzetgyapotkockán.

A nitrogén adagolásának a vizsgálata céljából 5 féle kezelést alkalmaztam. Minkét fajnak a számára megfelelő tápoldat (*Wuxal Super*) mennyiséget előre meghatároztam, majd 0,5 ml/l-es koncentrációs mennyiséggel „hígítási sorozatot” alakítottam ki úgy, hogy a 3. mintaszámot kapott növények kapták az optimális mennyiséget, az 1., 2. mintaszám ehhez képest 1 és 0,5 ml/l-rel kevesebbet, míg a 4. és 5. mintaszámú minta 0,5 és 1 ml/l-rel nagyobb koncentrációs mennyiséget kapott a 2. héttől kezdve. Így eltérő nitrogén adagolást kialakítva vizsgáltam a spektrális indexek nitrogénnel szembeni korrelációját.

A spektrális méréseket a kezelés megkezdése utáni első hónapban végeztem, minden növényen három mintalevelet háromszori ismétlésben mérve. A nitrogéntartalmat a szárazanyag tartalom százalékában analitikai laboratóriumban mértem meg és ezzel vettem össze a spektrális indexeket.

2.2.3.3. Spektrális indexek adatfeldolgozását segítő megoldások kialakítása

Mivel a spektrális indexek számos távérzékelési adatfeldolgozást segítenek, automatizációs szempontból egyszerűsítik a nagy adatállományokat, viszont kiszámolásuk időigényes lehet, ezért két segédállományt készítettem, amelynek az volt a célja, hogy gyorsítsa a spektrális indexek megadását a későbbi elemzések céljából.

Egyik irányból a terepi spektrométeres mérések esetén egy számológépet hoztam létre, mely a későbbi munkalapjain a beolvasott mért értékekből automatikusan megadja a fontosabb víz indexeket, a fontosabb nitrogén indexeket, a korábbiakban látott klorofill indexeket, valamint előállítja a spektrális adatok elsőrendű derivált értékeit, kalkulálja a RedEdge tartomány minimum és maximum értékét, inflexiós pontját és meredekségét. Amennyiben az analitikai mérések is rendelkezésre állnak, úgy kialakítottam ezen adatok bevitelére is egy munkalapot, melyekkel minden munkalap párjaként vizsgálja az indexek korrelációját, és megadja az alapstatisztikára vonatkozó értékeket. Több, mint 50 spektrális index kalkulációját és adott esetben korrelációját végzi el egyszerre.

A képi adatok feldolgozását segítő megoldásként, a QGIS nyílt forráskódú rendszerének használatához készítettem egy *JavaScript* kódot, melyet a megfelelő helyi könyvtárba másolva a program 'Raster calculator' algoritmusába épül. Használata során az összes indexet egy legördülő menüben megjeleníti a felhasználó

számára, ezután bekéri a szükséges csatornákat és egyéb művelet nélkül legenerálja a kért index szerinti réteget. Ebbe összesen 20 spektrális indexet vittem fel, így mások számára is gyorsíthatóvá válik ezen feldolgozási lépés.

2.3. Új eszközhordozó rendszereken (UAV) alkalmazott multispektrális érzékelők összehasonlítása és adatfeldolgozási oldalról történő vizsgálata

Összehasonlító elemzéssel távérzékelési szempontból vizsgáltam az új eszközhordozó rendszereken (drónok) hordozott multispektrális kamerák pontosságát összevetve mind a műholdas távérzékelés pontosságával, mind a spektrométeres mérések eredményeivel.

2.3.1. Drónokon alkalmazott multispektrális kamera mérési eredményének összehasonlítása a spektrométeres mérési eredményekkel

A spektrométeres mérési eredményekkel történő összehasonlításhoz a Harvard Dataverse Wageningen Egyetem mérési adatbázisának nyers adatait használtam. Az adatbázisból a *Sequoia* kamera állományait vettem össze két kereskedelmi forgalomban lévő spektrométer (*Cropscan*, *Tec5 Handyspec*) reflektancia mérési eredményeivel. A vizsgálat során egyidőben, napon belül 7:25 és 20:00 között, 9 eltérő időpontban végezték el a méréseket, felvételezve két burgonya területet, két búzaterületet, egy árpa területet, a nyílt talajfelszínt, illetve több helyszínen, különböző méretű kalibrációs lapokat. Minden mérést mindkét spektrométerrel és a drónon hordozott *Sequoia* kamerával is egyszerre mérve.

Mivel távérzékelési oldalról vizsgálva a drónokon alkalmazott multispektrális kamerák kevesebb kalibrációt végeznek a gyakorlatban ezért különösen fontos a két módszertan pontosság szempontjából történő összevetése.

A nyers adatokat előfeldolgoztam, a képi állományból a mérési pontokra kinyertem a reflektancia értékeket, majd csatornánként varianciaanalízissel vizsgáltam az eltéréseket, összevetve a napszak esetleges hatásait a pontosságra.

2.3.2. Drónokon alkalmazott multispektrális kamera mérési eredményének összehasonlítása a műholdas távérzékelés mérési eredményeivel

A vizsgálathoz egy *Micasense Altum* hat csatornás multispektrális kamera mérési eredményeit használtam fel. A mérést 2021. 09. 08-án végeztem egy *DJI Matrice 210 RTK* drónnal, a Tisza-tó Sporthorgász területén. A teljes felmért terület

25,5 ha volt, a mérést 70 méteres magasságban végezve az elkészült képeket 1,6 cm-es térbeli felbontás jellemezte.

A vizsgált növényborítási osztályok az alábbiak szerint alakultak: 1. osztály - sulyom (*Trapa natans*), 2. osztály - nád (*Phragmites australis*), 3. osztály - gyékény (*Typha angustifolia*), 4. osztály - víz felszín, 5. osztály - tündérrózsa (*Nymphaea alba*) és a 6. osztály - sás (*Carex acutiformis*). Az ellenőrzött osztályozás betanítása során ezen referenciaréteg 60% használtuk validációként.

A műholdas távérzékeléssel történő összehasonlítás céljából ugyanezen időpontra, ugyanezen területre vonatkozó *Sentinel-2 MSI2A* műholdképet dolgoztam fel. Illetve mivel a *Micasense Altum* egy termális csatornát is felvételez, ezért ennek vizsgálatának céljából egy *Landsat-8* műholdkép termális felvételét is bevontam az elemzésbe. Mindkét műholdképet és a *Micasense Altum* felvételeit előfeldolgoztam, majd ugyanazon területek betanítása után az ellenőrzött képosztályozási algoritmusokat futtatva, az eredményeket pontossági elemzéssel vizsgáltam és hasonlítottam össze.

A spektrális adatok elemzésének céljából 150 pontot jelöltem ki a területen, minden osztályon belül 25-25 ponttal. Az egyező csatornák esetén ezekre kigyűjtöttem a mért reflektancia értékeket, osztályonként átlagoltam és a varianciát vizsgáltam.

2.3.3. Képfeldolgozási algoritmusok értékelése a közel valós idejű adatfeldolgozás szempontjából

Az előző pontban bemutatott *Micasense Altum*-mal felvételezett adatállomány jellemzői: 6 x 940 db kép, az előfeldolgozás után 6 x 1,56 GB egycsatornás ortomozaikolt kép, 6 csatornás képként 10 GB, 5 csatornás változat esetén 8 GB az eredmény fájl mérete, amely több, mint 620 millió pixel adatpontot tartalmaz csatornánként.

Az adatállomány előfeldolgozás után az alábbi képosztályozási módszereket vizsgáltam az 5 csatornás képen futtatva. A nem ellenőrzött klaszterezést (ISODATA módszerrel), az ellenőrzött képosztályozás közül a legkisebb távolság (MD), a legnagyobb hasonlóság (ML) és a spektrális szög (SAM) algoritmusait, a gépi tanulás megoldásai közül a Random Forest (RF), a mesterséges neurális háló modelljét

(ANN) és az Support Vector Machine (SVM) modelljét, illetve a mélytanulás esetén a konvolúciós neurális háló (CNN) modellt.

A közel valós idejű automatizációt segítő megoldás szempontjából 2 gépi konfigurációt alakítottam ki egy 4 GB, illetve egy 8 GB DRAM kapacitással, mivel ezen jellemzők állnak a legközelebb az automatizáció során használt mikroszámítógép egységekhez. Ezeken párhuzamosan futtattam az algoritmusokat vizsgálva futtatási idejüket. Pontosság elemzés céljából egy referencia réteget hoztam létre a terepi bejárás eredményei alapján, ezzel összevetve vizsgáltam a pontossági %-ot, a Kappa indexet, illetve keresztklasszifikációval a helyes és helytelen pixelek területi arányát.

A felsorolt algoritmusok mellett megvizsgáltam a PCA elemzés lehetőségét, ennek futtatási jellemzőit és pontosságát. Illetve egy Python-ra épülő döntési fa kialakítás mellett futtatott osztályozási lehetőséget. A vizsgálathoz a QGIS szoftver SCP és ORFEO plugin-jét használtam.

III. EREDMÉNYEK

3.1. Terepi alkalmazás fejlesztés eredménye és összehasonlító eredményei

3.1.1. Az elkészült prototípus végleges verziója

A prototípus mérőfej, aktív szenzorral alakítva műszerünket, gyorsítja a terepi mérést. A mérőfej félgömb kialakítása ötvözi a diffúz spektroszkópia megközelítéseit. Hasonló kialakítást nem találunk jelenleg a piacon.



1. ábra – Tervezett prototípusok képe, balra a mérőállvány, középen a mérőfej továbbfejlesztett modellképe, jobbra az elkészült verzió

Az állvány révén 360°-os állítható elfordulás mellett fix 45°-os szögben, regisztrálható és állítható magasságban képesek vagyunk mérni. A prototípus végleges verziójában a mérőfej kapott egy alátámasztást, mely révén könnyebben rögzíthető a fényforrás. Cserélhetővé téve a mérőfejet többféle egyéb kialakításban is

tovább lehet fejleszteni (például bogyós termékek vizsgálatának céljából). A műszaki modell elérésével bárki reprodukálhatja és továbbfejlesztheti.

3.1.2. Összehasonlító mérések ASD Fieldspec 2 Plant Probe mérőrendszerrel

A mérésekre jellemző REP (Red Edge Point) értékeket eltérését összesítve az 1. táblázatban láthatjuk.

1. táblázat - ASD Fieldspec 2 és Qmini méréseinek REP-re vonatkozó összehasonlítása

REP átlag - klipsz (nm)	Eltérések átlaga	Eltérések a REP átlag százalékában (%):
718,005	1,118	0,156
REP átlag - ASD (nm)		
718,156		

Az eredmények alapján megállapítható, hogy a két műszermegoldás megfelelő pontossággal helyettesíti egymást. Eszerint az általunk tervezett és gyártott klipsz megfelelő pontossággal rendelkezik a terepi vizsgálatokhoz.

3.2. Eltérő megvilágítási környezetben végzett vizsgálatok eredményei

3.2.1. A Konica Minolta SPAD 502 mérőrendszerrel végzett összehasonlító mérések eredményei

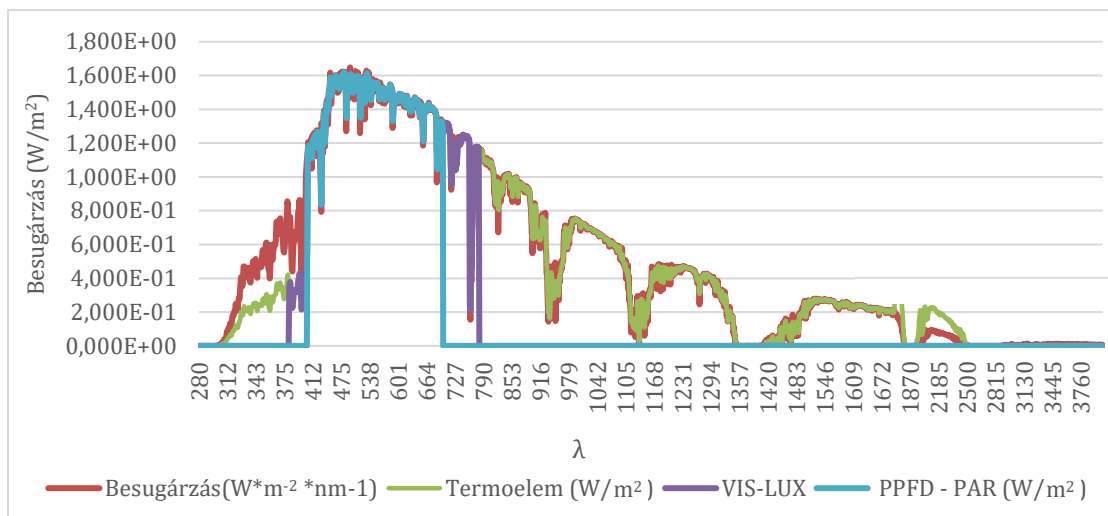
2.táblázat - Klorofill indexek mérőfejjel mért értékeinek, illetve a SPAD méter adatainak kétmintás t-próbával történő statisztikai összevetése a laboreredményekkel (kivonat a korrelációs és szórásra vonatkozó eredményekre)

	Várható érték	Szórás	Mintasám	Pearson-féle korreláció	R ²
Klorofill a+b	33,85	495,88	165		
CI _{green}	2,39	1,06	165	0,94	0,88
MTCI	0,17	0,02	165	0,99	0,97
MCARI	0,36	0,05	165	-0,83	0,69
NDVI	0,78	0,004	165	0,58	0,33
MCARI2	0,63	0,28	165	0,98	0,97
CCI	12,84	165,64	165	0,92	0,85
CI _{rededge}	0,15	0,014	165	0,99	0,97
SPAD	32,52	164,59	165	0,96	0,93

A statisztikai elemzés szignifikáns ($\alpha=0,05$) és szoros korrelációt mutatott az analitikai összes klorofill tartalom és a klorofill előrejelző indexek között. A legjobb klorofill előrejelző indexnek a CI_{rededge} index bizonyult ($R=0,99$), míg szorosan követi az MTCI ($R=0,98$), illetve az MCARI ($R=0,98$). Ezen három index magasabb korrelációt ért el a SPAD méter által detektált értékeknél, azaz pontosabban előre tudják jelezni a klorofill összmenyiségét. Ezáltal azt is bizonyítottam, hogy a spektrométer mérés képes helyettesíteni a SPAD métereket.

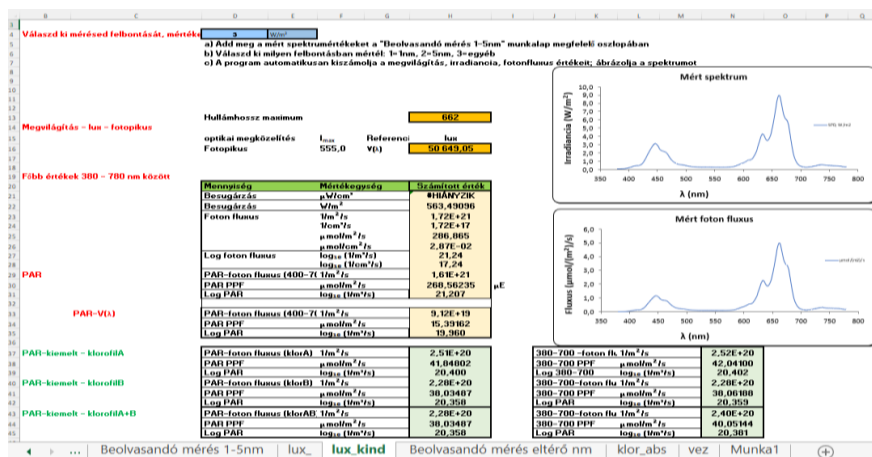
3.2.2. A fénytani paraméterek spektrális adatokból történő megadása

Az eltérő rendszer érzékenységet és adott súlyozási megoldását szemléltetve az 2. ábrán mutatom be a Nap mérésen az alapvető különbségeket



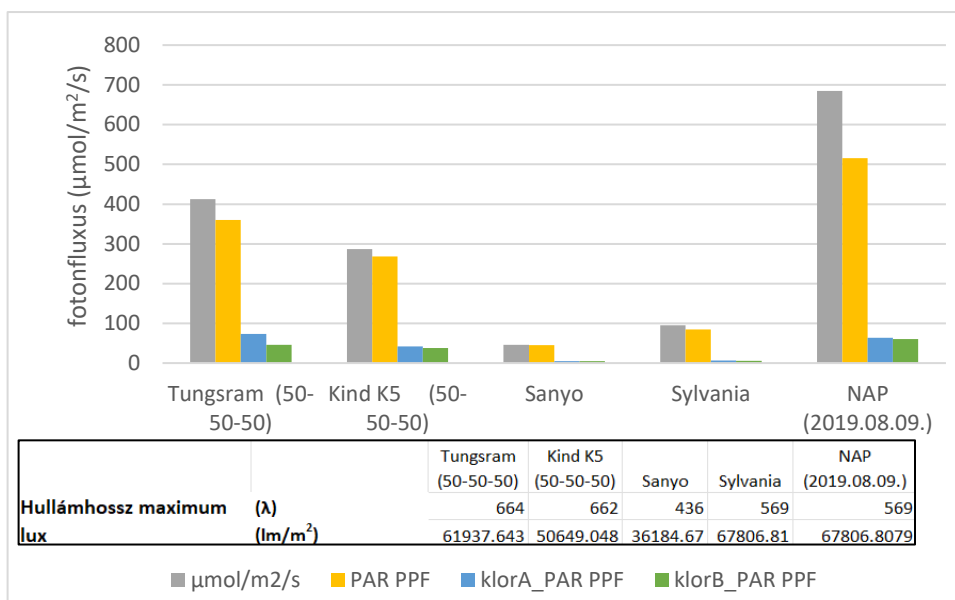
2.ábra - Nap mérésén modellezett eltérő szenzorérzékenységek

A mérési felbontás megválasztható a felhasználó számára. A modell megadja a spektrális adatok alapján kalkulált maximális hullámhosszt, a teljes besugárzást (W/m^2), a PAR PPF fotonfluxus ($\mu mol/m^2/s$) értékét, a számított lux (lm/m^2) értéket. Mivel a fotonfluxus sűrűség csak helyben, adott távolság mellett kalkulálható, így egy logaritmus megközelítéssel helyettesítettem ezen értékek kalkulációját, majd a klorofill abszorpció szerint súlyozva is kijelzi ugyanezen értékeket. Minden kalkulációt először egy bővített tartományra (380-780 nm között) számítja ki a rendszer, majd szűkíti. A vezérlőtábla eredményfelületének képe a 3. ábrán látható.



3.ábra – KIND K5 nagyteljesítményű LED rendszer spektrális mért értékei alapján számolt fénytani paraméterek eredmény táblájának képe

A vezérlőtábla segítheti eltérő világítótestek összehasonlítását. Melynek szemléltetését a következő ábrán látható, melyen itt négy eltérő mesterséges fényforrás és a Nap mért, a klorofill elnyelésre súlyozott értékeit mutatja be.



4.ábra – 4 mesterséges világítási rendszer és a Nap (2019.08.09) mért értékei alapján számolt eredmények bemutatása

A 4. ábrával bizonyítottam, hogy adott esetben egy magas megvilágítási érték (*Sylvania*), de még a magas PAR PPF érték sem feltétlenül jelent hasznos fotonösszetételt a növények klorofilljainak számára. Márpedig az új LED rendszerek összeállítása során megválasztható a dióda által leadott spektrális tartományt, így a növényi fényreceptorok számára optimalizált fényforrások jöhetnek létre szemben a korábbi gyakorlattal.

A vezérlést segítő kialakítás referenciájaként jelenleg egy augusztusi napmérés adatait használtam. A pontos referencia kialakítása nagyon fontos lesz a jövőben az olyan, spektrális szabályozásra épülő, pótmegvilágítás vezérlések irányából, melyek során egy üvegház világítási rendszere a természetes sugárzásból hiányzó mennyiségek pótlását valósítja meg.

3.2.3. Vízstressz korrelációja a spektrális adatokkal

Összesen 26 különböző vízindexet képeztem a spektrális mért adataink feldolgozásával a 2.2.3.3. résznél bemutatott segéd tábla segítségével. Ezen indexek korrelációját összevettem az analitikai eredményekkel. A legerősebb korrelációkat a következő, 3. táblázatban összegeztem.

3. táblázat – Vízindexek értékeinek, illetve a laborban mért nedvességtartalom korrelációra vonatkozó eredményeinek összegző táblázata

Indexek	R
NDMI	0,91
NDWI	0,91
WI (900/970)	0,79
WI (970/900)	-0,79
MSI	-0,91
LVI2	0,94
1200/850	-0,77
1450/850	-0,92
1650/850	-0,89
(970-900)/(970+900)	-0,79
(970-850)/(970+850)	-0,57
970-880	-0,8
SRWI(860/1240)	0,68
970-920	-0,87
NDWI(960-1240)	0,69

PLS-R elemzéssel vizsgáltam a további érzékenyebb tartományokat. Ezen elemzést az elsőrendű derivált értékein is elvégeztem (4. táblázat). A legérzékenyebb hullámhosszokból képezhető simple, simple ratio, illetve normalizált változatokat is megvizsgáltam a korreláció szempontjából.

4. táblázat – A mért spektrális értékek elsőrendű deriváltjából képzett indexek korrelációját összesítő táblázat legjobb 5 indexe

Index	R-érték
MSI	-0,91
LVI2	0,94
1450/850	-0,92
1650/850	-0,89
970-920	-0,87

3.2.4. Nitrogén kezelések korrelációja a spektrális adatokkal

A PLS-R elemzés eredményei szerint a spektrumban az „érzékenyebb” hullámhosszak a 800, 710, 675, 560 nm-re estek. Ezen tartományokból újabb indexeket képeztem, illetve a RedEdge tartományt vizsgáltam meg nagyobb fókusszal.

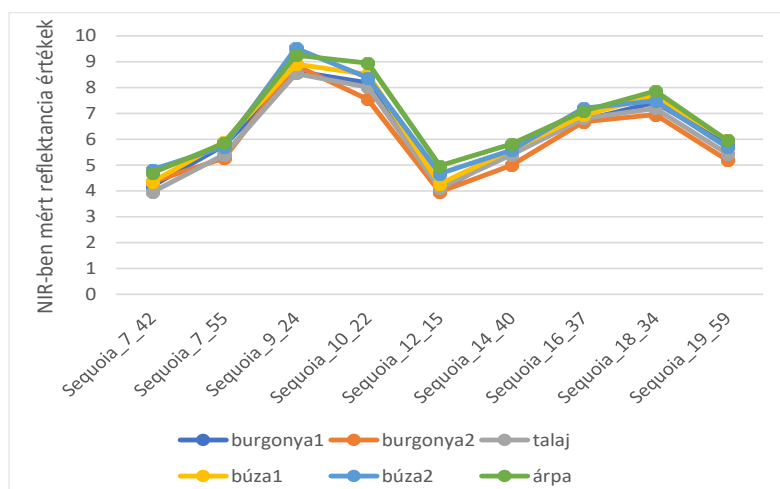
Sajnos egyik index esetében sem mutattak az indexek nagyobb szignifikáns összefüggést, pusztán közepes eredményt. A legmagasabb korrelációs értéket a S800/675 index érte el ($R=0,52$), melyet a CRI ($R=0,49$), illetve a 650-800 nm közötti tartomány minimum értéke ($R=-0,48$) követett.

3.2 Új eszközhordozó rendszereken (UAV) alkalmazott multispektrális érzékelők összehasonlításának eredményei

3.2.1. Drónon hordozott Sequoia multispektrális kamera és két spektrométer összehasonlító eredményei

Az adatok alapján megállapítható, hogy a két rendszer megfelelő pontossággal képes kiváltani egymást, A szórásnégyzet a legtöbb csatorna esetén minimálisan tér el egymástól, eszerint a drónkamerák kevesebb kalibrációja nem jelent feltétlenül hátrányt a pontosságukat tekintve.

Magasabb eltérést a NIR-csatorna szórása mutatta, mely mind a két rendszer között, mind a multispektrális kamera napon belüli értékei között magasabb (~ 3 illetve 1,5) értéket jelzett. Ezt közelebbről megvizsgáltam (5. ábra)



5.ábra - Sequoia kamera különböző időpontokban jellemző, NIR-csatornában mért reflektancia értékei különböző felszínborítások esetén

Láthatjuk, hogy elsősorban a 9:00-10:00, illetve délutáni (16:30-18:30) értékekben jelentkezik nagyobb eltérés.

3.2.2. Micasense Altum felvételeinek műholdas rendszerekkel történő összehasonlításának eredményei

Az optikai csatornákat a Sentinel-2 MSI2A műholdképpel vettem össze, míg a termális csatornát a Landsat8 termális felvétellel.

A drónfelvétel nagymértékben megnövekedett területi felbontása révén sokkal részletes felvételezést, elemzést tudunk elérni szemben egy műholdképpel. Viszont a növényzethatárok nagymértékben egybeesnek.

Pontosság szempontjából 6 osztály esetén a *Sentinel-2* felcserélte a kisebb osztályt képviselőt sást a domináns sulyommal a legnagyobb hasonlóság algoritmusával, míg a tündérrózsát a domináns faj a minimális távolság módszere mellett. Ennek elsősorban az az oka, hogy egyrészt a sást kis területtel lehetett betanítani, ami egy részletes (drón) kép esetén nem jelent nehézséget, viszont kevésbé részletes képnél felerősíti, hogy a spektrális adatok a két osztály esetén túl hasonlóvá váltak, melyet a Bray-Curtis hasonlósági elemzés is jelzett (értéke a két osztály esetében 92,58%). A tündérrózsát műholdas vizsgálata pedig azért nem lehetséges, mivel többnyire elszórtan volt megtalálható, ami kisebb területi felbontás mellett nem tanítható.

4 osztály mellett megfelelő pontosság jellemezte mindkét módszert. Az algoritmusok közül a spektrális szög módszere érte el mindkét esetben és mindkét módszernél a legmagasabb pontosságot.

Az egymással szembeni spektrális pontosság vizsgálatának céljából kinyert adatok szórásnégyzetének eredményeiről elmondható volt, hogy a legmagasabb érték 0,05, míg átlagban 0,02 lett az eredmény.

A fentiekkel bizonyítottam, hogy spektrális pontosság szempontjából megfelelően képes kiváltani a drónokon hordozott távérzékelési módszer a műholdképes elemzést, ráadásul bizonyos kutatási területre a műholdas távérzékelés már nem jelent megfelelő módszertant. A nagyobb területeket érintő felszínborítási változásokat tudjuk a műholdas rendszerekkel vizsgálni, míg a kisebb területi egységek szintjén bekövetkező változások monitoringjára a drónokon hordozott eszközpark tud megoldást jelenteni, így a közel valós idejű beavatkozásokhoz is.

A termális csatorna elemzésekor hasonló eredményre jutottam, itt a területi különbségek még erőteljesebbekké váltak, mivel a Landsat8 műholdkép területi felbontása kisebb a Sentinel-2-nél.

3.1.3. Különböző osztályozási algoritmusok futtatási és pontossági eredményei

A két konfigurációt jellemző eredményeket a 6. táblázatban foglaltam össze.

5.táblázat – Képosztályozási algoritmusok futási idejének és teljes modellre vizsgált Kappa index értékeinek eredményei

Képosztályozási algoritmusok		8GB DRAM	4GB DRAM	Pontosság Kappa index
		Futtatási idő(h)		
nem ellenőrzött osztályozás	klaszterezés (ISODATA)	9,7	>24h	0,4
mély tanulás	Konvolúciós neurális háló (CNN)	>24h	-	0,68
gépi tanulás	Random Forest	7,4	>24h	0,65
	Support Vector Machine (SVM)	10,6	>24h	0,64
	Mesterséges neurális háló (ANN)	10,2	>24h	0,64
ellenőrzött osztályozás	Legkisebb távolság (MD)	1,2	6,5	0,52
	Legnagyobb hasonlóság (ML)	1,2	6,5	0,6
	Spektrális szög (SAM)	1,2	6,5	0,65
	Főkomponens elemzés (PCA)	3,5	8,5	0,56
	Döntési Fa	0,5	2	0,56

Az eredmények alapján megállapítható, hogy bár pontosság szempontjából a legjobb eredményt a mély tanulás modell, majd a gépi tanulás módszerei érték el, mégis magas futtatási idejük nem teszik lehetővé a közel valós idejű adatfeldolgozást. Ezzel szemben a spektrális szög algoritmus már lényegesen gyorsabb futtatás mellett is megfelelő teljes modellre vizsgált pontosság jellemezte. Osztályszintű pontosságban mindegyik algoritmus 80-90 %-os eredményt mutatott.

A döntési fa kialakítása során 5 egyedi tulajdonságot alakítottam ki minden osztály számára, amelyhez az egyszerű reflektancia rétegeket, a PCA eredményeit, az NDVI réteget, illetve a termális csatornát használtam fel. Ezen módszer könnyen integrálható bármely Python környezet mellett, és lényegesen kedvezőbb futtatási ideje nyomán segítheti a közel valós idejű fejlesztéseket. Komplexebb elemzéseket is segíthet (például növénytűrűség változás). Automatizációs oldalról az egyedi

szabályok meghatározása nem megoldott egyelőre, mivel ezen tulajdonságok nem feltétlenül esnek egybe az alapstatisztikai értékekkel (minimum, maximum, átlag).

IV.KÖVETKEZTETÉSEK

4.1. Spektroradiométer módszertanának fejlesztési eredményei

Összehasonlító méréseim során bizonyítottam, hogy a spektrális méréseket megvalósító spektroradiométer megfelelő pontossággal képes kiváltani a SPAD métert, a fénymérés céljából használt lux és PAR mérő rendszereket.

A tervezett mérőfej pontossága megfelel a legelterjedtebb gyártó által fejlesztett megoldással, emellett jobban megvalósítja a diffúz spektroszkópia laborban alkalmazott mérőrendszer elvét, illetve segíti a további fejlesztéseket cserélhető feje révén. A jövőben tovább célszerű vizsgálni a belső felszín borításának változtatását, különböző alátétek alkalmazását.

Az elkészült vezérlőtáblák egyszerűen bekapcsolhatók az adatvezérelt programozásba az általánosan elterjedt Visual Basic révén.

A fényparaméterek spektrális adatokkal történő mérésével minden egyéb jellemzőt ki tudunk fejezni. Emellett fontos lenne az a szemléletváltás, amely a növényi fényreceptorok elnyelését jobban figyelembe veszi, mint a PAR megközelítés. A fényreceptorok elnyelésére fókuszáló, a természetes megvilágításhoz igazodó fényszabályozást csak spektrális szabályozás mellett lehet megvalósítani, így automatizációs oldalról a spektroradiométerek alkalmazása javasolt. Fontos lesz a megfelelő referenciák további kutatása, mely adott termesztett növényfaj igényei szerint változhat túlmutatva a helyi adottságokon.

A beltartalmi (klorofill, víztartalom) eredményeim másik célja annak bizonyítása volt, hogy megfelelően képesek adott spektrális indexek kiváltani a laboratóriumi roncsolásos méréseket. A jövőben javasolt lesz - különösen az automatizáció szempontjából - szűkíteni ezen indexek számát. Például amennyiben további mérések során is, eltérő növényfajok és eltérő környezeti paraméterek, vagy stressz mellett is a klorofill előrejelzését a $CI_{rededge}$ hasonlóan magas értékkel előrejelzi, akkor ezen indexet lehet a műszaki fejlesztésekbe beépíteni.

Az adapter modellje és a két vezérlőtábla bárki számára elérhető az alábbi linken:

https://drive.google.com/drive/folders/1DuYy_X1CSGoT0tMv85gKHQ9iH0XRmjIw?usp=share_link/

4.2. Új eszközhordozók vizsgálata

Igazoltam, hogy bár kevesebb kalibráció jellemzi a drónokon alkalmazott multispektrális kamerákat, ezek megfelelő pontossággal tudják helyettesíteni a spektrométeres méréseket. Ezt további vizsgálatokkal, nagyobb számban fontos lesz még ellenőrizni, többféle szenzort bevonva a vizsgálatokba.

A NIR-csatorna további vizsgálata szintén fontos lesz, amiatt is, mivel számos spektrális indexek alapja ezen mért érték. Az itt tapasztalt szórás miatt egyelőre azon módszertani ajánlást tenném, hogy minden drónon hordozott multispektrális kamera által végzett adatgyűjtési megoldást a déli órákban javasolt végezni.

Igazoltam, hogy bár nagyobb területi egységek vizsgálatakor (kevesebb osztály mellett) megfelelő pontosság jellemzi mind a műholdas, mind a drónos rendszereket, addig kisebb területi egységekre fókuszáló elemzésekkor a műholdas rendszerek nem lesznek képesek pontos elemzésekre. Ezáltal a közel valós idejű megoldások fejlesztését is a drónos multispektrális szenzorok bevonásával lehet megvalósítani.

A közel valós idejű beavatkozások szempontjából a jelenlegi adatfeldolgozási irányok ekkora adatmennyiség esetén nem képesek ellátni az elvárt sebességet. A jövőbeli megoldás több irányú lehet:

- A mély tanulás megoldásainak jellemzője, hogy minél nagyobb a betanított modell háttér adatbázisa, egyúttal minél több betanítási futtatáson vagyunk túl, annál gyorsabbá válik a futtatás sebessége. Ezen cél miatt a drónokon alkalmazott távérzékelési szenzorok felvételeit adatbázisba kell gyűjteni (hasonló adatbázis még nem található, csak egyes mérésekkel találkozhatunk).

- Törekedni kell az egyszerűbb adatstruktúrák alkalmazása. Például a *Python* alapú döntési fa révén egyszerre tudunk több eltérő réteget, ezáltal eltérő adatokat bevonni az elemzésbe. Javasolt egyúttal nem egy többcsatornás adattömböt, hanem egyszerűbb spektrális indexeket, adott tartományt jellemző reflektancia értékeket, vagy hőmérsékleti adatokat bevonni. Ezen megközelítés az egyedi tulajdonságok

összekapcsolását takarja, így ezen egyedi tulajdonságok jövőbeli adatbázisát ki kell alakítani.

- Az optimális adatképletekre bontott elemzési megközelítés: a képi adatképletek kisebb egységekre bontott elemzése. Ezen paraméterek meghatározását a jövőben tovább szeretném vizsgálni, melyben segíthet például az *ORFEO* 'log' adatainak gyűjtése és elemzése. Az *ORFEO* az algoritmusok futtatása során megbecsüli a teljes feladathoz szükséges számításikapacitást (jelen kutatáskor a három gépi tanulási modell egy ekkora állományon 23800 GB RAM-ot igényelt), majd a rendelkezésre álló memória szerint szétbontja a feladatot és lépésenként végzi el a feladatot. Így ezen adatok hosszabb távú vizsgálata segítheti a közel valós idejű fejlesztések szempontjából optimális adatképletek kialakítását.

V.ÚJ TUDOMÁNYOS EREDMÉNYEK

1. Az általam tervezett, kifejlesztett és tesztelt optikai levélmérőadapter (klipsz) összehasonlító mérések alapján, megfelelő terepi használhatósággal rendelkezik, amely jelentősen javítja a kontaktáló növényi spektrométeres mérések eredményességét.
2. Kidolgoztam egy egységesített, spektrométerekre adaptált adatgyűjtési és adatkonverziós módszertant, amely jelentősen javítja a spektrális mérések közötti átjárhatóságot, átláthatóságot és összehasonlíthatóságot, különös tekintettel a SPAD méretek, $CI_{rededge}$ indexek, Lux-, és PAR mérőrendszereket, valamint a klorofill-, illetve víztartalomra vonatkozó kémiai labormérések esetére.
3. Bebizonyítottam, hogy a drónos multispektrális kamerarendszer kielégítő pontossággal helyettesíti a terepi spektrométeres kalibrációs méréseket, amennyiben az adatgyűjtés a nap maximális delelési magassága idején vagy annak közelében történik.
4. Bebizonyítottam, hogy a drónos multispektrális kamerarendszer nagyobb pontossággal helyettesíti a műholdas távérzékelés által elérhető méréseket, A részletesebb terepi elemzések, ezáltal a közel valós idejű beavatkozások fejlesztésébe is ezen módszertant lesz célszerű integrálni.

5. Kidolgoztam egy közel valós idejű, drónos képfeldolgozási eljárást hagyományos és mesterséges intelligenciát alkalmazó képosztályozási módszerek alkalmazásával döntéstámogató gyorsfelmérés és anomália detektálás céljából.

VI. AZ ÉRTEKEZÉS TÉMAKÖRÉHEZ KAPCSOLÓDÓ PUBLIKÁCIÓK

1. *Impakt faktoros folyóiratban:*

NAGY Á.Z., JUNG A., **VARGA ZS.**, KÁTAY GY., ÁDÁM L.A. (2017) Effect of Artificial Light Conditions on Local and Systemic Resistance Response of Tobacco to TMV Infection; *Notulae botanicae horti agrobotanici Cluj-Napoca*, 45:(1) pp. 270-275. (IF = 0.575 (2017)); <https://doi.org/10.15835/nbha45110751>

VARGA ZS., VÖRÖS F., PÁL M., KOVÁCS B., JUNG A., ELEK I. (2022) Performance and Accuracy Comparisons of Classification Methods and Perspective Solutions for UAV-Based Near-Real-Time “Out of the Lab” Data Processing; *Sensors - Feature Papers in the Remote Sensors Section*, 22(22), 8629.; (IF = 5.349 (2021)); <https://doi.org/10.3390/s22228629>

2. *Lektorált folyóiratban (MTA listás) megjelent közlemények:*

CSIMA GY., **VARGA ZS.**, FICZEK G., GYÖKÖS G., LÁNG Z. (2015) Comparison of Fresh Apple Quality grown on Different Tree Trellises, *Hungarian Agricultural Engineering* (27) pp. 51-55.; <http://doi.org/10.17676/HAE.2015.27.51>

VARGA ZS., FELFÖLDI J., STEINER M., LÁNG Z. (2015) Study of inlet light spectrum's effect on plants growth - the light transmittance decreased with increasing glass thicknesses, *Hungarian Agricultural Engineering*, (30), pp. 17-22. <http://doi.org/10.17676/HAE.2016.30.17>

SIPOS L., BOROS I., PURCZEL Á., **VARGA ZS.**, SZŐKE A., SZÉKELY G. (2017) LED-ek hasznosítási lehetőségei a növénytermesztésben (review). *Kertgazdaság* 49(3). pp.11-22

3. *Konferencia Full paper:*

LÁNG Z., CSORBA L., **VARGA ZS.** (2013) Achieving Constant Amplitude and Acceleration of Shaken Fruit Trees Using An Extended Inertia Shaker Machine, *Synergy International Conference*, Gödöllő, Paper no. 193.

VARGA ZS., JUNG A. (2019) Különböző LED rendszerek üvegházi alkalmazásának hazai tapasztalatai; *X. LED konferencia (2019.02.05.)*, pp. 23-24.

VARGA ZS., VÖRÖS F., PÁL M., KOVÁCS B., JUNG A., ELEK I. (2022) Osztályozási módszerek és új megoldások teljesítményének és pontosságának összehasonlítása UAV-alapú, közel valós idejű adatfeldolgozás céljából; *XIII. Térinformatikai Konferencia és Szakkiállítás (2022. 11. 3-4.)*, pp. 325-337.

VARGA ZS., JUNG A. (2016) A spectroscopic set-up development for efficiency analysis of HPS and LED lighting in horticulture; *Biosysfoodeng (2016.12.08.)*, Paper no. 136.

4. Konferencia előadás és absztrakt:

VARGA ZS. (2020) Különböző LED-rendszerek kertészeti alkalmazásainak lehetőségei; *PREGA SCIENCE'20, Precíziós Gazdálkodási Konferencia (2020. február 18.)*

VARGA ZS., FARUK E.Ö., BODAGHY M., JUNG A. (2022) Flood susceptibility mapping in Hungary based on remote sensed images and machine learning methods, *GeoMATES '22; International Congress on Geomathematics in Earth- & Environmental Sciences (2022.05.19-21.)*, p. 63.

