



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Alba Regia Műszaki Kar

Geoinformatikai Intézet

SZAKDOLGOZAT

UAV távérzékelési technológia alkalmazási lehetőségei gyümölcsültetvényeken

OE-AMK

2022

Hallgató neve: Papp Péter

Hallgató törzskönyvi száma: T000674/FI12904/A-G



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

Óbudai Egyetem
Alba Regia Műszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

SZAKDOLGOZAT FELADATLAP

Hallgató neve: Papp Péter

Szakedolgozat száma: [REDACTED]

Törzskönyvi száma: T000674/FI12904/A-G

Neptun kódja: [REDACTED]

Szak: precíziós gazdálkodási szakember

Specializáció:

A dolgozat címe: UAV távérzékelési technológia alkalmazási lehetőségei gyümölcsültetvényeken

A dolgozat címe angolul: Possibilities of application of UAV remote sensing technology in fruit orchards

A feladat részletezése:

1. Röviden mutassa be a magyarországi gyümölcsösök mezőgazdasági munkálatait a telepítés és a termőre fordulás időszakát is beleértve!
2. Kiemelten foglalkozzon a sárgabarackkal, a fajta általános igényeivel, az ültetvények fagy és kártevő okozta lehetséges káreseteivel!
3. A kárral érintett területek, egyedek gyümölcsösön belüli lehatárolásához egy mintaterületen használjon nagyfelbontású légifelvételeket, dróntechnológiával készített képeket! Lehetőség szerint a felvételeket R, G, B és közeli infra (NIR) tartományokban készítse!
4. Vizsgálja meg, hogy önmagában a látható fény tartománya (RGB) alkalmas-e a növényzetben keletkezett károk kimutatására!
5. Tapasztalatait összegezze és tegyen javaslatot a dróntechnológia költséghatékony, gyümölcsösökben történő hasznosítására!

Intézményi konzulens neve: Balázsik Valéria

A kiadott téma elévülési határideje: 2024. 12. 15.

Beadási határidő: 2022. 12. 15.

A szakedolgozat: Nem titkos.

Kiadva: Székesfehérvár, 2022. 10. 17.



P.H

Intézetigazgató

A dolgozatot beadásra alkalmasnak találom: 2022. 12. 15.

belső konzulens

külső konzulens



ÓBUDAI EGYETEM
ÓBUDA UNIVERSITY

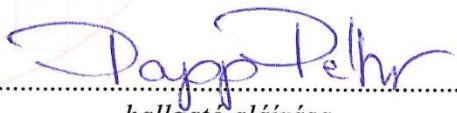
Alba Regia Muszaki Kar
Geoinformatikai Intézet

HALLGATÓI NYILATKOZAT

Alulírott PAPP PÉTER hallgató kijelentem, hogy a szakdolgozat/diplomamunka saját munkám eredménye, a felhasznált szakirodalmat és eszközöket azonosíthatóan közöltem. Az elkészült szakdolgozat/diplomamunkában található eredményeket az egyetem és a feladatot kiíró intézmény saját céljára térítés nélkül felhasználhatja, a titkosításra vonatkozó esetleges megkötések mellett.

Kelt:

Budapest, 2022.12.14.


hallgató aláírása

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés	1
2. Irodalmi áttekintés	2
2.1 Gyümölcs, gyümölcsstermesztés, gyümölcsös	2
2.1.1 A magyarországi gyümölcsstermesztés metszete és irányvonalai	2
2.1.2 A gyümölcsstermesztés munkafolyamatai	5
2.1.3 A kajszi termesztése	12
2.1.4 A fitoplazmák jellemzői, az általuk okozott növénybetegségek tünetei, és gazdasági jelentőségük	16
2.2 A távérzékelés fizikai alapjai, szenzorok és platformok	19
2.2.1 A pilóta nélküli légitjárművekkel (UAV) végzett távérzékelés és alkalmazási lehetőségei a gyümölcsstermesztésben	21
3. Mintaterület, eszközök, módszerek	28
3.1 A mintaterület	28
3.2 Adatgyűjtés	32
3.3 Adatfeldolgozás	38
4. Eredmények	43
5. Összefoglalás	55
Összefoglaló	62
Summary	63
Irodalomjegyzék	65
Ábrajegyzék	69
Táblázatok jegyzéke	70

1. BEVEZETÉS

Napjainkban a mezőgazdasági termelést egyre szaporodó, bizonyos esetekben korábban még nem tapasztalt kihívások teszik viszontagságossá. A gyorsuló ütemű klímaváltozás egész bolygót érintő hatásai (az egyenetlen csapadékeloszlás következtében kialakuló aszályok és áradások, viharok, növény- és állatfajok migrációja stb.) súlyos kiszámíthatatlanságot teremtenek az ágazatban, emellett olyan társadalmi természetű folyamatok okoznak további nehézséget, mint a népesség városokba vándorlása és a fiatal korosztály mezőgazdasági munkavégzés iránti érdektelensége. A korszerű technológiák nyújtotta lehetőségek intelligens kiaknázása, azok mezőgazdasági termelésbe való szerves integrálása ugyanakkor megoldásokat kínálhat a kihívásokra. Az egyik rendelkezésünkre álló, kiemelten sokoldalú technológia a pilóta nélküli légi járművek (Unmanned Aerial Vehicle – UAV, drónok) mezőgazdasági alkalmazása. Az UAV-k munkafolyamatok sokaságához kínálnak hatékony és bámulatosan rugalmas platformot, legyen szó légi távérzékeléssel történő adatgyűjtő repülésekről, a tápanyaggazdálkodás újszerű módszerekkel történő támogatásáról vagy légi növényvédelemről. A mezőgazdasági drónok autonóm, illetve akár teljesen automatizálható működésükkel jelentősen megkönnyíthetik egyes hagyományosan munka- és időigényes feladatok végrehajtását. Szakdolgozatomban az UAV technológia növényállapot-felmérési (monitoring) célú felhasználását mutatom be egy közép-dunántúli kajsziparack ültetvényen végzett repülésekből származó adatok elemzésének segítségével. Munkám célja olyan gyakorlatban használható légi távérzékelési módszer kidolgozása volt, amely alkalmas a gyümölcsös individuális fáinak állapotáról információt szolgáltatni, ezáltal lehetővé teszi a környezetükhöz képest legyengült kondíciójú egyedek azonosítását. Az érintett fák ismert pozíciójuk alapján ezután célzottan és időhatékonyan felkereshetők a terepi szemléhez, mintavételhez. A különböző állapotú egyedek térbeli elrendeződésének elemzése hozzájárulhat az állapotromlást okozó tényező azonosításához, és kulcsfontosságú szerepet játszhat az olyan súlyos növénybetegségek kontroll alatt tartásában, mint a gyakran csak a fertőzött fák eltávolításával kezelhető fitoplazmózis.

2. IRODALMI ÁTTEKINTÉS

2.1 Gyümölcs, gyümölcsstermesztés, gyümölcsös

A gyümölcs botanikai értelemben a gyümölcstermő növény virágrészeiből kifejlődő valódi vagy áltermés, amelyben kialakulása és érése során értékes kémiai vegyületek, tápelemek és egyéb anyagok halmozódnak fel. Vonzó megjelenésű, kellemes ízű és zamatú, különleges beltartalmi és élvezeti értékű növényi termék, amely az emberiség egyik legtermészetesebb tápláléka, hiszen az érést követően nyersen, frissen azonnal fogyasztható [1].

A gyümölcstermő növények szaporításával és a gyümölcsök előállításával foglalkozó gyümölcsstermesztés, mint mezőgazdasági termesztési ágazat a kertészeti főágazathoz tartozik. Célja kiváló minőségű gyümölcsök nagy választékának termelése, szem előtt tartva a piac és a fogyasztók igényeit [1].

A gyümölcsös vagy gyümölcsültetvény változó, általában sokéves élettartamú (akár 50-100 év) évelő kultúra, szabályos rendben ültetett gyümölcstermő növények együttese [1].

2.1.1 A magyarországi gyümölcsstermesztés metszete és irányvonalai

A világ gyümölcsstermesztésének volumene az elmúlt hetven évben a mezőgazdasági termelés átlagát meghaladó mértékben bővült: az összes gyümölcstermés 1998-ban elérte a 435 [1], 2016-ban a 717 millió tonnát [2]. Hazánk gyümölcsstermelésében az 1980-as évek közepétől kezdve ezzel ellentétes tendencia bontakozott ki. A rendszerváltás időszaka a korábbi évtizedekben kialakult hagyományos keleti piacok javának elvesztésével az ágazat hosszan tartó válságát hozta, melynek hatásai máig érezhetők [2]. Jelenleg ültetvényeink mindössze 1/4-1/3 részén folyik korszerű, várhatóan hosszabb távon is versenyképes termelés [2] [3]. Gyümölcsöseink többségét ezzel szemben máig korszerűtlen termesztéstechnológia és általános elhanyagoltság jellemzi, amelyek együttesen alacsony termésátlagokat és gyenge termésbiztonságot eredményeznek [2]. Magyarországon napjainkban 77 ezer hektáron folyik üzemi gyümölcsstermesztés, amely évente átlagosan 800 ezer tonna termést állít elő [2]. Előbbi az 1966 és 1970 közt kialakult csúcshoz (171 ezer ha ültetvény), utóbbi az 1980-as évek elején jellemző rekordhozamokhoz (1731 t) viszonyítva jelent 55% körüli volumencsökkenést [1] [2].

Hazánk három jelentős gyümölcsstermesztő körzettel rendelkezik [1] [2], amelyekben körülbelül húsz mérsékelt égövi gyümölcsfaj termesztéséhez találhatók meg kedvező ökológiai feltételek [1]. Az előállított mennyiség tekintetében legjelentősebb a Szabolcs-Szatmár-Bereg, Borsod-Abaúj-Zemplén és Hajdú-Bihar megyéket magába foglaló Északkelet-magyarországi régió, ahonnan a teljes magyar gyümölcstermés kb. fele származik. Itt zajlik az alma-, meggy-, szilva-, kajszi-, dió-, és bodzatermesztésünk jelentős része. Volumenben a második, hagyományosan azonban a legrégibb körzet a Duna-Tisza-közén található, ahol a csonthéjasok termesztése bír kiemelt jelentőséggel. Termőfelületét tekintve a legkisebb, viszont növekvő trendet mutató, harmadik gyümölcsstermő körzetünk a Délnyugat-Dunántúlon alakult ki [1] [2].

Az ezredforduló óta eltelt két évtizedben hazai termesztésű gyümölcsfajaink termőterülete egyedül a cseresznye, dió, szamóca és bodza esetében növekedett. A körte, meggy és szilva termőterülete stagnál, míg az alma, kajszi, őszibarack, málna, szeder és köszméte esetében jelentős mértékben zsugorodott [2]. Közülük az utóbbi három bogyógyümölcsű faj termesztése rendkívüli visszaesést szenvedett el, gyakorlatilag a megszűnés határára jutott. Ebben a magas kézimunkaerő igény és a feldolgozó kapacitások hiánya mellett [2] klimatikus tényezők is szerepet játszottak. (Érdekesség, hogy Dr. Papp János 2003-ban megjelent tankönyvében a málnát még mint „az egyik legfontosabb bogyógyümölcsünket” említi, melynek „termesztési és piaci részesedése a jövőben is megtartható” ([1], 20. o.) – sajnos nem így történt.) Almatermesztésünk az ugyancsak drasztikus ágazati zsugorodás [1] [2] ellenére máig domináns maradt, az összes hazai gyümölcstermés 60-65%-át adja kb. 500 ezer tonnás éves mennyiséggel. A csonthéjas gyümölcsök aránya együttesen 25-30%-ot tesz ki a magyar „gyümölcsmixből”, míg a héjasok és bogyósok együtt kb. 4-5%-ot képviselnek [2]. Csonthéjas gyümölcsseink közül 50-70 ezer tonnás éves termésünkkel a világ legnagyobb meggytermelői közé tartozunk, míg a bodza termesztése az utóbbi időszak hazai sikertörténetének bizonyult. 15-20 ezer tonnát kitevő termesztett mennyisége a világ össztermelésének körülbelül felét jelenti [2]. A kétezres évek első felében az itthon termesztett gyümölcsök 30-50%-át dolgozta fel az ipar, 10-15%-át exportáltuk, a fennmaradó kb. 30-40% pedig friss terméként lakossági értékesítésre került [1].

Almatermesztésünket az elmúlt évtizedekben szélsőségesen ingadozó termés hozamok, így nagyon gyenge termésbiztonság jellemezte, amely jelentős akadályt gördít az új piacok kiépítése és megtartása elé [2]. A körtét igényessége miatt kis területen és szűk fajtaválasztékban termesztjük hazánkban [2]. Cseresznyéből kiváló minőségű hazai nemesítésű fajtákkal rendelkezünk, amelyekből meglévő, főként Közép- és Kelet-Magyarországon koncentrálódó termőterületeinken túl célszerű volna új, exportképesen termelő intenzív ültetvényeket létesíteni. A rendkívül sokoldalúan felhasználható meggy egyik hungarikum gyümölcsünk, hazai fajtáinkat rendkívül kedvező beltartalmi értékek, íz és zamat jellemzik [2]. Németország a legjelentősebb nyugati piacunk, ahol előszeretettel dolgoznak fel magyar meggyet. Magyarország a világ vezető meggybefőtt termelője, részesedésünk világszinten 30-35% [2]. Hazánk számos táján termelnek szilvát, melynek néhány fajtájából különleges minőségű lekvár és pálinka készíthető [2]. Csonthéjas gyümölcsseink közül a magyar kajszit ugyancsak elnyerte a hungarikum minősítést [2]. Illata, zamata és beltartalmi értékei kiemelik a világban termelt fajták közül. Magas ökológiai érzékenysége miatt termés hozamai hektikusak, termesztési területe ezzel összefüggésben a szélsőségesebb klímájú Alföldről Északkelet-Magyarországra tolódott [2]. Híres termőhelye Gönc település és környéke, ahol azonban a 2010-es évek közepén berobbanó fitoplazma fertőzések rendkívüli pusztítást végeztek kajsziiültetvényeinken [4] [5]. A kajsziihoz hasonlóan érzékeny őszibarack hazai termesztését ugyancsak viszontagságossá teszik a gyakori fagykárak [2]. A magyar dió sikergyümölcs, amely prémium terméként értékesíthető itthon és külföldön egyaránt. Termesztése a '80-as és '90-es évek nagyarányú kivágásait követően újra felívelőben van [2]. A bogyógyümölcsűek közül a szamóca és bodza növekvő termőterülettel rendelkezik hazánkban, amelyekhez a legújabb időkben a homoktövis és húsos som csatlakozott új jövevényként [2].

Összességében elmondható, hogy a hazai gyümölcságazat megújulása, megújítása évtizedek óta aktuális, egyre sürgetőbb, megkerülhetetlen feladat [1] [2]. A Kárpát-medence agroökológiai adottságai kiváló minőségű gyümölcsök termesztését teszik lehetővé, amelyekre komoly kereslet mutatkozna (illetve némely esetben mutatkozik) a hazai és egyre inkább globalizálódó nemzetközi piacokon [1] [2]. A termelési volumen javulása elsősorban integrált gyümölcsstermesztést folytató intenzív ültetvények

létesítésével oldható meg, amelyek korszerű termesztéstechnológiával, magas szintű gépesítéssel és hatékony, szakszerű élőmunkával képesek nagy arányban kiváló minőségű gyümölcsök előállítására [1] [2]. A jelenleginél magasabb fajlagos terméshozamok eléréséhez a megfelelő fajtaválasztás és fajtamegújítás ugyancsak kulcsfontosságú. A korszerű gyümölcstermesztés sikerrel aknázhatja ki a precíziós gazdálkodás egyre nagyobb választékban rendelkezésre álló eljárásaiban, eszközeiben rejlő lehetőségeket (pl. talajszenzorok, növényi részek laboratóriumi célú mintavételezéséből származó adatok, távérzékelési módszerekkel végzett növényállapot-monitoring, idősoros adatfeldolgozás stb.), amelyek adatvezérelt módon segíthetik a hozamok stabilizálását, a hektikusság csökkentését. Az árukezelés és értékesítés korszerű gyakorlata, valamint a megfelelően szabályozott gyümölcskereskedelmi rendszer a fentiekhez társulva támogathatja a termesztés jövedelmezőségét [1]. A felvázolt átalakítások tökeigényes, magas színvonalú szaktudást és képzett, mennyiségében is elegendő munkaerőt igényelnek [2]. A magyar gyümölcságazat megújítása ugyanakkor komoly lehetőségeket rejtő nemzetgazdasági érdekünk.

2.1.2 A gyümölcstermesztés munkafolyamatai

Új gyümölcsös telepítések az első lépést átgondolt tervezés és precízen kivitelezett előkészítő munkafolyamatok jelentik. Noha a gyümölcsfajok jelentős részben jó alkalmazkodó képességűek, minden faj, sőt fajta a számára megfelelő környezeti feltételek mellett képes ideális mértékben növekedni, fejlődni és termést hozni [2]. Fontos a telepíteni szánt gyümölcsfaj ökológiai igényeinek (hő-, víz-, fény- és talajigény) beható ismerete, amelyek alapján kiválaszthatjuk a megfelelő termőhelyet – vagy épp fordítva, adott földterülethez is választhatunk megfelelően illeszkedő gyümölcsfajt [1] [2]. A termőhely abiotikus és biotikus környezeti adottságairól (klimatikus, talajtani, domborzati tényezőiről és jellemző növényi és állati társulásairól) több forrásból is gyűjthetünk információkat, közülük a legfontosabbak a telepítést megelőző laboratóriumi talajvizsgálat és a lehetőség szerint több szakterület képviselőivel együtt végzett területbejárás [2]. A szemle során fontos alaposan megvizsgálni a terület méretét, fekvését és domborzati viszonyait (sík vagy heterogén, lejtés mértéke, lejtők iránya, környezetéhez képesti mélyebb vagy magasabb fekvés). Az előző telepített kultúra állapota fontos indikátorként szolgálhat a termőhely adottságait illetően. Információt

szükséges gyűjtenünk a talajvíz szintjéről és ingadozásáról, az uralkodó szélirányról és jellemző szélereősségről, a jégesők, aszályok, tavaszi, őszi vagy téli fagykárak, és az esetleges vadkártételek, kártevők előfordulási gyakoriságáról. A gyümölcstermesztés rendkívüli kézimunkaerő igényű tevékenység, amihez állandó és alkalmi dolgozókra egyaránt szükség van, így a létesítendő ültetvény tágabb környezetének munkaerő-ellátottságát is fel kell mérnünk. A gyümölcsöket termesztésük mellett tárolni, szállítani, feldolgozni és értékesíteni szükséges, így rendkívüli jelentőségű az utak, az elektromos hálózat, hűtőházak stb. közelsége és elérhetősége [1] [2].

A klímaváltozás hatására az elmúlt évtizedekben jelentősen megnőtt a szélsőséges időjárási események száma, ami csökkenti a gyümölcstermesztés biztonságát [2]. Hazánkban az extrém időjárási hatások kockázati rangsora az alábbiak szerint alakul: 1. tavaszi fagy, 2. jégeső, 3. túl magas hőmérséklet a vegetációs időszakban, 4. téli fagy, 5. túl magas hőmérséklet a téli nyugalmi időszakban, 6. zivatarok és szélviharok, 7. őszi fagy. A legsúlyosabb károkozást a fagykároknak tulajdoníthatjuk, amelyek száma a 2018-ig tartó évtizedben magasabb volt, mint az azt megelőző 30-40 évben összesen [2]. A jégesők ugyancsak forintmilliárdokban kifejezhető pusztítást okoznak alkalmanként. A telepítendő ültetvény szempontjából a kockázat felmérésével párhuzamosan a szélsőséges időjárási hatások elleni védekezésről is dönthetünk. A főként csonthéjas és héjas gyümölcsűeket fenyegető tavaszi, virágrügyeket és virágokat pusztító fagyhatás ellen passzív (fagyzugmentes termőhely választás, fagyűrőbb alanyok, fajták, nagyobb famagasság alkalmazása stb.) és aktív (légkeverés, füstölés, fagyvédelmi öntözés, ültetvényfűtés pl. paraffingyertyával stb.) módszerekkel védekezhetünk [2]. A jégvédelmi lehetőségek terén közösségi és üzemi rendszereket különíthatunk el. Az előbbiek közös alapelvre, ezüst-jodid kristályok légköri kondenzációs magként való alkalmazására épülnek. Talajgenerátoros változatuk mára hazánk teljes területén elérhető. Üzemi jégvédelmi technológiák a jégvédelmi ágyú és a jégvédő háló, amelyek közül az utóbbi 100%-os védelmet nyújt a jégeső ellen és számos további előnyös tulajdonsággal rendelkezik (nyáron alacsonyabb hőmérsékletet és napégés elleni védelmet biztosít a gyümölcsöknek, tavasszal kis mértékben véd a késői fagyoktól stb.) [2].

A terület és a telepítésre szánt gyümölcsfaj(ta) kiválasztását követően az ültetvény legfontosabb adatait (térképek, alany- és fajtaválasztás, fajtatársítás, ültetési rendszer,

költségvetés stb.) részletesen kifejtő telepítési tervet kell készítenünk [2]. Az alanyok termesztési szempontból előnyös tulajdonságai fontos szempontot jelentenek a nemes fajtákkal való társítás szempontjából [1] [2]. A gyümölcsstermesztésben leggyakoribb a gyökéralany használata, amikor a gyökérzet és a törzs rövid, 10-30 centiméteres része származik az alanytól. Az alany a nemes résszel kölcsönhatásban az oltvány számos fontos tulajdonságát (faméret, alkalmazható koronaforma, termés mennyisége és minősége stb.) befolyásolja, amelyek hatással vannak az ültetvény üzemeltetésének gazdaságosságára [2]. A fajtatulajdonságok java az áruértékre és termesztési tulajdonságokra egyaránt hatást gyakorol (pl. érési idő, tárolhatóság stb.) – összességében elmondható, hogy a fajta legfontosabb termesztési értékét kiváló áruértéke biztosítja, ami a fajtaválasztás elsődleges szempontját jelenti [2]. A telepített gyümölcsösben kedvező fajtatársítással szükséges megteremtenünk a megporzás feltételeit, a biológiai (együttvirágzás mértéke, termékenyülő és termékenyítő képesség) és technológiai tényezőket (érési idő, a szüret szervezése szempontjából) egyaránt figyelembe véve [1] [2]. Környezetkímélő és költséghatékony megközelítés a hasonló növényvédelmi és agrotechnikai igényű fajtákat azonos táblába telepíteni. Az ültetési rendszer a gyümölcsstermő növények mértani formákban történő, szabályos elhelyezését jelenti [2]. Közülük az árutermelő ültetvények általában a téglalap alakú, széles soros ültetést alkalmazzák. A sor- és tőtávolságot a fák koronamérete, a megvilágítottság optimalizálása és a gépesített üzemeltethetőség szempontjai alapján határozzuk meg.

Ültetvénytelepítés előtt szükség lehet a kijelölt táblák, illetve környezetük rendezésére, amely munkákat összefoglalóan területrendezésnek nevezzük [2]. Ide tartozik pl. a növénymaradványok eltávolítása, a terep egyenetlenségeinek korrigálása, szélvédő fasorok, vízelvezető csatornák, utak, kerítések létesítése. A talajelőkészítés legfontosabb műveletei a talaj megfelelő mélységű forgatása, feltöltő szerves-, illetve műtrágyázása és a talajfertőtlenítés. A forgatást célszerű nyár végén, ősz elején elvégezni, gyümölcsfák esetében 60-80 centiméter mélységig – segítségével javul a talaj fizikai állaga, egyúttal a gyommagvak a mélyrétegekbe kerülnek. A laboratóriumi talajvizsgálat szolgáltatott adatokra alapozva a forgatással egyidőben a talajba keverhetjük a szükséges szerves-, illetve P, K, Ca és Mg hatóanyagú műtrágyákat. Fiatal ültetvények esetén különösen fontos a terület talajkártevőkkel való fertőzöttség megállapítása (cserebogárpajorok,

drótféreg, fonálféreg stb.). Pajorok számolása pl. augusztus elején történhet helyszíni vizsgálattal, a fonálféreg kimutatása azonban laboratóriumi körülményeket igényel. Ha fertőtlenítés szükséges, az ehhez használt vegyszereket az augusztusi szántással érdemes kijuttatni.

Sík területen létesített ültetvény esetén egyenletes napfényellátottságot biztosíthatunk észak-déli sorirány kijelölésével [1] [2]. Az ültetést lombtalan állapotban, ősszel vagy tavasszal, az időjárási viszonyoknak és a talaj állapotának függvényében végezhetjük [1] [2]. Mielőtt az oltványok az ültetőgödrökbe kerülnek, fontos művelet gyökérzetük visszametszése, illetve a kiszáradás esélyét csökkentő agyagpépezés. Az ültetőgödrök gépi ásásakor szétválasztott fel- és altalajt az ültetés során fordítva helyezzük vissza. Fontos elkerülni a gödrök oldalfalainak cserepes beszáradását. Az oltáshelyek kerüljenek a talajszint feletti kívánt magasságba, illetve a kitörés elkerülése érdekében széliránnyal szembe. Őszi telepítéskor figyelni kell a fagyvédelemre (felkupacolás), tavasszal a csapadékvíz gyökérzet feletti összegyűjtésére (kitányérozás). A minőségi gyümölcsöt termelő ültetvények fáit a kézzel végzett szüreti és növényápolási munkák miatt alacsony (70-90 cm) törzsön neveljük, míg az árutermelő gyümölcsösökben a gépesítés (pl. rázógép és gyűjtőponyva alkalmazása) miatt magasabb, általában 100-120 centiméteres törzsmagasság jellemző [2]. A hazai gyümölcsstermesztésünk megújításában kulcsszerepet játszanak az alacsony törzsön ülő, alacsony termőfelületű, intenzív koronaformák, melyek hátrányaikat meghaladó előnyökkel rendelkeznek (korábbi termőre fordulás, jobb területkihasználás, hatékonyabb szüret, metszés, növényvédelem, jégvédő hálók alkalmazhatósága vs. nagyobb beruházási költség, táمبرendezés- és öntözési igény stb.). Számos koronaforma létezik (pl. gömb, katlan, orsó, sövény stb.), amelyek a különböző gyümölcsfajok, alany-fajta kombinációk sajátos ökológiai igényeit (pl. fényigény) és a gyümölcsös művelésének, üzemeltetésének gyakorlati szempontjait figyelembe véve alakíthatók ki tudatosan és hatékonyan. A korona formája fontos szerepet játszik a gyümölcsfák növekedésének és terméshozásának összehangolásában [1] [2]. A termőfelület kialakítása és fenntartása a nyugalmi és vegetatív időszakban végzett metszési műveletekkel (alakító, karbantartó, ifjító metszés, koronaritkítás) és az azokat kiegészítő eljárásokkal történik (hajtáshelyzet megváltoztatása, metszési sebek kezelése) [2]. A megfelelő termésmennyiség és -

minőség beállítását célzó további fontos művelet a gyümölcsritkítás [1] [2] [6], ami az alma, körte, az őszibarack és kajszi esetében mindenképpen elvégzendő. Munkaerőigénye különösen a csonthéjasok esetében nagy, hiszen esetükben csak kézi ritkítás lehetséges.

A gyümölcsösök talajának kedvező fizikai, kémiai és biológiai állapota megfelelő talajműveléssel érhető el és tartható fenn [1] [2]. Szakszerű végzése elősegíti a talajszerkezet megőrzését, a szervesanyag-tartalom és mikrobiológiai aktivitás növelését, a talaj vízgazdálkodásának javítását, de fontos szerepe van a kedvező mikroklíma kialakításában vagy az erózió elleni védelemben. A gyümölcsültetvény talajművelési rendszere lehet gypesített sorközü, ugarműveléses sorközü, esetleg a kettő kombinációja [2]. Az előbbi fontos előnye, hogy egész évben járhatóvá teszi a talajt munkagépek számára, illetve javítja a talaj szerkezetét, levegőzöttségét, a hő- és vízháztartását, és élőhelyet biztosít hasznos, antagonistá szervezettek számára. Jelentős hátránya ugyanakkor a gyep jelentős vízigénye, amely a gyümölcsfák szükségleteihez adódva elengedhetetlenné teszi az öntözést. Ugarművelés a gyenge vízellátottságú területeken alkalmazandó. Talajmunkát kedvező talajnedvességi állapot mellett kell végezni – a tömörödés mérséklése érdekében, ahol lehetséges, gépi munkákat száraz vagy fagyos talajon célszerű folytatni.

A tápanyag-gazdálkodás szempontjából a gyümölcsfákra általában jellemző, hogy a tápelemek szélsőséges hiányának vagy túlkínálatának eseteit leszámítva a tápanyag-ellátottság széles skáláján képesek tartósan megfelelő mennyiségű és jó minőségű termést hozni [2]. A legfontosabb makro- és mikroelemek a gyümölcstermő növények szempontjából a N, P, K, Ca, Mg, Fe, Mn, B, Zn és Cu. Talajba juttatásuk egyik fontos módszere a feltöltő trágyázás, amellyel a telepítést megelőzően, a talajvizsgálati eredményekre alapozva beállítjuk a kedvező talajállapotot a gyümölcsfák fő gyökérszónájának számító felső 60 centiméteres talajszelvényben [2]. A tápelemeket célzottan pótló műtrágyák mellett szerves trágya kijuttatása jótékony hatással van a talajszerkezetre és a biológiai aktivitásra. Nitrogénszolgáltatása két évre elosztottan jelentkezik, a talajban felszaporodó mikroorganizmusok azt szervezetükbe építik, így nem tud gyorsan lemosódni. A szerves trágyát célszerű az időszaki mélyműveléssel a talajba juttatni, hogy gyors elbomlását elkerüljük [2]. A fenntartó trágyázás szempontjából fontos a tápanyagszükséglet felmérése, ehhez talajvizsgálatra, növényi

részek (levelek, rügyek) analízisére és vizuális szemrevételezésre támaszkodhatunk. A mindenkori tápanyagszükséglet arányos a megtermelni kívánt gyümölcs mennyiségével, míg az adagolást (kevészer többet, több adagban kevesebbet) nagyban befolyásolja ültetvényünk talajtípusa.

A hazánkban termelt mérsékelt égövi gyümölcsök közt magas- és közepes vízigényű fajokot találunk [2]. A gyümölcstermő növények 1 kg szárazanyag előállításához 300-500 liter vizet használnak fel, többségük biztonságos vízellátásához 800 mm feletti csapadék szükséges. Ebből következik, hogy Magyarország klimatikus viszonyai közt az öntözés kulcsfontosságú, különösen gypesített sorközü művelés esetén [2]. Elsődleges funkciója a vízpótlás, de javítja a tápanyag-gazdálkodást és a talajszerkezetet. A nem megfelelő módszerrel (felületi, esőztető, vagy mikroöntözési megoldások léteznek [1] [2]) vagy mennyiségben történő öntözés kedvezőtlen hatásai lehetnek a szikesedés, tápanyag-kilúgozódás, kergesedés, felszíni erózió. Az öntözés időzítése a talaj nedvességtartalmától, a növény vízfelhasználásától és a vízigényes fenofázisok ismeretétől függ, általában az április végétől augusztus közepéig terjedő időszakot érinti.

Az előállított gyümölcsök mennyiségével és minőségével szemben egyre komolyabb kritériumokat támaszt a piaci verseny. A megfelelő színvonal eléréséhez elengedhetetlenül szükséges gondot fordítani a megfelelő növényvédelmi gyakorlat alkalmazására az ültetvényeken [1] [2]. A hagyományos gazdálkodásra jellemző intenzív vegyszerhasználat felborítja az ökológiai egyensúlyt, ráadásul napjainkra a fogyasztói szokások változása miatt a szabályozott vegyszerkijuttatás mellett vagy azt teljesen nélkülözve megtermelt termékek iránt egyre élénkebb kereslet mutatkozik [2]. Az ökológiai szemlélet egyre nagyobb súllyal érvényesül a termelésben, az ilyen szempontokat szem előtt tartó növényvédelmet integrált növényvédelemnek nevezzük, amely a legtöbb gyümölcส์ültetvényünkre jellemző. Alapelve valamennyi növényvédelmi eljárás egysége, amelyek közül mindenkor a károsító helyzet és a hasznos antagonista szervezetek figyelembevételével választunk [1] [2]. Munkafolyamatai közt mechanikai (erősen fertőzött fák eltávolítása az ültetvényről vagy a környezetéből, fertőzött részek lemetésése, sebkezelés stb.), biotechnikai (csapdázás), biológiai (madárodúk, T-ülőfák, kihelyezése, emlős ragadozók számára bújóhelyek biztosítása) és kémiai eljárások egyaránt megtalálhatók. Utóbbiak esetében a permetezéshez használt szerek

felhasználása szabályozott és korlátozott, a rövid hatástartamú, szűk hatásspektrumú, élő vizeket nem terhelő anyagokat kell választani. A hagyományos és integrált növénytermesztés alternatíváját jelentheti a biotermesztés, amely kemikáliáktól mentesen, kizárólag természetes eredetű hatóanyagokkal oldja meg a növényvédelmet [2]. Mivel ezek köre korlátozottabb, hatásosságuk pedig sok esetben elmarad a vegyszeres módszerektől, a biológiai növénytermesztésbe vont gyümölcsfajok többsége ma még nem biztosít rentabilitást.

A gyümölcstermesztés rendkívüli kézimunkaerő-igénye miatt [1] az ágazat fejlődésének egyik legfőbb korlátját a hazánkban egyre veszesebben jelentkező (minőségi és mennyiségi értelemben vett) munkaerőhiány jelenti [2]. A hiányzó kézimunkaerő kiváltására az ültetvények gépesítése jelenthet részleges megoldást – részlegesen, hiszen a fejlesztések tökeigénye óriási, a megtérülés nem megfelelően kihasznált gép esetén hosszú vagy kétséges, a termesztett fajok, az alkalmazott termesztéstechnológia pedig meghatározza, mely munkafolyamatok végezhetők géppel. Jól gépesíthetőnek mondható pl. az alma, a körte, meggy, kajszi és bodza termesztése [2]. Gépesítéssel jelentősen hatékonyabbá tehetők pl. a metszési, talajművelési, permetezési, és betakarítási munkák.

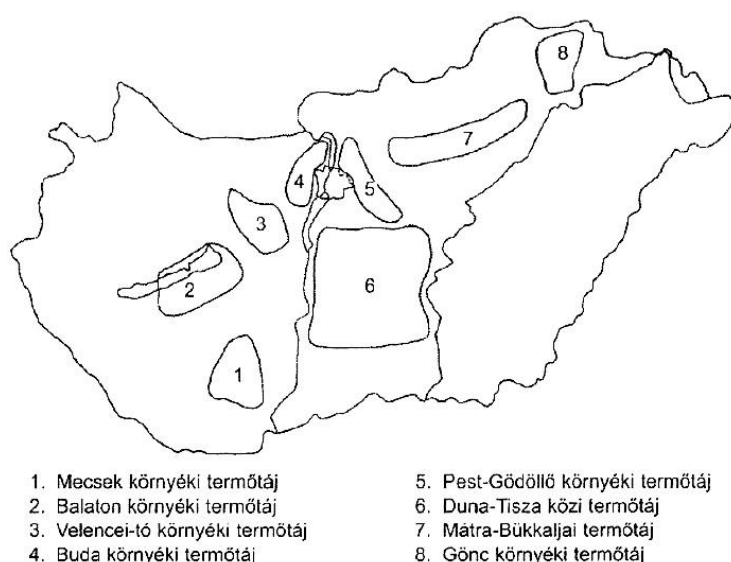
A gyümölcscsszüret idejének meghatározására előrejelző, terepi mérő, és laboratóriumi módszerek léteznek [2]. Az előrejelző módszereket (pl. fővirágzástól eltelt napok száma, napfényes órák száma stb.) további technikákkal kell társítanunk (pl. penetrométeres gyümölcshúskeménység-mérés, kálium-jodidos keményítőpróba) a megbízhatóság javítása érdekében. A betakarítás fő irányelve, hogy a termés a gyümölcsfáról a legrövidebb idő alatt, a legrövidebb úton és a legkisebb mértékű minőségromlás mellett kerüljön a felhasználás vagy tárolás helyére [2]. Kézi szedést főként a minőségi gyümölcsöt termelő ültetvényeken alkalmaznak, míg a szedés gépi megoldásai (pl. rázógép és gyűjtőponyva) elsősorban ipari feldolgozásra szánt gyümölcsök esetében jellemzőek. A betakarított gyümölcsök fajra, fajtára jellemzően különböző eltarthatósággal rendelkeznek és eltérő szállítási és tárolási körülményeket igényelnek (tárolási hőmérséklet, páratartalom, termen belüli gázösszetétel, légcserre megoldása stb.) [2]. A betárolt készlet minőségét fontos figyelemmel kísérni, hiszen a tárolás alatt jelentős apadási és romlási veszteség jelentkezhet. A betakarított ízletes, jó minőségű gyümölcsöt csak osztályozást követően, praktikus kiszerelésben tetszetősen csomagolva van

lehetőségünk eredményesen értékesíteni [2]. A szupermarketek gyümölcsértékesítésben betöltött arányának növekedésével ez a szempont egyre nagyobb jelentőségre tesz szert [1] [2].

2.1.3 A kajszi termesztése

Szakdolgozatom elkészítéséhez egy Balaton-felvidéki kajsziültetvényen végeztem adatgyűjtést, így ebben a részben a gyümölcsfaj sajátos ökológiai igényeit, termesztési rendszerét és termesztéstechnológiai jellemzőit szeretném röviden összefoglalni.

A Közép-Kelet Ázsiából származó kajszi (*Armeniaca vulgaris*) Európában és Magyarországon egyaránt a legkeresettebb, jól értékesíthető gyümölcsök közé tartozik [3]. A magyar kajszi hungarikum gyümölcsünk, ízében, zamatában kiemelkedik nemzetközi versenytársai közül, ennek megfelelően tartósan magas áron értékesíthető kertészeti exporttermékeink egyike [7]. Termesztése hazánkban 5500 hektáron zajlik, éves termelési volumenünk 20-40 ezer tonna körül alakul, amelynek kb. 10-20% részét külföldre szállítjuk. A magyar kajszi fő exportpiaca Németország és Ausztria [3].



1. ábra. A kajszi hazai termőtájai. [6]

Termesztése kezdetben a Duna-Tisza közén indult meg a futóhomok megkötésével összefüggésben, gyakran szőlőhöz társítva, úgynevezett kétszintes kultúrákban [1] [6] [7]. Az Alföld szélsőségesebb klímája következtében azonban a termelés túlsúlya biztonságosabb borsodi termőhelyekre

tevéődött át: ma Gönc település környékén termeljük a hazai kajszi nagy részét. (Termőtájaink áttekintését adja az 1. ábra.) Mivel hazánk a gazdaságos termesztés északi határán helyezkedik el [2] [3] [6], a kajszi téli és főként a tavaszi fagyokra mutatott

érzékenysége erősen ingadozó termésmennyiséget, alacsony termésbiztonságot okoz. A hazai ültetvényszerkezet legnagyobb részét továbbra is a hagyományos, nagy térállásra telepített gyümölcsösök adják. Célként fogalmazható meg, hogy intenzív művelési rendszerek meghonosításával, a magyar fajták megőrzésével és külföldi fajták ésszerű mértékű betelepítésével rendszeresen elérjük a 15 t/ha-os termésmennyiségeket [3].

A kajszi számára a későbbi tavaszi felmelegedés és a hideg levegő lefolyása folytán kedvezőbbek a dombvidéki termőhelyek (Északi-Középhegység, Gödöllői-dombság, Balaton-felvidék). A déli helyett északi-északnyugati kitettségű domboldalak választása javasolt alacsonyabb téli hőingadozásuk miatt [3] [6]. Származása folytán a kajszi meleg- és fényigényes gyümölcsfaj, a -20 Celsius-fokot meghaladó téli fagyok és a tavaszi felmelegedéssel váltakozó átmeneti lehűlések súlyos károkat, termésvesztéseket okoznak. Szárazságtűrése viszonylag jó, csapadékgigénye közepes (500-600 mm) [3]. A faj ökológiai tényezőkkel szembeni érzékenysége összességében kiemelkedő, sikeres termesztését jelentős kockázatok fenyegetik. (1. táblázat).

1. táblázat. A kajszi ökológiai tűrőképessége. [2], 42. o. A magasabb értékek kiemelt érzékenységet jeleznek. A 4-es összevont pontértéket kapó fajok rendelkeznek a legcsekélyebb ökológiai rugalmassággal. További 4-es skálaértékű gyümölcsfajok pl. a szamóca, körte, gesztenye és mandula.

Alkalmazkodás		Fagytűrés		Tavaszi fagykár valószínűsége (1–5)	Összevont pontérték
Talajhoz (1–5)	Éghajlathoz (1–5)	Mélynyugalomban (1–5)	Kényszernyugalomban (1–5)		
2	4	4	5	5	4

A hazai kajszifák többségét mirobáln alanyra oltják, ami erős növekedést biztosít az oltványnak, és a nagyon köves és száraz talajokat leszámítva bárhol jól termesztethető. A vadkajszi mélyebben gyökerezik, erős-igen erős növekedésű, főként az alföldi területek szárazságot jól tűrő jellemző alanya [3]. A magyar kajszi előnyös ízvilága, zamata és beltartalmi tulajdonságai mellett puha húsú, sérülékeny és nehezen szállítható. A hazai fajták közül legnagyobb arányban a „Gönci magyar kajszit”, a „Ceglédi óriást” és a

„Magyar kajszit” termesztjük [2] [3] [6]. Az elmúlt időszakban fajtasortimentünkben június elejétől egészen szeptemberig szóródó érési idejű külföldi fajták jelentek meg (pl. „Bergarouge”, „Pinkcot”, „Big Red”), amelyek a hagyományos magyar fajtáknál általában jobban tűrik a tárolást és áruvá készítést [3]. Fontos megjegyezni, hogy a hazai nemesítői munkának köszönhetően mára több olyan fajtával rendelkezünk, ami a külföldiekhez hasonlóan vevőcsalogató küllemű és keményebb húsú (pl. „Ceglédi napsugár”, „Ceglédi szilárd” stb.) [3].

A kajszit esetében máig jellemzőek a természetes vagy gömbkoronás ültetvények 8 x 6 méteres sor- és tőtávolsággal [2] [3]. A korszerűbbnek mondható váza vagy kompakt váza korona esetén sűrűbb térállás alkalmazható (6 x 4 és 5 x 3 m). A fa jól viseli az akár többéves metszetlenséget, a mesterséges beavatkozásokat érdemes a fa természetes növekedését, formáját és felépítését szem előtt tartva, a megvilágítottság javítására és a termésmennyiség szabályozására korlátozni. A rügyek számának csökkentésével a fán maradó gyümölcsök fejlődési lehetőségeit, valamint a rendszeres hozamok elérési esélyét javítjuk. A túlzottan erős metszésre a kajszit szabálytalan, a fény-árnyék viszonyokat rontó növekedési reakciókkal reagál. Évenkénti metszést a fák fiatal korában alkalmazunk, termőkorban inkább a gallyritkítás dominál, amit fajtától függően 3-5 évente ágritkítással vagy -visszametszésekkel (ifjítás) egészítünk ki. Hosszú (60-80 cm) vesszők megtartása a koronában a későbbi virágbontás miatt hatékonyan segítheti a fagykárok kivédését. A téli metszést a rügyfakadás és virágzás között, a nyárit a szüret utáni 2-3 héten belül célszerű elvégezni [2] [3]. Mivel a kajszit kiemelten hajlamos a szakaszos terméshez a nagy virágsűrűségű és gyümölcsberakódású fajták miatt [3] [6] [7], a fiatal gyümölcsök ritkítása (akár 50-80% eltávolítására is szükség lehet!) kulcsfontosságú ápolási művelet, amit 3-4 héttel virágzás után végzünk.

Sekély gyökerezése miatt kajszit esetén kerülni kell a mély talajművelést. A gyökerek levegőigénye folytán ugyanakkor 2-3 évenként célszerű mélylazítást alkalmazni. A sorközöket gyepesítsük, a facsíkakat vegyszeresen vagy mechanikai módszerekkel műveljük [3].

A kajszit számára legfontosabb tápelem a kálium jelenti, mely fontos szerepet játszik a stressztűrő képesség fokozásában, a gyümölcs minőségének, ízének, színének

kialakításában [3]. A faj nem nitrogénigényes, 2% feletti humusztartalom esetén nincs szükség N trágyázásra. Foszforigénye ugyancsak alacsony, ugyanakkor mészkedvelő és jelentős mennyiségű szervesanyagra van szüksége, amit szerves trágyázással biztosíthatunk. Vízigénye közepes, vízfelhasználása május-június hónapban, a gyümölcsök növekedése és a csonthéjképződés időszakában a legmagasabb. Kajsziültetvényben csepegtető öntözési mód javasolható [3].

A kajszi legfontosabb betegségei a vírus kiváltotta kajszihimlő, a feltehetően komplex háttérű gutaütés, a fitoplazma fertőzés (lásd bővebben a következő fejezetben), monília betegség, sztigminás betegség, apiogomóniás levélfoltosság és a kajszirozsa [3] [6]. A legjelentősebb kártevők a barackmoly, keleti gyümölcsmoly, a fitoplazma elsődleges természetes vektoraként azonosított szilva-levélbolha, illetve a kéregmoly. A kajszi termesztés egyik legfontosabb kockázati tényezője az elmúlt évtizedben több hazai gyümölcsöst akár igen ijesztő méretekben (30-40%) sújtó hirtelen fapusztulás [3] [7]. A jelenség etiológiája, mechanizmusai nagyrészt tisztázásra várnak, valószínűsíthetően a régebről ismert és az újonnan figyelmet kapó kórokozók egyaránt szerepet játszhatnak benne. Általános bevezető tünetei a fák növekedésének gyengülése, a levelek sárgulása, kanalasodása, amit a fa egy részének vagy egészének pusztulása követ. A fapusztulás hatását a technológiai elemek összehangolásával mérsékelhetjük (kiváló növényi kondíció fenntartása, magas szintű ültetvényhigiénia kialakítása a fertőzött növényi részek eltávolításával, sebkezeléssel, meszeléssel, tisztítással stb.) [3]. A további, hagyományosabb kajszi betegségek ellen a megfelelő minőségű szaporítóanyag választásával (kajszihimlő), vegyszeres védekezéssel (monília), feromon csapdák kihelyezésével (molykártevők) védekezhünk [3].

A kajszi fán beérő, elhúzódó érésű gyümölcs (10-15 nap), kismértékű utóérő képességgel rendelkezik [3]. A friss fogyasztási célú gyümölcsöket kézzel, az ipari felhasználásra (konzerv-, szeszipar) szánt tételeket általában gépesítve takarítjuk be. Fontos ügyelni a szüret időzítésére: a gyümölcsök érési foka jelentős hatással van a szállíthatóságra és eltarthatóságra. Korszerű üzemi környezetben lehetőség van a kajszi szállítószalagos gépsoron történő, méret, tömeg és színezettség alapján történő automatikus osztályozására, amely célszerű kiserelésű, tetszetős, színvonalas csomagolással jó esélyeket teremt a piaci versenyhez [2] [3].

2.1.4 A fitoplazmák jellemzői, az általuk okozott növénybetegségek tünetei, és gazdasági jelentőségük

A fitoplazmák a növények prokarióta egysejtű kórokozói, amelyek törzsfejlődésüket tekintve közeli rokonságban állnak a DNS-ükben alacsony guanin és citozin (G+C) aránnyal jellemezhető Gram-pozitív baktériumokkal [8]. 1967-es felfedezésükig az általuk okozott megbetegedéseket a tüneti kép alapján tévesen vírusfertőzésnek tulajdonították [9]. Rendszertani besorolásukat molekuláris biológiai módszerek segítségével az 1990-es években sikerült pontosítani. A *Mollicutes* osztály, *Acholeplasmatales* rend és *Acholeplasmataceae* családon belül ekkor nyerték el a *Candidatus phytoplasma* elnevezést, mint nemzetség szintű taxon [10]. Napjainkban a 16S rDNS szekvencián alapuló PCR elemzés jelenti a fitoplazmák azonosításának és további csoportosításának korszerű módszerét [8]. A kajszi szempontjából különös jelentőségű a *Candidatus phytoplasma prunorum*, mint a csonthéjasok európai sárgulásának (European stone fruit yellows, ESFY) kórokozója, amely Közép- és Dél-Európában, így hazánkban is egyre aggasztóbb mértékű pusztítást okoz a csonthéjas ültetvényekben [11] [12] [4].

A fitoplazmák méretük szerint a kisebb baktériumokhoz hasonlóak, átmérőjük 200 és 800 nm között mozog, genomjuk kb. 680-1600 kilobázis terjedelmű. Nem rendelkeznek szilárd sejtfallal, többrétegű plazmamembrán határolja őket. E tulajdonságuk lehetővé teszi alakjuk rugalmas változtatását, amely valószínűleg előnyt jelent a környezetükhöz való alkalmazkodásban, illetve összefüggésben állhat obligát parazita életmódjukkal [8]. Mivel a túléléshez és szaporodáshoz szükséges több anyagcsere útvonaluk hiányzik (pl. nem rendelkeznek aminosavak bioszintéziséhez szükséges génekkel, nem képesek oxidatív foszforilációra stb. [11]), a fitoplazmák életfeltételeiket csak gazdafajaik szöveteinek megfertőzésével találják meg. A kórokozó a növények háncsszövetének sejtjeiben él, szaporodik, és terjed szét a teljes gazdaszervezetben. A fertőzött növények nedveit szívogató rovarok vektorokként kulcsszerepet játszanak a fitoplazmás betegségek terjesztésében. Kutatási eredmények alapján a csonthéjasok európai sárgulásának továbbadásában a szilva-levélbolha (*Cacopsylla pruni*, 2. ábra) bizonyult elsődleges természetes vektornak, amelynek életmódjáról csak az elmúlt két évtizedben jelentek meg hazai adatok [4] [13]. A fitoplazma a rovar beleiből fokozatosan további belső szervekbe

jut, míg végül 2-8 hetes látens időszakot követően a nyálmirigyeket is elárasztva fertőzőképessé teszi gazdáját, amely így egészséges növényeken táplálkozva továbbadja a kórokozót. A fertőzés jellemzően az érintett fák körül körkörös mintázatban terjed.

A fitoplazma infekció a növények hormonháztartásának és szénhidrát anyagcseréjének súlyos megzavarásával jár, következménye a háncsszövet rostacsöveinek progresszív elzáródása, amely a fertőzésre reagáló növény egyik védekező mechanizmusa [8] [11]. Az elzáródás akadályozza ugyan a fitoplazmák szisztémás terjedését, ugyanakkor az asszimilációs termékek áramlását is megszakítja, amelynek következményeként a levelekben kóros szénhidrát-felhalmozódás lép fel, míg a gyökérzet nem jut elegendő tápanyaghoz. A folyamat vége súlyos esetben a növény érintett ágainak vagy egészének pusztulása. Bizonyos szerzők a fotoszintetikus fehérjék termelődésének gátlásáról és a levelek klorofill-tartalmának csökkenéséről számoltak be fitoplazma-fertőzött növényekben [8]. A kórokozó jelenléte morfológiai változásokhoz és egyéb látható tünetek kialakulásához vezet az érintett gyümölcsfákon, amelyek kezdetben „csak” mennyiségi (hozamkiesés) és minőségi (torz, módosult beltartalmú gyümölcsök) károkat szenvednek, súlyosabb esetben azonban akár a fák tömeges pusztulása is bekövetkezhet. A fitoplazmózis legjellegzetesebb tünetei összefoglalva a következők [9] [11]:

- a) a szénhidrát anyagcsere megzavarása és a fotoszintetikus fehérjék leszabályozása következtében kialakuló levélsárgulás
- b) megvastagodott, a kajszi esetében felfelé kanalasodó levelek (2. ábra)
- c) a virágok helyett levélszerű képletek (ellevelesedés) vagy pigmenthiány miatt zöld színű virágok fejlődnek
- d) túl korai vagy késői virágzás, levélbontás, korai lombhullatás
- e) boszorkányseprűsödés (proliferáció) a csúcsdominancia elvesztése miatt, friss hajtások tömeges megjelenése a törzs alsó részén
- f) elszíneződő, elhaló háncsszövet, kéregvastagodás a rostacsövek elzáródásának helyén
- g) a normálisnál jelentősen kisebb méretű, belül elszíneződött gyümölcsök, megnyúlt gyümölcscsászár

Mivel a felsorolt tünetek egy része nem specifikus a fitoplazma-fertőzésre, a terepi szemle során javasolt legalább három jellemző tünet egyidejű megfigyelése a betegség gyanújának megállapításához, biztos diagnózis ugyanakkor csak PCR módszerrel nyerhető [11]. A fitoplazma-fertőzés rendkívüli gazdasági károkat okoz az európai csonthéjas gyümölcsstermesztésben, Magyarországon először 1992-ben figyelték meg, azóta Pest, Fejér, Somogy, Bács-Kiskun, és Borsod-Abaúj-Zemplén megyében egyaránt megjelent [9] [4] [5]. Legsúlyosabb hazai következménye eddig a gönci kajszitermelő régió rendkívüli pusztítása volt [5]. Mivel nem létezik a kialakult fertőzés hatékony kezelésére képes növényvédelmi technológia, a védekezés lehetősége a megelőzésben rejlik [12] [4]. Elsődleges fontosságú a fertőzést terjesztő rovarvektorok, elsősorban a szilva-levélbolha elleni védekezés, beleértve inszekticidek használatát, illetve a toleráns, a rovar számára telelőhelyet nyújtó növényfajok (pl. kökény, cseresznyeszilva) termőterület körüli egyedeinek megfigyelését és szükség szerinti eltávolítását. A fitoplazmára érzékeny gyümölcsfák túlnyomó többsége elpusztul a fertőzés következtében, spontán tünetmentesség csak az esetek kis részében alakul ki [12]. Az érintett egyedek akár éveken át a fitoplazmózis új forrásává válhatnak, így az ültetvényből való eltávolításuk rendkívüli jelentőségű. A gyümölcsfák sokéves életciklusa miatt minden egyes egyed elvesztése jelentős gazdasági kárt okoz, így egyre nagyobb igény mutatkozik a fertőző betegségek, így a fitoplazmák által kiváltott tünetek gyors és hatékony detektálására képes megoldások iránt. Ígéretes módszert jelent a pilóta nélküli légi járművek segítségével végzett légi távérzékelés, mely napjainkra több tanulmány tapasztalatai alapján bizonyította hatékonyságát. Egy ghánai kókuszpálma termőhelyen a fitoplazmás letális sárgulás általi fertőzöttség felmérésére használják a technológiát [14], míg Dél-Franciaországban jó hatékonysággal nyújtott lehetőséget az aranyszínű sárgasággal (flavescence dorée) érintett és tünetmentes szőlőtővek automatizált elkülönítésére [15]. A következőkben a különböző távérzékelési módszereket tekintem át, különös tekintettel az UAV platformokra.



2. ábra. A *Ca. phytoplasma prunorum* kórokozó által kiváltott csonthéjasok európai sárgulásának (European Stone Fruit Yellows, ESYF) legfontosabb természetes vektora, a szilva-levélbolha (*Cacopsylla pruni*, A) és a betegség tünetei fertőzött kajszifákon (kanalasodó, B, és száradó, elszíneződő levelek, C). A képek forrása: A: http://novi.atk.hu/hu/kut_prog_az_esfy_fitoplazmas_betegseget_terjeszto_cacopsylla_pruni_hazai_monitorozasa (elérve: 2022. 11. 20., fotó: Dr. Viczián Orsolya); B: [11], C: [16].

2.2 A távérzékelés fizikai alapjai, szenzorok és platformok

A távérzékelés különleges adatgyűjtési eljárás, amelynek során anélkül jutunk adatokhoz vizsgálatunk tárgyáról (földfelszín, felszínen elhelyezkedő tárgyak), hogy azzal közvetlen kapcsolatba kerülnénk [17] [18] [19]. Az adatnyerés közvetítője az elektromágneses sugárzás, amely állandó sebességgel (fénysebesség), szinusz hullám formájában terjed. Egyértelmű meghatározásához két változót használhatunk: a sugárzás hullámhosszát (két szomszédos hullámcsúcs közötti távolság) és frekvenciáját (egy adott ponton időegység alatt áthaladó hullámcsúcsok száma), amelyek fordítottan arányosak egymással. Az elektromágneses sugárzás természetes (Nap, földfelszín) vagy mesterséges forrásból (pl. radar) származik. A Napból kiinduló, majd a felszín által visszavert (reflektált) sugárzás mérésén alapuló rendszereket passzív, míg a saját energiaforrással rendelkező, és a maguk keltette elektromágneses sugárzás visszaverődését érzékelő megoldásokat aktív távérzékelési rendszereknek nevezzük (pl. LiDAR – light detection and ranging) [17] [18]. Az elektromágneses sugárzás fizikai törvényszerűségek mentén leírható kölcsönhatásba lép a légkörrel (szóródás, elnyelődés) és a vizsgált tárggyal (visszaverődés, elnyelődés, áthaladás). A felszínre eső, majd onnan

visszavert sugárzásnak el kell jutnia a távérzékeléshez használt érzékelőig, amely során újabb utat tesz meg a légkörben. E folyamatok eredményeként a szenzor által mért energiamennyiség csökken, illetve zajjal szennyeződik, amelynek következtében romlik a felvételeken megjelenő objektumok elkülöníthetősége [17]. A távérzékelési célra leinkább használható hullámhossz-tartományok e kölcsönhatásokkal összefüggésben különíthetők el: ezek az emberi szem által látható fény (visible light, VIS, 0,4-0,7 μm), a közeli- (near infra-red, NIR, 0,7-1,3 μm), közép- (middle infra-red, MIR, 1,3-3 μm), távoli/hő infravörös (thermal infra-red, TIR, 3-15 μm), és a mikrohullámú (1 mm – 1 m) tartományokban húzódnak [17] [18]. TIR tartományban a testek által visszavert helyett már az általuk hőszugárzás formájában kibocsátott (emittált) infravörös energiát mérjük [17]. Mikrohullámok használata esetén a légkör hatása elenyésző, így a felvételezés gyakorlatilag függetlenedik az időjárási körülményektől vagy a napszaktól [17] [20].

A távérzékeléses adatgyűjtéshez használt érzékelők legfontosabb jellemzői a téri, spektrális, és radiometria felbontás [18] [19] [20]. Közülük az első a használt képpontok száma függvényében határozza meg a felvételeken azonosítható legkisebb részlet méretét, a második a szenzor által érzékelt hullámhossz-sávokat, azok szélességét jelenti. Ha egy vizsgált tárgy fizikailag apró vagy nagyon szűk hullámhossz-tartományban ver vissza vagy bocsát ki energiát, megfelelően nagy geometriai és spektrális felbontású szenzorra van szükségünk a vizsgálatához. A radiometria felbontást az érzékelő képpontjaira eső energia mérési tartományának minimum és maximum értékei közötti fokozatok számával fejezhetjük ki [17]. A legelterjedtebb a 256 egységre vagy „árnyalatra” bontott tartomány (8 bit). A távérzékeléses adatgyűjtési folyamat további fontos meghatározó jellemzője az idői felbontás (visszatérési idő), amit a vizsgálati tárgyról készített két egymást követő felvétel között eltelt időtartam határoz meg [17] [20]. Gyorsan változó jelenségek nyomon követéséhez (pl. erdőtűz terjedése, földcsuszamlás) sűrű visszatérési idejű felvételezési módszert kell használnunk. A távérzékeléshez használt szenzorokat csoportosíthatjuk az érzékelt hullámhossz-tartományok alapján [18] [20] [19]: a leggyakrabban alkalmazott RGB érzékelők a fényképezőgépek és okostelefonok kamerájához hasonlóan a látható tartomány vörös, zöld és kék sávjában gyűjtenek adatot. A multispektrális szenzorok több szűk, a vizsgálat tárgyára nézve releváns adatokat közvetíteni képes hullámhossz-sávot érzékelnek

(általában a VIS és NIR tartományból), míg a napjainkban intenzív fejlesztés alatt álló hiperspektrális képalkotás több száz, igen szűk (5-10 nm) sávot detektáló képérzékelőkön alapszik. E változatokhoz társulnak a TIR tartományra jellemző hőszugárzást érzékelni képes detektorból és optikai lencséből álló hőkamerák. A kiválasztott szenzortípust a tervezett felhasználási célnak megfelelően többféle platformon helyezhetjük el: a legfontosabb kategóriákat a földfelszíni (kézi, járműre szerelt), légi (hagyományosan repülőgép, az utóbbi években egyre gyakrabban pilóta nélküli légitánc, azaz drón) és űrtávérzékelési (műholdakra szerelt mérőműszerek) jelentik [17] [18].

Az adatgyűjtés során előállított nagy mennyiségű adat feldolgozása, értelmezése és megjelenítése (döntéseket támogató információvá alakítása) a távérzékelés második, kulcsfontosságú összetevője [17]. Ezt napjainkban az egyre fejlettebb szoftverekkel történő személyi számítógépes feldolgozáson túl felhő alapú tárolási és elemzési szolgáltatások, óriási adatmennyiségek kezelésére optimalizált megoldások (big data), és az adatrengetegben rejlő többdimenziós összefüggések felismerésre képes mesterséges intelligencia alapú módszerek (gépi tanulási algoritmusok) teszik egyre hatékonyabbá [18] [19] [20]. A fejlett eszközök helyes alkalmazása a felhasználók kiemelkedő felkészültségét igényli, amit fontos megfelelő képzéssel biztosítani.

2.2.1 A pilóta nélküli légitáncokkal (UAV) végzett távérzékelés és alkalmazási lehetőségei a gyümölcstermesztésben

A digitális vagy precíziós gazdálkodás nagy mennyiségű adat gyűjtése és feldolgozása segítségével lehetővé teszi, hogy a termesztéstechnológia elemeit a termesztett kultúra és az adott termőhely sajátosságait maximálisan figyelembe véve alkalmazzuk [20]. Az informált döntések (milyen műveletet, mely területen, mikor és milyen mértékben szükséges végezni) a termelés hatékonyságának növelésével egyszerre mérséklék az ágazatra jellemző munkaerőhiány hatásait, elősegítik a jövedelmezőség elérését, és csökkentik a környezet terhelését. A mezőgazdasági termelés támogatására a földfelszíni, légi és űrtávérzékelési módszerek, mint precíziós gazdálkodási elemek, egyaránt alkalmasak, alkalmazásuk bizonyos esetekben több évtizedes múltat tekint vissza. (Az első multispektrális megfigyelőrendszert hordozó [Mutispectral Scanner System, MSS] Landsat műhold indítása 1972-ben, pontosan fél évszázada történt. [21]) Jellemző

technikai paramétereik folytán a módszerek mindegyike rendelkezik erősségekkel és gyengeségekkel, így minden esetben a felhasználási cél függvényében szükséges választani közülük.

A távoli bázisállomásról távirányítással működtetett pilóta nélküli légi járművek (UAV, drón) mezőgazdasági célú távérzékelési használata több összefoglaló tanulmány adatai alapján 2015-től kezdődően gyorsuló ütemben terjed [19] [20]. Khanal és munkatársai [20] összesítése szerint a 2019-ben megjelent távérzékelési témájú tudományos közlemények kb. egy ötödében (110 darab, főként európai publikációban) alkalmaztak UAV-t. A platform növekvő népszerűségét számos előnyös tulajdonsága magyarázza. Az UAV-k jellemzően kis méretű és tömegű, alacsony repülési sebességű, viszonylag csekély beruházási költségű és olcsón üzemeltethető eszközök [18] [19] [20]. Az elmúlt évtized technológiai fejlődésének köszönhetően (részegységek miniatürizációja, telekommunikációs megoldások, akkumulátorok fejlesztése) mára érett technológiai megoldásnak tekinthetjük őket. Rendkívüli rugalmasságuk jól tetten érhető fizikai kialakításuk különbségeiben. Napjainkban a multirotoros változataik a legelterjedtebbek, amelyeket 2, 4, 6 vagy 8 darab szimmetrikusan elhelyezett forgószárny tart, illetve mozgat a levegőben. E változat fontos előnye a lebegési és függőleges fel- és leszállási képessége, ugyanakkor mechanikai összetettsége és relatíve magas energia-felhasználása miatt korlátozott repülési idővel (hatótávolsággal) rendelkeznek. Az UAV-k másik csoportja merevszárnyas kialakítású, formájában a hagyományos repülőgépeket idézi. E típus a forgószárnyas változatnál lényegesen körülményesebben alkalmazható (a levegőbe juttatás és leszállás nagy helyigényű, a felszálláshoz szükséges kezdősebességet biztosítani kell stb.), ugyanakkor magasabb sebességénél és energiahatékonyságánál fogva lényegesen jobb területteljesítményre képes a távérzékelési műveletek során. A két fő típus közt hibrid megoldások is léteznek, amelyek sárkányszerkezetüket tekintve merevszárnyas társaikhoz hasonlítanak, azonban segítő forgószárnyakkal rendelkeznek, amelyek lehetővé teszik a függőleges fel- és leszállást, majd állásukat változtatva hozzájárulnak a levegőben maradáshoz szükséges felhajtóerő előállításához. Fizikai megjelenésüktől függetlenül a drónok általános jellemzője a rugalmas alkalmazhatóság [18] [19]. Gyorsan és ismételten bevetethők, változatos környezeti körülmények közt képesek megbízhatóan üzemelni (redundáns kritikus komponensek [pl. repülésvezérlő,

iránytű], fejlett fedélzeti GNSS technológiák, akadályérzékelő szenzorok alkalmazása stb.), repülési magasságuk széles határok közt változtatható. A bennük rejlő lehetőségek optimális kiaknázásához műszaki paramétereiken túl a támogató jogszabályi háttér is kulcsfontosságú, amelynek (ki)alakítása az Európai Unióban, így hazánkban jelenleg is zajlik.

Az UAV-k fejlett technológiai megoldásaik ellenére önmagukban „egyszerű” repülő platformnak tekinthetők. Távérzékelési alkalmazhatóságukat a rájuk rögzített kamera és a benne elhelyezett képérzékelő tulajdonságai határozzák meg. Napjainkban egyaránt léteznek összeépített, műszaki egységet képező megoldások, illetve portokkal és az azokra csatlakoztatható, választható, cserélhető kamerákkal (objektívekkel) jellemezhető UAV rendszerek. (Az elérhetőbb árkategóriájú drónok elsősorban az előbbi, a robosztus, ipari feladatokra szánt eszközök az utóbbi csoportba tartoznak.) Az UAV-k egyformán hordozhatnak RGB, multispektrális, hiperspektrális, vagy hőkamerákat, közülük alacsonyabb áruk miatt a látható tartományú képalkotásra alkalmas eszközök a legelterjedtebbek. A repülési magasság és a hordozott kamerák tulajdonságainak függvényében az UAV-k néhány centiméteres (kb. 1-20 cm) felbontású terepi mintavételezésre képesek, így ideálisan kitöltik a földfelszíni használatú távérzékelési szenzorok (<1 cm) és a műholdas távérzékelés (0,5 – 30 m) térbeli felbontása közötti űrt [18]. Az előbbiekkal összevetve legfontosabb erényük nagyobb hatékonyságukban rejlik (időarányos területteljesítmény), az űrtávérzékelés eszköztárával szemben pedig megbízhatóbb alkalmazhatóságukat fontos kiemelni (tetszőlegesen választott időpontú és számú repülés, a felhőzet önmagában nem jelent gondot stb.). A műholdakra telepített eszközökkel több évtizede végzett távérzékelési gyakorlat kulcsfontosságú erősségei ugyanakkor az egységes adatgyűjtési és képfeldolgozási protokollrendszerek, illetve a gyűjtött adatok széles körű elérhetősége, amelyek az UAV-k alkalmazási területein egyelőre közel teljes mértékben hiányoznak [20].

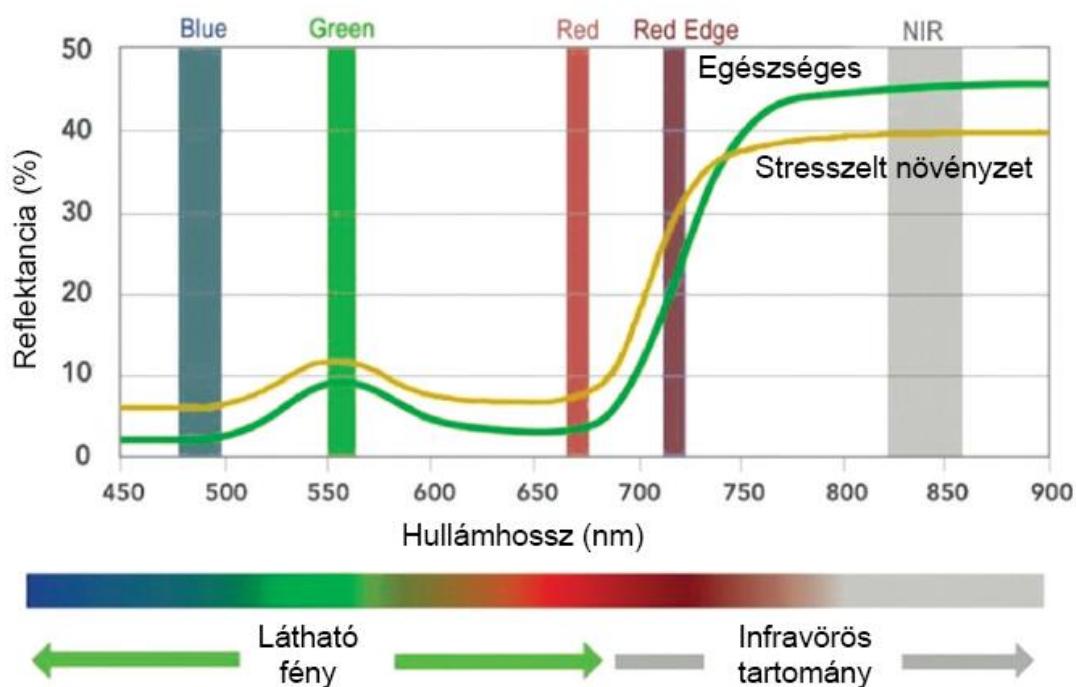
A fentiekben összefoglalt tulajdonságaik a drónokat kiemelten alkalmassá teszik a mezőgazdasági munkavégzés számos műveletének hatékony támogatására. Zhang és munkatársai 84 darab tudományos közleményt áttekintve az UAV-k öt nagy felhasználási területét azonosították a gyümölcstermesztésben [19]. Ezek a következők:

1. gyümölcsfák geometriai tulajdonságainak vizsgálata (pl. koronaátmérő, koronavetület), amelyek lehetővé teszik a fák fejlődésének nyomon követését, illetve bizonyos termesztéstechnológiai elemek (pl. metszés) időzítésének vagy hatásosságának meghatározását, ellenőrzését
2. termelékenység felmérése, hozambecslés (a virágok vagy gyümölcsök számának, sűrűségének és a gyümölcsfák spektrális jellemzőinek mérése révén)
3. erőforrás-hasznosítás monitorozása (öntözési célú vízfelhasználás optimalizálása az ültetvény fáit érintő vízstressz indirekt mérésével, a tápanyag-gazdálkodás támogatása)
4. beteg gyümölcsfák azonosítása geometriai jellemzőik vagy spektrális tulajdonságaik megváltozása alapján
5. egyéb UAV-felhasználási módok, mint pl. permetezés, menedzsment zónák lehatárolása stb.

A növénybetegségekkel érintett gyümölcsfák távérzékeléses azonosítása úttörő felhasználási módnak számít: Zhang és munkatársai mindössze nyolc olyan publikációt azonosítottak az elmúlt másfél évtizedből, amelyek ezzel a problémával foglalkoztak [19]. A növényeket veszélyeztető betegségek kiváltó okaikat tekintve lehetnek biotikusak (élő kórokozók, pl. vírusok, baktériumok, gombák, fitoplazmák által kiváltottak) vagy abiotikusak (a gyümölcsfák és környezetük interakciójából pl. a talajvíz szennyezettségének következtében kialakuló). A két válfaj akár egyazon gyümölcsfában, egyszerre is megjelenhet [19]. A növénybetegségek jelentős hányada enyhe tünetekkel jár, bizonyos képviselőik azonban súlyos hozamkiesést, a gyümölcsök minőségének erőteljes romlását, vagy akár a teljes gyümölcsfa pusztulását okozzák, amelyek jelentős gazdasági kárral járnak a termelő részére. A betegségek ellenőrzés alatt tartásának első lépését a megelőzés jelenti, a másodikat az érintett egyedeknek a kórfolyamat minél korábbi szakaszában való azonosítása adja [4] [6] [18] [19]. Ezt hagyományosan terepi bejárással, az ültetvény fáinak vizuális szemrevételezésével és kézi mintavétellel végzik, amelyet laboratóriumi diagnosztikai elemzés követ. A folyamat nehézkes, a mintavételezés korlátozottsága miatt bizonytalan és rendkívül lassú, ezért nagy igény mutatkozna a teljes ültetvényt áttekinteni képes, gyors és költséghatékony, ugyanakkor kellő érzékenységű szűrési módszerekre [19].

Erre a célra a nagy felbontású RGB, multispektrális vagy hőkamerát hordozó UAV-k megfelelő technológiai megoldást kínálhatnak. Előbbiek rendkívül finom térbeli feloldóképességüknek köszönhetően alkalmasak lehetnek a fák geometriai jellemzőinek felmérésére, beleértve az ágak és levelek mennyiségében, formájában jelentkező kóros változások nyomon követését [19]. A hőkamerák növénybetegségek korai észlelésére való felhasználását az a tapasztalat alapozta meg, miszerint a fertőzött növényi részek hőleadása általában azelőtt nő, hogy a tünetek egyéb módszerekkel észlelhetővé válnának [20]. Az UAV-távérzékelés növényállapot-felmérési és növénybetegség-azonosítási alkalmazására ugyanakkor a kutatások többségében multispektrális (újabbban egyre gyakrabban hiperspektrális) képalkotásra képes eszközt használnak [19]. E módszer alapját a növények különböző hullámhossz sávokban mért eltérő reflektanciája adja, amelyet biológiai sajátosságok határoznak meg [17] [18] [20]. Az egészséges növényekre jellemző reflektancia görbe látható tartományra eső részén megfigyelhető lokális minimumok a kék (400 nm) és vörös (650 nm) fény nagyfokú elnyelése miatt alakulnak ki, ami összefügg a levelek klorofill aktivitásával. A zöld sávban (kb. 530 nm) ezzel szemben intenzívebb visszaverődés, lokális maximum mérhető – ennek köszönhető, hogy az emberi szem az egészséges vegetációt zöld színűnek látja. A görbe közeli infravörös tartományában megjelenő ugrásszerű reflektancia-emelkedést a levelek sejtszerkezete, szárazanyag-tartalma okozza. Végül, a közepes infravörös tartományra jellemző látványos lokális minimumokat (1,4 és 2,7 μm) vízelnyelési sávoknak nevezzük, mivel az itt mért reflektancia a levelek víz-abszorpciójával mutat összefüggést [17].

Egy betegséggel küzdő gyümölcsfa növekedése lelassul, fotoszintetikus aktivitása csökken, ami egyes képleteinek morfológiai átalakulásához, illetve spektrális tulajdonságainak megváltozásához vezet [17] [18] [20]. A növénybetegségek egyik gyakori tünete a levelek sárgulása (klorózis), amely a látható vörös hullámhossz sávban a normálisnál nagyobb mértékű, a közeli infravörös tartományban pedig lecsökkent reflektanciát eredményez – azaz, az egészséges növényre jellemző lokális minimumok és maximumok stressznek kitett vegetáció esetén közelednek egymáshoz [17] (3. ábra).



3. ábra. Az egészséges és a stressznek kitett növényzetre jellemző reflektancia-görbe a látható és a közeli infravörös tartományban. Módosítva innen: [22].

Az egyes hullámhossz-tartományok reflektancia-változásainak elkülönült vizsgálata helyett tehát célszerűbb azokat konfigurációkba rendezni és együttesen értelmezni, ami jelentősen növeli diagnosztikai hatékonyságukat. Ezt a célt szolgálják a vegetációs indexek, amelyek különböző hullámhossz sávokban mért reflektancia értékek arányait, különbségeit kifejező mértékegység nélküli mérőszámok [17] [18] [19]. Legfontosabb jellemzőjük a növények egyes biofizikai tulajdonságaival való szoros összefüggésük, ami lehetővé teszi, hogy az indexértékek kiszámításával közvetett úton információhoz juthassunk akár az individuális gyümölcsfák állapotáról. A máig legismertebb Normalizált Vegetációs Indexet (Normalized Difference Vegetation Index – NDVI) 1974-ben fejlesztették ki, számítása a közeli infravörös és a látható vörös sávokban mért reflektancia különbségének és összegének hányadosa: $NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$ [17] [18]. Leggyakrabban a termesztett növények állapotának, fejlődési szakaszainak és biomassa mennyiségének megbecslésére használják. A rendkívül népszerű NDVI index mellett számos további vegetációs indexet fejlesztettek ki az elmúlt évtizedekben, amelyek több esetben ellenállóak a távérzékeléses adatok értelmezését nehezítő

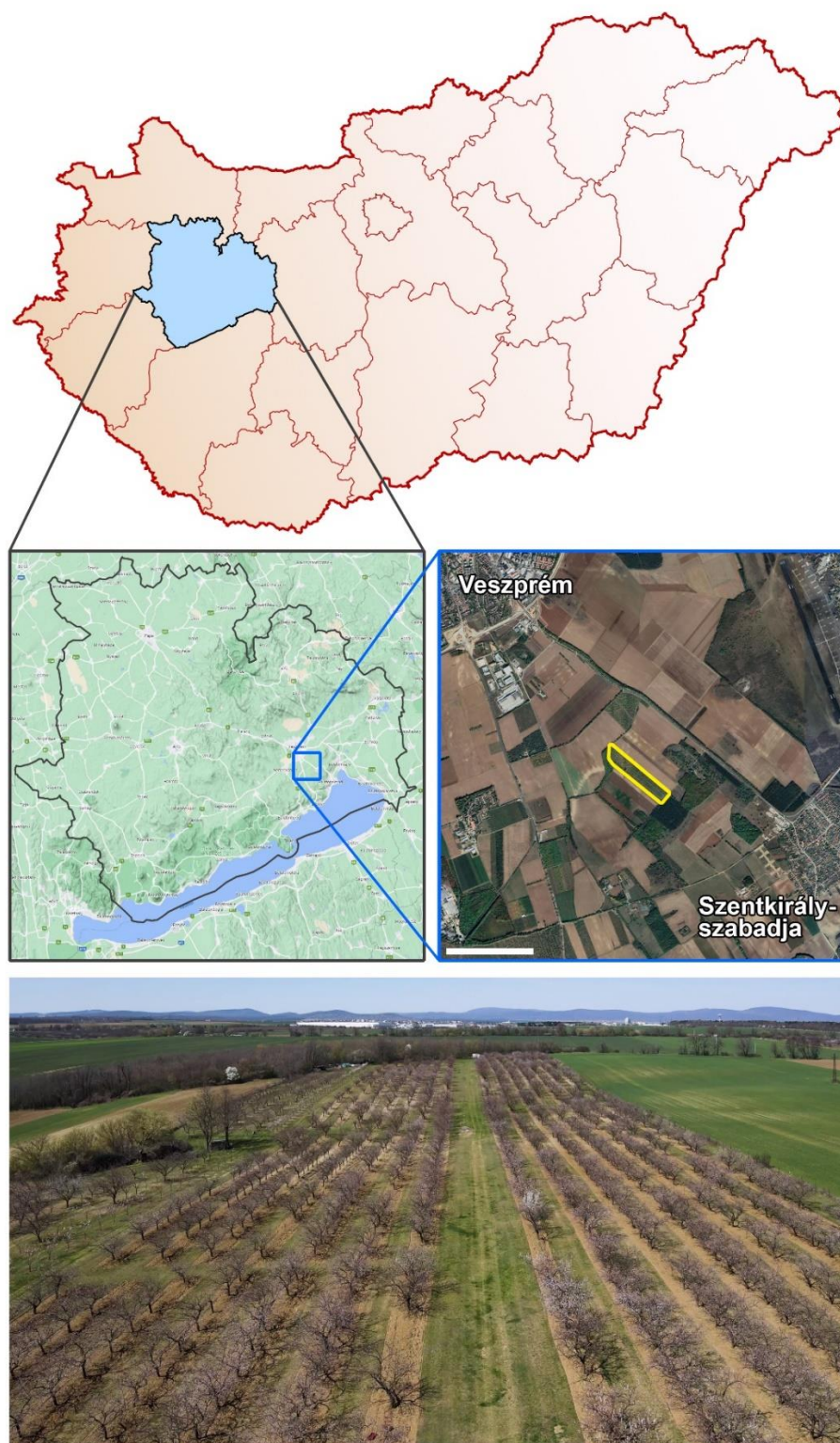
zajforrásokkal szemben (pl. VARI – Visible Atmospheric Resistant Index, SAVI – Soil Adjusted Vegetation Index stb.).

A vegetációs indexek számításához szükséges reflektancia-adatok UAV távérzékeléssel gyorsan és hatékonyan, jelentős területteljesítménnyel állíthatók elő. DadrasJavan és munkatársai 2019-ben végzett vizsgálatukban [23] citrus gyümölcsfák szűrését végezték multispektrális képalkotásra képes drón segítségével a citrusok zöldüléssel betegsége ellen (citrus greening disease, azaz Huanglongbing [HLB]). A növényi tetvek által közvetített bakteriális fertőzés progresszív termés kiesést és gyümölcsminőség-romlást eredményez. Alacsony repülési magasságból (25 m), öt hullámhossz sávban (R, G, B, RE [red edge, vörös él, 712-722 nm], NIR) készítettek magas részletességű felvételeket (1,7 cm/pixel térbeli felbontás), amelyek segítségével 16 féle vegetációs indexértéket számítottak ki. E számítások eredményét egy felügyelt gépi tanulási algoritmus (support vector machine, SVL) tanítására használták fel, amivel végül elvégezték a képpontok, így az individuális fák egészséges és HLB-vel érintett kategóriákba való klasszifikációját. Az elkülönítés pontossága elérte a 81,75%-ot, ami az alkalmazott módszer gyorsasága és egész ültetvényre kiterjedő jellege miatt robusztusnak és ígéretesnek mondható.

3. MINTATERÜLET, ESZKÖZÖK, MÓDSZEREK

3.1 A mintaterület

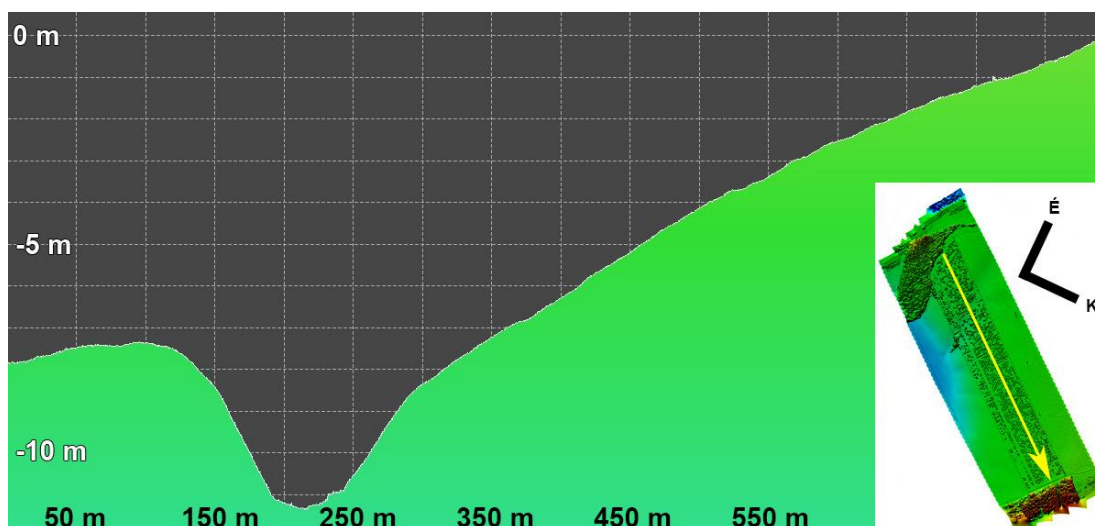
A szakdolgozati munkám mintaterületéül szolgáló kajsziültetvény a Balaton-felvidék keleti részén, Veszprémtől délkeleti, Szentkirályszabadjától északnyugati irányban, kb. 2-2 km távolságban, a 7217-es számú összekötő úttól hatszáz méterre található. (4. ábra). A trapéz alakú terület kiterjedése 11 ha, a sarokpontjait jelölő koordinátákat a 2. táblázat tartalmazza. Domborzati viszonyai változatosak (5. ábra), a legmagasabb pont az ültetvény déli szélén található (relatív 0 m), ahonnan észak felé haladva kb. 500 méteren át szelíd lejtő, majd a hossz tengely kb. $\frac{3}{4}$ részénél É-D-i irányban futó, déli lefolyású árok következik (kb. -12 m, szélessége kb. 100 m), déli és északi oldalain meredekebb lejtéssel. Az árok északi oldalától tovább haladva kb. 200 méter megtétele után elérjük az terület északi szélét (kb. -7 m). A terület jellemző genetikus talajtípusa a Ramann-féle barna erdőtalaj, humusztartalma a rendszeresen (ötévente) végzett talajvizsgálati eredmények alapján 1,78 és 2,14% között mozog, tápanyag-ellátottsága közepes. A termőhelyre jellemző éves középhőmérséklet 9-10 °C, az évi átlagos napfénytartam a kajszinak kedvezően magas, kb. 2000 óra, az átlagos éves csapadékösszeg 600-650 mm.



4. ábra. A mintavételi területként szolgáló kajsziültetvény elhelyezkedése. Az alsó panelen látható ÉNy-i tájolású légifotót 2021. áprilisában, egy kreatív kép- és videóanyag gyűjtését célzó repülés alkalmával készítettem.

2. táblázat. A mintaterület sarokpontjainak WGS84 és EOVS koordinátái.

Sarokpont	WGS84		EOVS	
	Φ [°]	λ [°]	X [m]	Y [m]
ÉK-i	47.066980	17.937900	192023.20	565725.65
DK-i	47.062105	17.946488	191472.09	566370.25
DNy-i	47.061210	17.945344	191373.83	566281.95
ÉNy-i	47.065532	17.937858	191862.29	565720.17



5. ábra. A gyümölcsös hosszmetzetének relatív magassági viszonyai. Jól látható a szimmetrikus oldalfalakkal rendelkező árok, amelyben a gazdálkodó tapasztalatai alapján rendszeresen fagyzug alakul ki.

A gyümölcsös egy közeli ismerős gazdálkodó birtokában van, aki családi vállalkozás keretei közt 1986 óta foglalkozik kajszitermesztéssel. A terület kisebbik részén a gazdálkodó testvérének gyümölcsfái találhatók, amelyeket a kevesebb rendelkezésre álló információ miatt nem képezik részét a mintaterületnek, és az alábbi számszerű adatokban sem szerepelnek. Az ültetvény 2003 októberében létesült három kajszifajta ültetésével, a következő arányok szerint: Pannónia (1-132. sor, délről északi irányban haladva, kb. 1850 db gyümölcsfa), Magyar kajsz C-235 (133-180. sor, kb. 650 fa), Maliga kajsz (181-204. sor, kb. 270 fa). A teljes telepített állomány kb. 2800 gyümölcsfából áll, melyek termését

friss fogyasztási célra, illetve pálinkacefreként értékesítik. A gyümölcsöst intenzív művelési mód jellemzi, 6 x 4 méteres sor- és tőtávolságba ültetett kajszi fajtát alacsony törzsön nevelik (60-80 cm) váza koronaformával, széles sövényű változatban. A termőhelyet legsúlyosabban veszélyeztető ökológiai hatás a tavaszi felmelegedéssel váltakozó fagy, amire a kajszi kiemelt érzékenységet mutat. A klímaváltozás hatásai jól tetten érhetők a gazdálkodó által rendelkezésemre bocsátott adatokban. Míg az 1986 és 2018 közötti 32 év alatt két alkalommal sújtotta a környező kajsziültetvényeket rendkívül súlyos fagykár (1998-ban 100% és 2012-ben 90%), a 2018 és 2022 közötti öt évből négyben okozott jelentős termés kiesést a tavaszi fagy (2018-ban és 2020-ban 100%, 2021-ben 90%, 2022-ben 60%). A probléma forrása, hogy az utóbbi időszakra jellemző enyhe telek miatt a kajszi csak rövid időt tölt mélynyugalomban, nedvkeringése rendkívül korán megindul, virágzása hetekkel korábbra tolódik (újabbán kb. március második felében történik, szemben a korábban jellemző április elejétől kb. 20-ig tartó időszakkal). A korán virágot bontó állomány rendkívüli mértékben kiszolgáltatott a szállított fagyhatással szemben, ami ellen a szélmozgás miatt nem lehetséges védekezni. A fagyon kívül alkalmanként aszálykár is sújtja a mintaterületet, amihez 2022 júliusában szélvihar okozta hozamkiesés társult, ezek a hatások azonban egyelőre szórványosnak mondhatók.

Az ültetvény körülkerítettsége ellenére jelentős mértékűnek mondható a vadkártétel (őz, vaddisznó, nyúl). A kajszi jellemző molykártevők jelenléte a gazdálkodó tapasztalatai alapján nem számottevő. Időközönként súlyosabb vírus- és gombakártétel jelentkezik (kajszihimlő, monília), valamint szórványosan előfordult a több kórokozó okozta komplex patológiai háttérrel jellemezhető gutaütésszerű fapusztulás. A gazdálkodó beszámolója szerint a „fitoplazma gomba” (írásos kommunikáció 2022.11.19-én, fitoplazmás fertőzés) ellen nem tudnak védekezni, a beteg fák minél gyorsabban történő eltávolításával igyekeznek megóvni az állományt. Ezenkívül megpróbálják minél jobb kondícióban tartani a gyümölcsfákat, ami védelmet jelenthet a növénybetegségek ellen (pl. tápanyagpótlás műtrágyával és lombtrágya alkalmazásával). A fiatal gyümölcsfák öntözése mellett aszályos időszakban történik vízpótlás az ültetvényen, aminek vízigényét növeli a gyepesített sorközü művelés. A facsók gyommentesítése gépesített módon zajlik. A két legnagyobb munkaerő-igényű feladatot, a metszést és betakarítást azonban teljes egészében kézzel végzik. A gyümölcsös fajtatársítása lehetővé teszi a

szüreti munka szakaszolását, ami általában június 20. és augusztus 5. közt zajlik. A korábbi években kb. 3-5 t/ha körüli termésátlag volt jellemző, a valódi termésszolgáltató képesség felmérése azonban a folyamatos fagykárak következtében nehéz.

A gazdálkodó beszámolója alapján az egyik legnagyobb kihívást a munkaerő súlyos hiánya okozza – a munka keménységét megismerve a jelentkezők jelentős része továbbáll. A termelés jövedelmezőségét komolyan rontják a közelmúlt kedvezőtlen gazdasági folyamatai: a munkaerő költsége és az inputanyagok árai a többszörösükre emelkedtek, amit nem követ a megtermelt gyümölcs felvásárlási ára. A gyümölcsértékesítést ezenkívül itthon 27%-os ÁFA terheli, aminek mértéke az Európai Unióban jellemzően 5-12% körül mozog. A termelés optimalizálására használható gépek és precíziós technológiák a gazdálkodó szerint jelenleg túlságosan drágák egy ilyen léptékben működő gazdálkodó egység számára. Precíziós gazdálkodási elemeket ugyanakkor a kezdetektől fogva alkalmaz a területein, hiszen mára évtizedek óta gyűjtött adathalmaz áll rendelkezésére (virágzás, érés ideje, fenofázisok „vándorlása” a klimatikus változások mentén stb.), amit kielemezve sikerrel tudta növelni a gazdálkodás hatásfokát.

3.2 Adatgyűjtés

Szakdolgozati munkám célja olyan UAV távérzékelési eljárás kialakítása volt, ami viszonylag alacsony bekerülési költség mellett képes gyors áttekintést adni egy nagyméretű gyümölcsös individuális fáinak állapotáról. Az eredményül kapott vegetációs indexértékek segítségével lehetőség nyílt a gyenge kondícióban levő, betegséggel küzdő vagy veszélyeztetett gyümölcsfák azonosítására. Ismert pozíciójuk alapján ezt követően időhatékonyan, célzottan felkereshetők vizuális szemle vagy mintavétel céljából anélkül, hogy a terület minden fáját terepi bejárás keretei közt volna szükséges ellenőrizni.

Az UAV platformra épülő adatgyűjtés első lépése a repüléstervezés. Ennek során a drónnal kommunikálni, azt irányítani képes szoftver (általában mobileszközre telepített applikáció) segítségével előzetesen beállítjuk a művelet paramétereit: a felszállás helyét, a célterület megközelítését, a repülés magasságát és nyomvonalát, a felvételkedészítés módját, és az UAV művelet befejezését követő viselkedését (helyben lebegés, hazatérés

stb.). A repülési terv elmenthető, a végrehajtás előtt megnyitható vagy közvetlenül a drónra tölthető. A művelet végrehajtása a terv alapján, autonóm módon történik – ha nem adódik rendkívüli esemény, nincs szükség manuális beavatkozásra a távpilóta részéről. A drón ugyanakkor bármely pillanatban kézi vezérlésre kapcsolható.

A mintaterület felett két alkalommal, 2022.06.06-án és 10.08-án végeztem adatgyűjtő repülést két saját tulajdonú UAV-val: egy nagyfelbontású RGB kamerával szerelt Phantom 4 Pro V2.0-val [24] és egy öt szűk hullámhossz sávot (B: 450 ± 16 , G: 560 ± 16 , R: 650 ± 16 , RE: 730 ± 16 , NIR: 840 ± 26 nm) érzékelő multispektrális képalkotó rendszert hordozó Phantom 4 Multispectralal [25]. A drónok az októberi repüléshez előkészített állapotukban láthatók az 6. ábrán, legfontosabb technikai adataikat a 3. táblázatban foglaltam össze.

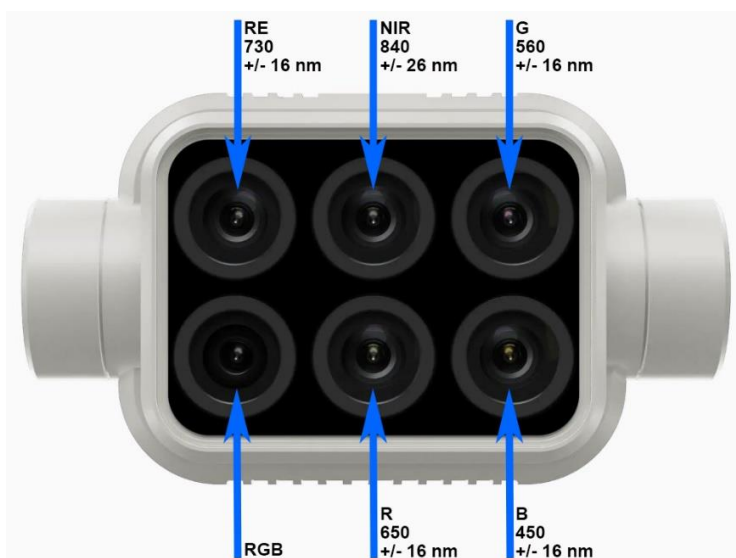


6. ábra. Az adatgyűjtéshez használt UAV-k és tartozékaik: DJI Phantom 4 Pro V2.0 (bal oldal) és DJI Phantom 4 Multispectral (jobb oldal). Alul a távirányítók láthatók.

3. táblázat. Az alkalmazott UAV-k legfontosabb tulajdonságai.

Típus	DJI Phantom 4 Pro V2.0	DJI Phantom 4 Multispectral
Platform	4 db kéttollú forgószárnyal rendelkező multirotoros UAV	
Maximális felszállótömeg	1375 g	1487 g
Repülési idő egy akkumulátorral	kb. 30 perc	kb. 27 perc
Kamera és szenzor	24 mm fókusz távolságú (84 látószög), f2.8-f11 rekesznyílású, mechanikus zárszerkezetű kamera 20 MP (5472 x 3648 pixel) RGB szenzorral.	5 db szűk hullámhossz sávú + 1 db RGB képalkotó egységből álló kamerarendszer. 40 mm fókusz távolság (62,7 látószög), f2.2 fix rekesznyílás, 2 MP (1600 x 1300 pixel) szenzor / kamera.
GNSS rendszer	GPS/GLONASS	GPS/GLONASS/Galileo RTK képesség
Egyéb tulajdonságok		beeső fény szenzor a spektrális kalibrációhoz

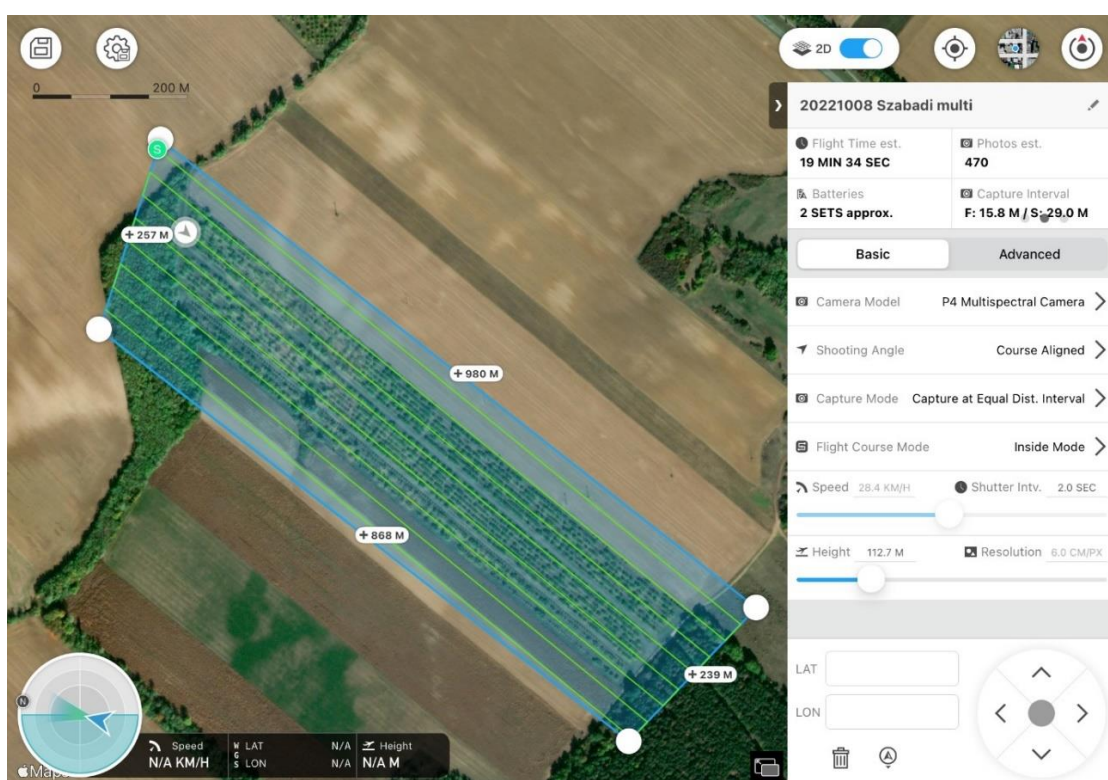
A DJI Phantom 4 Multispectral kamerarendszerének felépítése és az érzékelt hullámhossz sávok (középtér +/- tartomány). A kép módosítva innen: <https://www.dji.com/hu/p4-multispectral>, elérve: 2022. 11. 20.



A júniusi adatgyűjtés vonuló gomolyfelhős időben, változóan napos fényviszonyok és minimális szélmozgás mellett történt, az árnyékok minimalizálása érdekében 10:55 és 12:42 között. Mivel a távérzékeléses adatgyűjtés során a különböző hullámhosszúságú elektromágneses sugárzás reflektanciáját mérjük, a környezeti fény változása kihat a visszaverődő fény mennyiségére. Ha ez felvételezés közben történik, a gyűjtött reflektancia értékek megfelelő korrekció nélkül nem lesznek egymással összehasonlíthatók. Megpróbáltam úgy időzíteni az RGB és multispektrális felvételezést, hogy a gomolyfelhőzet a tartamuk alatt ne borítsa árnyékba a mintaterületet, azonban ez végül csak az előbbi esetben sikerült. A kb. 9 percig tartó multispektrális adatgyűjtés során készült felvételek egy része derült, más része felhők által árnyékolt megvilágítás mellett rögzítette a gyümölcsös eltérő részeit, ami a drámai fényintenzitás-változások miatt ellehetetlenítette a képsorozat felhasználását. Ez az oka annak, hogy a júniusi repülésből csak az RGB adatokat használok a későbbiekben. Az októberi adatgyűjtés rendkívül szerencsés, közel optimális időjárási körülmények közt zajlott: a vékony fátyolfelhőzet melletti szűrt napsütés a felvételezés teljes időtartama alatt (14:10 – 15:07) homogén megvilágítást biztosított és tökéletes szélcsenddel társult. Az ekkor gyűjtött RGB és multispektrális adatok így egyaránt megfelelő minőségűek, és szerepelnek a később bemutatott eredmények közt.

A repülési tervek elkészítéséhez és a műveletek autonóm végrehajtásához a DJI Ground Station Pro (v2.0.17, build 10671; [26]) tabletre telepített iOS applikációt használtam (7. és 8. ábra). A repülések legfontosabb paraméterei az összehasonlíthatóság és ismételhetőség miatt a júniusi és októberi alkalommal megegyeztek. A repülési magasságot kevéssel a nyílt kategóriájú UAV műveletek esetén engedélyezett maximális érték (120 m) alatt, 113 méteren határoztam meg, ami így a földfelszínre merőleges tengelyű kamerák látószöge és pixelszáma alapján az RGB felvételek esetén 3, a multispektrális képsorozat esetén 6 cm/pixeles terepi felbontást biztosított. A meanderező mintát követő repülési nyomvonalon (7. ábra) egymást követően elkészülő felvételek soron belüli és sorok közötti átfedése 80, illetve 70%-os volt. Az UAV-k feladatuk végrehajtása után vagy alacsony akkumulátorfeszültség esetén automatikusan visszatértek a kiindulóponttra. Az utóbbi esetben akkumulátorcserét követően a művelet megszakításának helyére visszarepülve befejezésig folytatták a felvételezést. Mivel az

októberi adatgyűjtés során igyekeztem hasznosítani a júniusi alkalom tapasztalatait, a repülési tervek néhány ponton különböztek. Az őszi repülések során jelentősen nagyobb területet fedtem le a terv elkészítésekor, hogy a mintaterület széleire eső felvételek esetén is biztosítsam a szükséges mennyiségű átfedést. A fényképezés a korábbiaktól eltérően lebegő (minden felvételezési ponton megálló) UAV-ról történt, ami a kevésbé élénk fényviszonyok mellett segített a mozgás miatti elmosódások kiküszöbölésében. Néhány nappal a júniusi repüléseket követően aktiválták a mobilinterneten hozzáférhető hálózati RTK jelkorrekciós szolgáltatásra szóló előfizetésemet, amit így októberben már használni tudtam az RTK-képes Phantom 4 Multispectral UAV esetén, jelentősen javítva a térbeli pozicionálás pontosságát. Végül, ugyancsak a nyári hónapokban jutottam hozzá egy megfelelő minőségű, szabványos radiometriai kalibrációs panelhez (RP06, [27]), aminek használata lehetővé tette, hogy a jövőben kialakítandó idősor multispektrális adatgyűjtései során keletkező felvételek kvantitatív összehasonlításra is alkalmasak legyenek az októberiekkel. A felvételező repülések paramétereit a 4. táblázat tartalmazza.

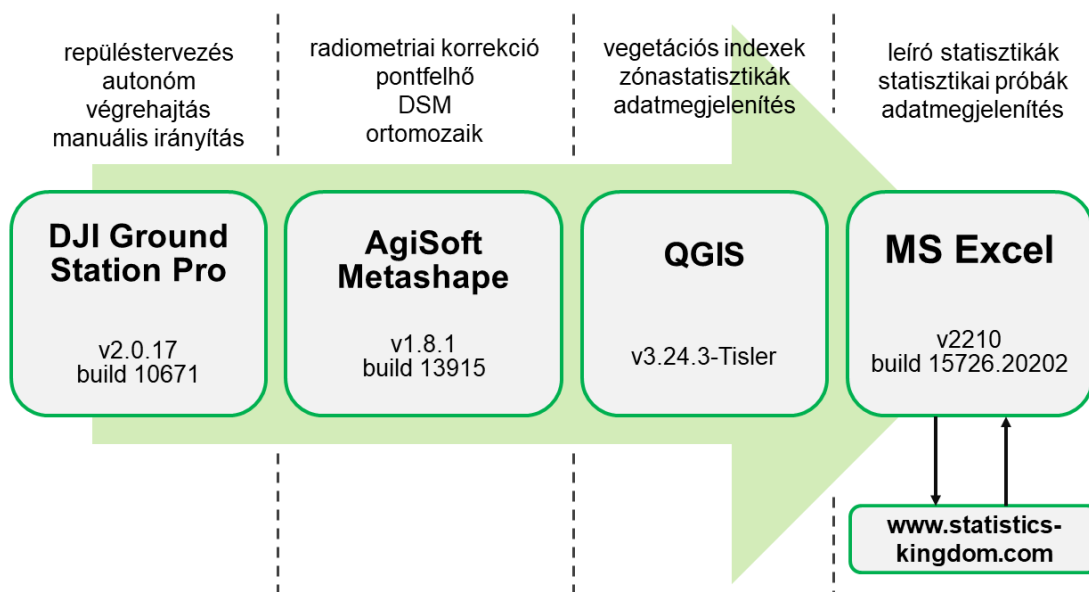


7. ábra. A 2022.10.08-i multispektrális felvételező repülés terve a DJI GroundStation Pro repüléstervező és -vezérlő applikáció felhasználói felületéről készített reprezentatív képernyőfotón.

4. táblázat. A mintaterületen végzett RGB és multispektrális adatgyűjtő repülések legfontosabb paraméterei.

Dátum	2022.06.06.	2022.10.08.
Típus	RGB	RGB multispektrális
Mintavételezett terület	12 ha + ráhagyás	
Repülési magasság	113 m	
Kameraállás	talajfelszínre merőleges kameratengely (nadir)	
Térbeli felbontás	3 cm/pixel	6 cm/pixel
Front-/oldalirányú átlapolás	80/70%	
Felvételek száma	77*	532 x (5 [B, G, R, RE, NIR] + 1 [RGB]) = 3192
Repülési idő	kb. 5,5 perc*	kb. 13 perc* kb. 19,5 perc
GNSS rendszer	GPS/GLONASS	GPS/GLONASS/Galileo hálózati RTK korrekciókkal
Egyéb beállítások	folyamatos repülés közbeni felvételezés	képkészítés álló helyzetben

*: A nyári és őszi RGB repülés során készült felvételek számában és a repülési időtartamban látható jelentős eltérést a mintavételi terület körüli „ráhagyás” méretének különbsége, valamint a „képkészítés álló helyzetben” beállítás okozza. Az októberi adatgyűjtés alkalmával a megfelelő képillesztés érdekében tudatosan nagyobb területet fedtem le a repülési tervvel, illetve igyekeztem kizárni a képek elmosódását a drón felvételezés alatti megállítással. Ez a gyűjtött adatmennyiség növekedésével és a felvételezési idő megnyúlásával jár.



8. ábra. Az adatgyűjtés, -feldolgozás, és -megjelenítés során használt szoftverek, funkciók és az előállított termékek.

3.3 Adatfeldolgozás

Az adatgyűjtő repülések alkalmával készült felvételek nyers állapotukban nem többek egyszerű légifotóknál. Feldolgozásuk során a készítéskor jellemző megvilágítási viszonyoknak megfelelő radiometriai korrekciókat kell végeznünk rajtuk, átfedéseik felhasználásával egymáshoz kell illesztenünk őket, majd feldolgozásukkal (ortofotó-mozaik előállításával) meg kell szüntetnünk az objektív tulajdonságaiból, a szenzor dőléséből származó torzításokat és a különálló (egyedi) fényképekre jellemző perspektivikus relief-hatást [28]. (Azaz az optikai centrumtól távolodva a földfelszínről függőlegesen kiemelkedő tárgyak, épületek oldalfalainak egyre nagyobb fokú láthatóságát.) Az ortogonális vetítésűre korrigált (orto-rektifikált) felvételek már ortofotónak tekinthetők, amely a térképek geometriai pontosságát ötvözi a fényképekre jellemző részletgazdagsággal: precíz méréseket végezhetünk rajta, ugyanakkor hűen reprezentálja a földfelszín felvételezési időpontban jellemző állapotát [29]. Az immár térképi vetületben szemlélhető fényképek összefűzésével nagyobb kiterjedésű területet lefedni képes ortofotó-mozaikot kapunk, amely egységes felvételként kezelhető és értékelhető ki, hiszen nem láthatók rajta az illesztések, illetve árnyalatai is egységesek [30].

A mintaterületről júniusban és októberben gyűjtött felvételek feldolgozását egységes módszerekkel, a saját személyi számítógépemen végeztem (Intel Core i7-10700K CPU, 32GB DDR4 RAM, NVIDIA GeForce RTX 3070 8 GB VRAM GPU, Windows 10 Pro [64 bit]; a feldolgozás lépéseit a 8. ábra szemlélteti). A nyers légifényképeket az AgiSoft Metashape (v1.8.1, build 13915; [31]) fotogrammetriai szoftverben nyitottam meg, majd a munkamenet első lépéseként elvégeztem a multispektrális felvételek radiometriai korrekcióját, amihez a szabványos Micasense kalibrációs panelről készített fényképeket használtam fel. A panelt borító speciális szürke festék reflektanciája a távérzékeléshez leggyakrabban használt hullámhossz sávokban ismert, így az UAV kamerájával a felvételezés helyszínén és időpontjában jellemző környezeti fényviszonyok közt lefényképezve lehetővé teszi a sávokra vonatkozó reflektancia-kalibrációs faktorok számítását [32]. Ezek alapján a feldolgozó szoftver képes lesz a felvételek nyers pixelértékeinek megfelelő kompenzálására, azaz lehetővé válik a különböző időpontokban és fényviszonyok közt gyűjtött adatok kvantitatív összehasonlítása [33]. A radiometriai korrekciót követően az átfedő felvételek egymáshoz igazítása (alignment) következett több felvételen is azonosítható illesztőpontok (tie points) segítségével. Multispektrális képalkotás esetén különös jelentőséggel bír ez a lépés, hiszen a különböző hullámhossz tartományokat érzékelő kamerák fizikailag különálló kialakításukból következően kissé eltérő nézőpontból rögzítik a mintaterület ugyanazon részletét. A feldolgozott felvételeknek ugyanakkor minden sávot illetően pontosan fedniük kell egymást, hiszen az akár csak néhány képpont mértékű illesztési hibák hamis árnyalatokat, műtermékeket hoznak létre a képelemek élei körül, amelyek komolyan torzíthatják a vegetációs indexek számításának eredményét. A képekből kinyert illesztőpontok három dimenzióban, pontfelhő formájában jeleníthetők meg. A Metashape munkamenet utolsó lépéseiben a pontfelhőt felhasználva létrehoztam a mintaterület nagy felbontású digitális felszínmodelljét, majd a felhőt alkotó pontok újraosztályozása segítségével a talajfelszínt leképző domborzatmodellt (DFM és DDM, felbontásuk az RGB felvételek esetén 6, a multispektrális felvételezés esetén 12 cm/pixel). Végül, a DFM alapján előállítottam a geometriailag korrigált felvételekből összefűzött ortofotó-mozaikot.

Az adatfeldolgozás következő, a nyílt forráskódú QGIS (v3.24.3, [34]) térinformatikai szoftverrel végzett szakaszának bemenetét az RGB és az öt hullámhossz sávot tartalmazó

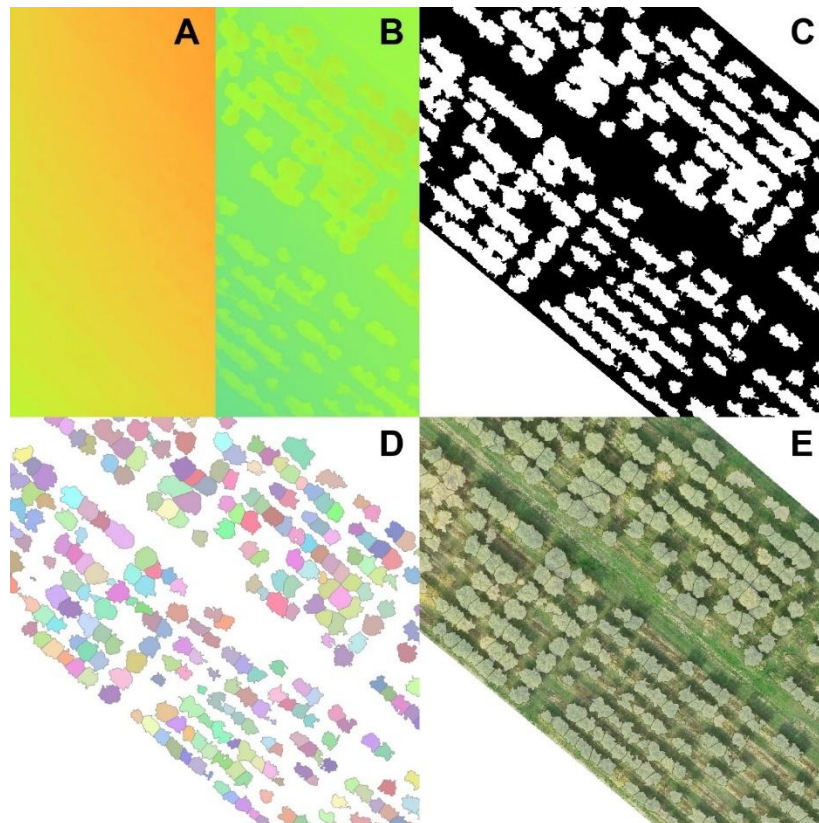
multispektrális ortofotó-mozaikok képezték. A megnyitott raszterek a repülési terv ráhagyásai miatt tágabb környezetében ábrázolták a mintaterületet, elemzést azonban csak a számunkra releváns képrészleteken célszerű végezni. Ezért új shape adatréteg létrehozásával kijelöltem a mintaterület pontos határait, majd az így kapott poligont az ortofotó-mozaikok érdektelen részeinek levágására használtam. A vágott állományok képpontjaira ezután a QGIS raszter kalkulátora segítségével kiszámítottam három, a gyümölcsfák állapotával összefüggést mutató adatot szolgáltatni képes vegetációs index értékét. A közeli infravörös és a látható vörös tartományokat használó NDVI index mellett célom volt kizárólag a látható tartományból építkező indexeket is felhasználni (Visible Atmospheric Resistant Index, VARI és Triangular Greenness Index, TGI), hogy indikációikat összehasonlíthassam egymással. A felhasznált vegetációs indexek képletei az 5. táblázatban láthatók.

5. táblázat. A munkám során használt vegetációs indexek.

Index	Képlet	Hivatkozás
VARI (Visible Atmospheric Resistant Index)	$VARI = (G - R) / (G + R - B)$	[35]
TGI (Triangular Greenness Index)	$TGI = -0.5 \times [(670 - 480) \times (R670 - R550) - (670 - 550) \times (R670 - R480)]$	[36]
NDVI (Normalized Difference Vegetation Index)	$NDVI = (NIR - R) / (NIR + R)$	[17] [18]

Mivel alapvető követelményként fogalmaztam meg, hogy a távérzékelte adatokból a mintaterület individuális fáira vonatkozóan tudjak információt létrehozni, szükségem volt olyan módszerre, amely képes a fák lombkoronáját elkülöníteni az érdektelen háttértől. A probléma nem triviális, hiszen a gyümölcsös gyepesített sorközü művelése miatt a zöld koronákat általában zöld háttérből volt szükséges kiemelni, ami kézzel végezve megbízható ugyan, de nem időhatékony. Ezért a korábban létrehozott digitális felszín- és domborzatmodellhez folyamodtam, amelyek jó térbeli felbontásuk folytán pontosan

követik a földfelszínből kiemelkedő fák lombjainak körvonalait (DFM) és magát a talajfelszínt (DDM). A DDM pontjainak magassági értékeiből kivonva az ugyanazon pontokhoz tartozó DFM értékeket, az eredmény csak ott negatív, ahol az utóbbi modell lombkoronát rögzített (azaz ahol $DFM > DDM$). Ebből a számításból bináris rasztermaszkot készítettem, amin a fehér (1-es értékű) pixelek lombokat, a fekete (0-s értékű) képpontok pedig a háttérrel (talajt) jelölték. A maszk zajnak minősülő képpontjait (az egy-két pixel méretű töredékeket) a QGIS Sieve eszközével szűrtem ki, majd a letisztított raszter réteget vektoros adatréteggé konvertálva a gyümölcsfák lombjait pontosan lefedő poligonokat hoztam létre. Mivel a lombkoronák a széles sávnyú forma miatt a legtöbb helyen folytonosak voltak egymással, szükségessé vált az egyedek elkülönítése, amit vektoros vonalak manuális berajzolásával végeztem el, az ortofotó-mozaikok vizuális kiértékelés alapján. A bemutatott folyamat lépéseit a 9. ábrán szemléltetem.



9. ábra. A lombkoronák háttértől való elkülönítésének lépései. Digitális domborzat- (A) és felszínmodell (B), rasztermaszk (C), lombkorona-poligonok (D-E).

Végül, a QGIS eszköztárában rendelkezésre álló zónastatisztikák eszközzel a mintaterület gyümölcsfáit fedő, különálló poligonok mindegyikére kiszámítottam mindhárom felhasznált vegetációs indexérték alapvető statisztikai jellemzőit (átlagát, szórását, mediánját, minimum és maximum értékét, a két érték különbségét). Az így kapott adatok már alkalmasak az individuális fák állapotának jellemzésére.

4. EREDMÉNYEK

A 2022.06.06-i és 2022.10.08-i adatgyűjtő repülések itt összefoglalt eredményeinek alapját összesen 2898 darab légifénykép szolgáltatta (238 darab RGB + 2660 darab szűk sávú multispektrális). A képekből a fent összefoglalt módszerrel előállított vágatlan ortomozaikok a 10. (június, RGB), 11. (október, RGB), és 12. ábrán (október, multispektrális sávok) láthatók. Az ortofotók térbeli pontosságára vonatkozó adatokat a 6. táblázat tartalmazza. Az ortofotó-mozaikok sávjaiból a lehatárolt mintaterületre kiszámított VARI, TGI és NDVI vegetációs indexeket a 13. ábrán mutatom be. A VARI és TGI értékei látványosan megváltoztak június és október között: az eltolódás mértéke az egyes fákhoz tartozó átlagértékeken lefuttatott nem-paraméteres, összetartozó mintás Wilcoxon-próba alapján mindkét esetben szignifikáns mértékűnek bizonyult (VARI: $Z = 33,082$, $p < 0,001$; TGI: $Z = -33,052$, $p < 0,001$; 14. ábra, D. A dolgozatomban bemutatott statisztikai próbák elvégzéséhez a Statistics Kingdom weboldal ingyenesen elérhető kalkulátorait használtam [37].). Az előző fejezetben bemutatott módszerrel összesen 1456 darab individuális gyümölcsfát különítettem el ($n = 1456$), a statisztikai számításokat a hozzájuk tartozó értékek alapján végeztem el. Az NDVI indexre vonatkozóan nem tudtam vizsgálni a változást, mert ilyen adat az adatgyűjtésről szóló fejezetben bemutatott ok miatt csak októberből állt rendelkezésemre. Mindhárom vegetációs index értékeinek eloszlását hisztogramon ábrázoltam, amelyeken ugyancsak nyomon követhetők az évszakváltással bekövetkező változások (14. ábra, A-C). Az őszi repülésre vonatkozó VARI és NDVI hisztogram hasonlóságának hátterében a két vegetációs index értékeinek rendkívül erős pozitív korrelációja húzódik meg (Spearman-féle $r[1454] = 0,937$, $p < 0,001$; 15. ábra), egyúttal a TGI-NDVI, és VARI-TGI relációkban is közepes erősségű pozitív összefüggésekre derült fény. (TGI-NDVI: $r[1454] = 0,425$, $p < 0,001$; TGI-VARI_{június}: $r[1454] = 0,54$, $p < 0,001$; TGI-VARI_{október}: $r[1454] = 0,431$, $p < 0,001$.)

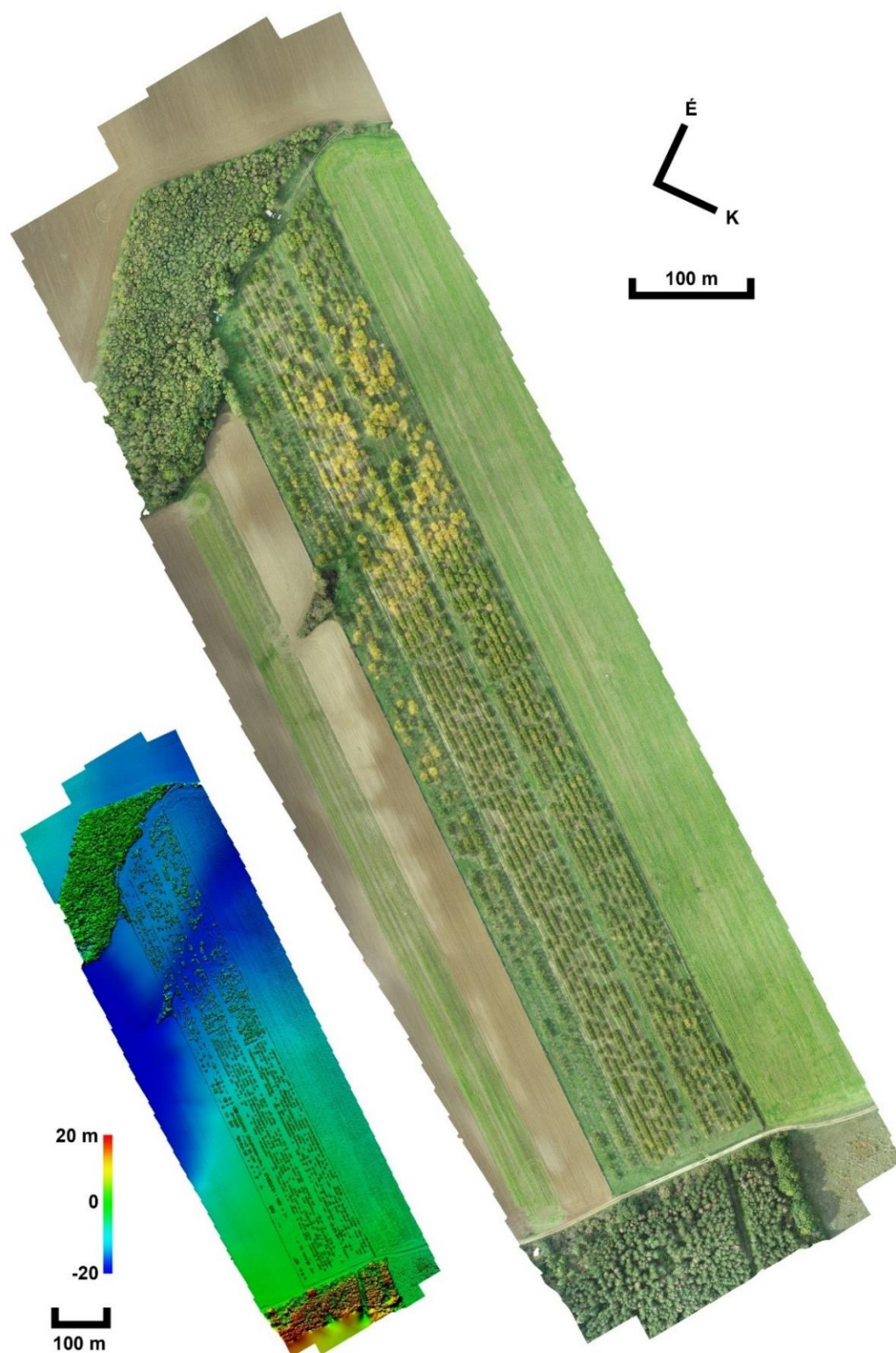
A három vegetációs indexnek az individuális gyümölcsfák lombjait lefedő képpontokra kiszámított értékeit indexenként átlagoltam, majd az így kapott egyedekre vonatkozó VARI, TGI és NDVI értékeket használtam fel a fák fiziológiai állapotának jellemzésére. Első lépésként a vegetációs indexek mentén kiválasztottam a legalacsonyabb értékeket mutató 146 egyedet („gyenge 10%”), azokat megjelenítettem a gyümölcsös térképén, és

kiemeltem azokat a gyümölcsfákat, amelyek több indexérték alapján is gyengének minősültek (ezek az egyedek az indexek metszetébe tartoznak, így többszörösen jelöltnék vagy „pozitívnak” nevezhetők). A júniusi adatgyűjtésből a VARI és TGI, az októberiből a VARI, TGI és NDVI vegetációs indexek alapján végeztem el a gyenge kondíciójú fák szűrését. Az eredményül kapott kockázati kompozitokat a 16. ábrán mutatom be. Az októberi adatokból számított NDVI értékeket a VARI és TGI szűréssel átlapolva hármas-pozitív fákat is sikerült azonosítani (VARI/TGI/NDVI+, 16. ábra, B'). Az elemzés utolsó lépésként a júniusi és októberi szűrésekből elkészített kompozitokat is átlapoltam egymással, így kialakítva a gyümölcsfák indexértékek alapján felmért állapotára vonatkozó végső kockázati kompozitot (17. ábra). Az itt látható összesen 44 egyed a teljes mintaelemszám (1456 fa) 3,02%-át teszi ki, közös tulajdonságuk, hogy mind júniusban, mind októberben bekerültek a gyenge 10%-ba legalább egy vegetációs indexérték alapján. Az átlapolás logikájából következően a végső kompoziton kettős-pozitív (kék szín, 2+; júniusban és októberben TGI vagy VARI+), hármas-pozitív (piros szín, 3+; júniusban vagy októberben kettős-pozitív, a másik időpontban csak egyszeresen VARI vagy TGI+), és négyes-pozitív (sárga szín, 4+; mindkét alkalommal kettős pozitív) egyedek különíthetők el. A 17. ábra kinagyított paneljein látható nyílhegyek az októberi adatokból számított NDVI értékek alapján számított gyenge 10%-ba eső fákat jelölik, amely a fenti VARI-TGI alapú szűréshez illesztve tovább növeli az érintett gyümölcsfák kockázati besorolását. Minél több indexérték mentén és időpontban került a gyenge 10%-ba, azaz minél többszörösen pozitív egy egyed, vélhetően annál nagyobb a valószínűsége, hogy valóban gyenge kondíciójú, így veszélyeztetett a növénybetegségekkel szemben, esetleg már küzd is ilyennel. Ezt a feltevést a kettős- és hármas-pozitív egyedek tavaszi és őszi vegetációs indexértékein végzett nem-paraméteres, független mintás Mann-Whitney próbákkal ellenőriztem. A statisztikai próbák eredményeiből kiderült, hogy a hármas-pozitív egyedek a júniusi VARI és TGI, illetve az októberi NDVI indexértékek mentén vizsgálva valóban szignifikánsan gyengébb kondíciójúak, mint a kettős-pozitív gyümölcsfák. Az októberi VARI összehasonlítás nagyon erős tendenciát mutatott ugyanebbe az irányba, míg az októberi TGI próba nem mutatott ki különbséget. (Mann-Whitney U $U_{\text{VARI}_{\text{június}}} = 328,5$, $n_1 = 16$, $n_2 = 26$, $p < 0,01$; $U_{\text{TGI}_{\text{június}}} = 329$, $n_1 = 16$, $n_2 = 26$, $p < 0,01$; $U_{\text{NDVI}_{\text{október}}} = 296$, $n_1 = 16$, $n_2 = 26$, $p < 0,05$; $U_{\text{VARI}_{\text{október}}} = 281,5$, $n_1 = 16$, $n_2 = 26$, $p = 0,051$; $U_{\text{TGI}_{\text{október}}} = 208$, $n_1 = 16$, $n_2 = 26$, $p = 0,851$, nem szignifikáns.) A végső

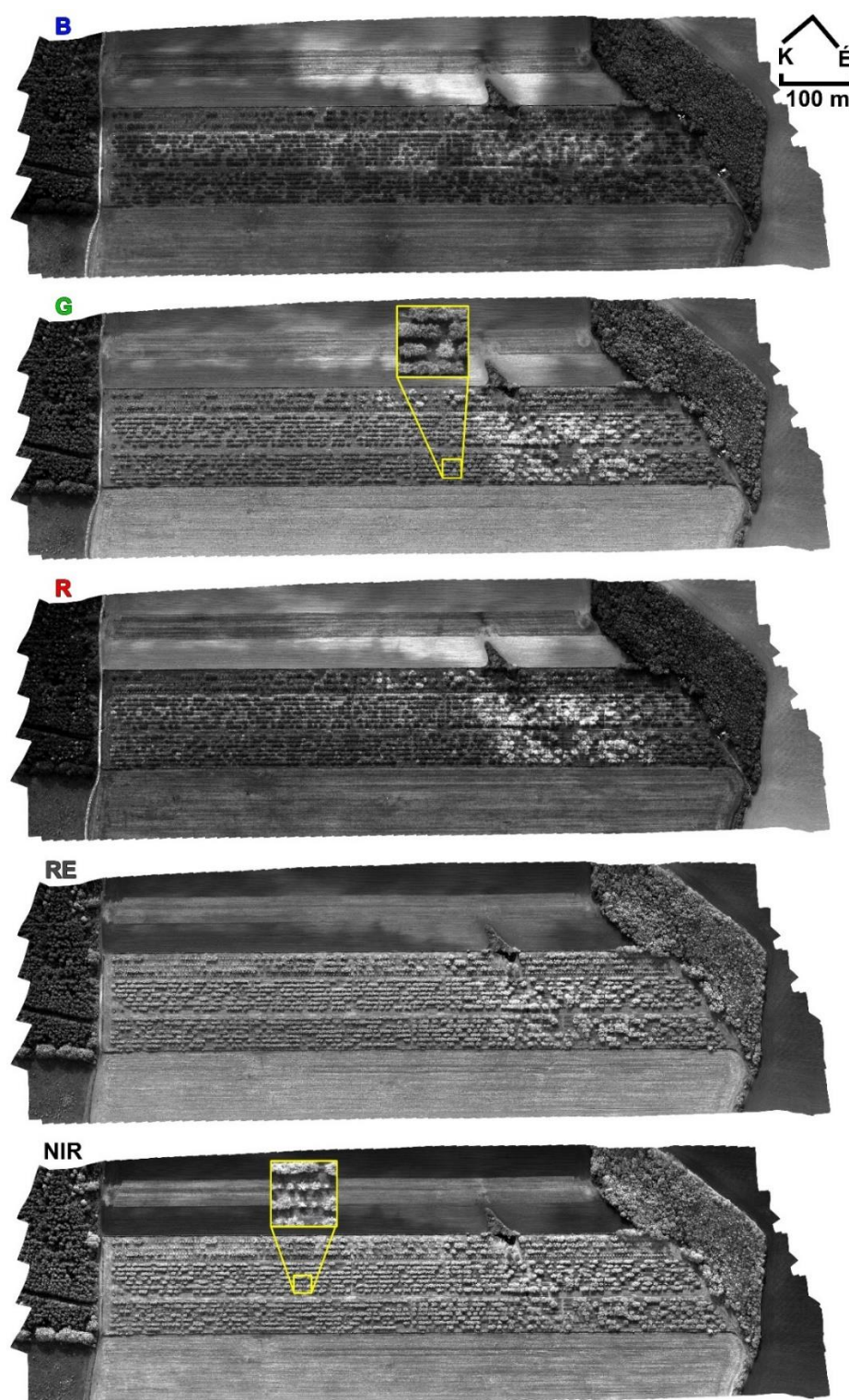
kockázati kompoziton látható gyümölcsfák az általam használt vegetációs indexértékek alapján az ültetvény leggyengébb kondícióban levő egyedeinek tekinthetők, terepi szemrevételezésük ezért indokolt lehet. Térbeli pozícióikat a 7. táblázat tartalmazza.



10. ábra. A 2022.06.06-i adatgyűjtő repülés felvételeiből készített vágtatlan RGB ortofotó-mozaik.



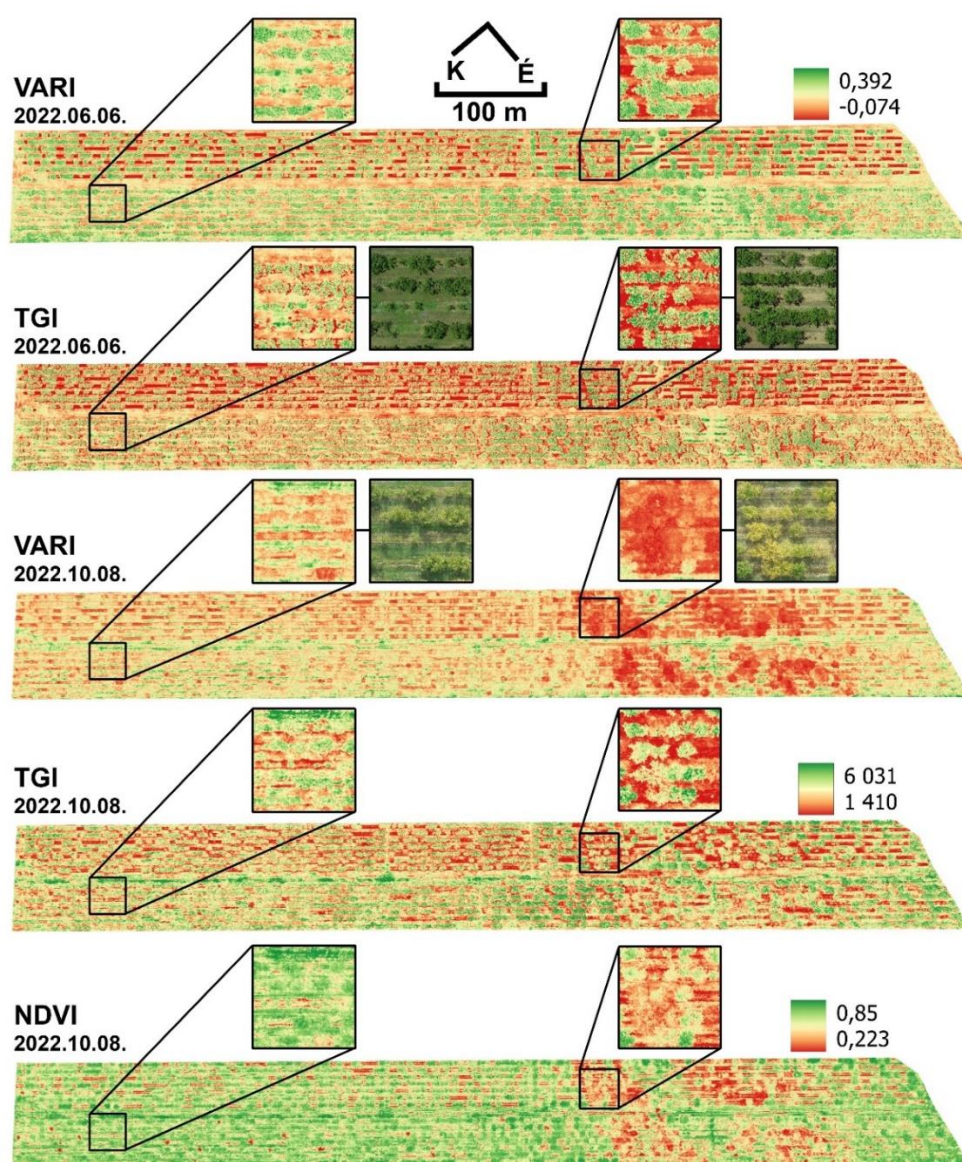
11. ábra. A 2022.10.08-i adatgyűjtő repülés során készült felvételekből összeállított RGB ortofotó-mozaik és a terület digitális felszínmodellje.



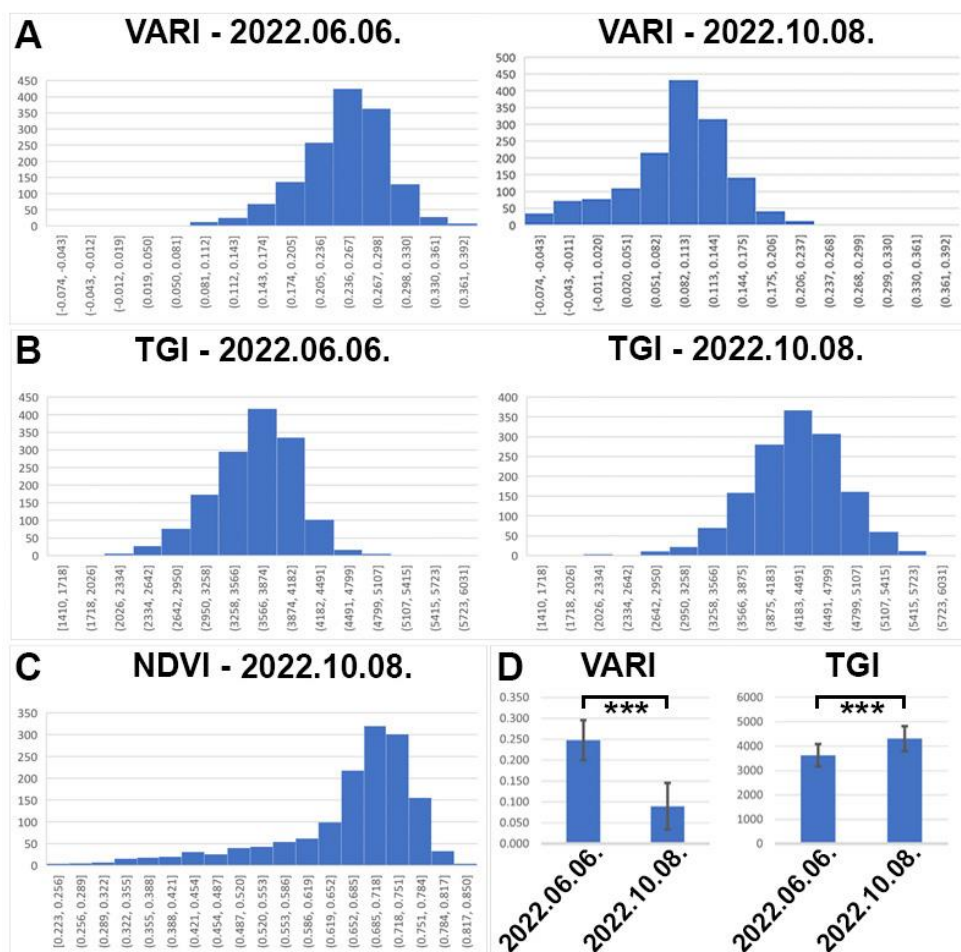
12. ábra. A mintaterület 2022.10.08-án elvégzett multispektrális felvételezése alapján elkészített kék (B), zöld (G), vörös (R), vörös él (RE) és közeli infravörös (NIR) hullámhossz sávú vágatlan ortofotó-mozaikok.

6. táblázat. Az ortofotók térbeli pontossága.

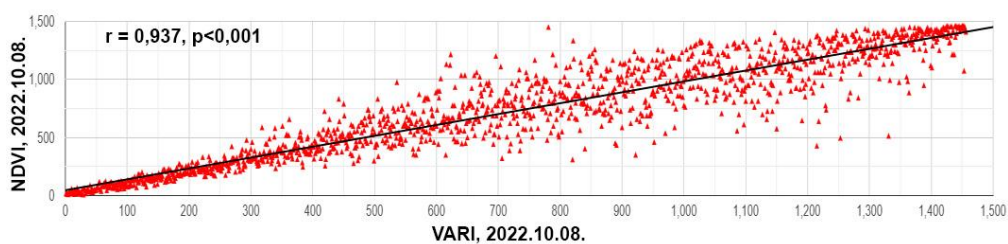
Felvételezés	X hiba [m]	Y hiba [m]	Z hiba [m]
2022.06.06. RGB	0,23	0,19	1,09
2022.10.08. RGB	0,75	0,81	0,64
2022.10.08. multisp.	0,023	0,014	0,023



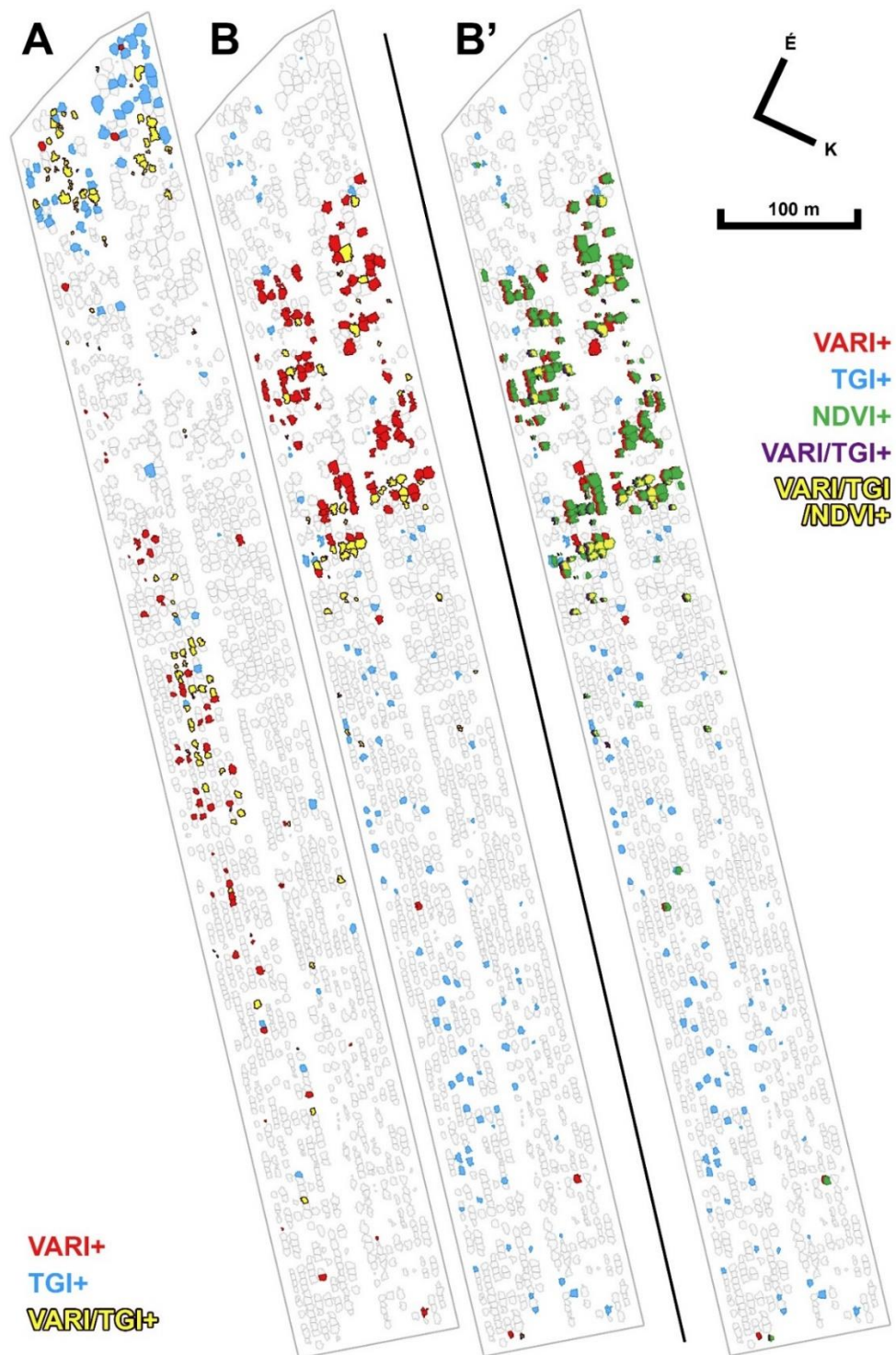
13. ábra. Az ortofotó-mozaikokból lehatárolt mintaterület képpontjaira kiszámított VARI (Visible Atmospheric Resistant Index), TGI (Triangular Greenness Index), és NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) vegetációs indexek.



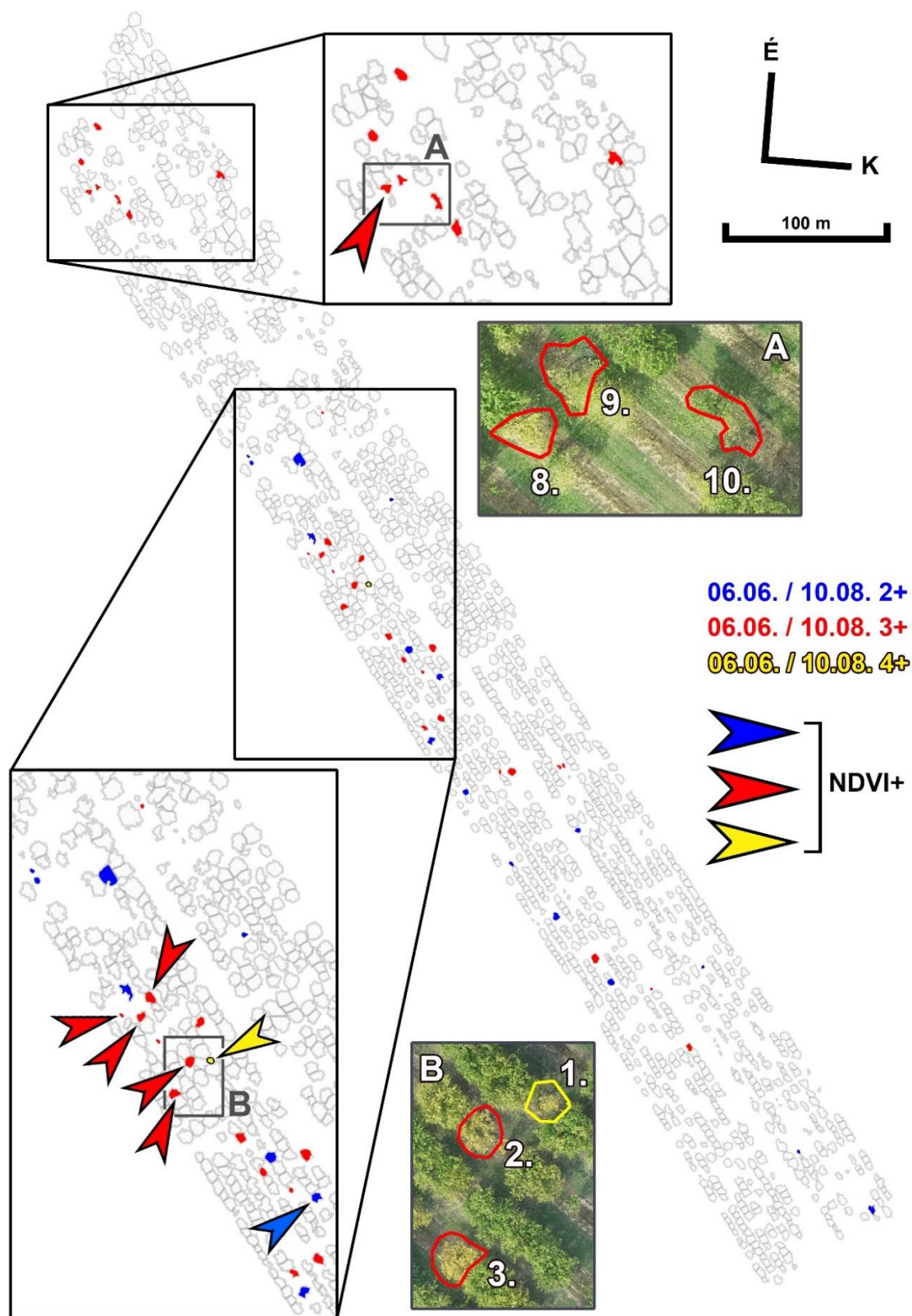
14. ábra. A mintaterületen elkülönített 1546 darab individuális gyümölcsfára jellemző VARI (A), TGI (B) és NDVI (C) indexértékek mennyiségi eloszlása hisztogramokon ábrázolva. Jól látható az indexértékek évszakováltással összefüggő eltolódása, amelynek statisztikailag jelentős mértékét nem-paraméteres, összetartozó mintás Wilcoxon-próbák igazolták (D).



15. ábra. Az októberi VARI és NDVI indexértékek Spearman-féle korrelációs számítással megerősített rendkívül erős pozitív összefüggése.

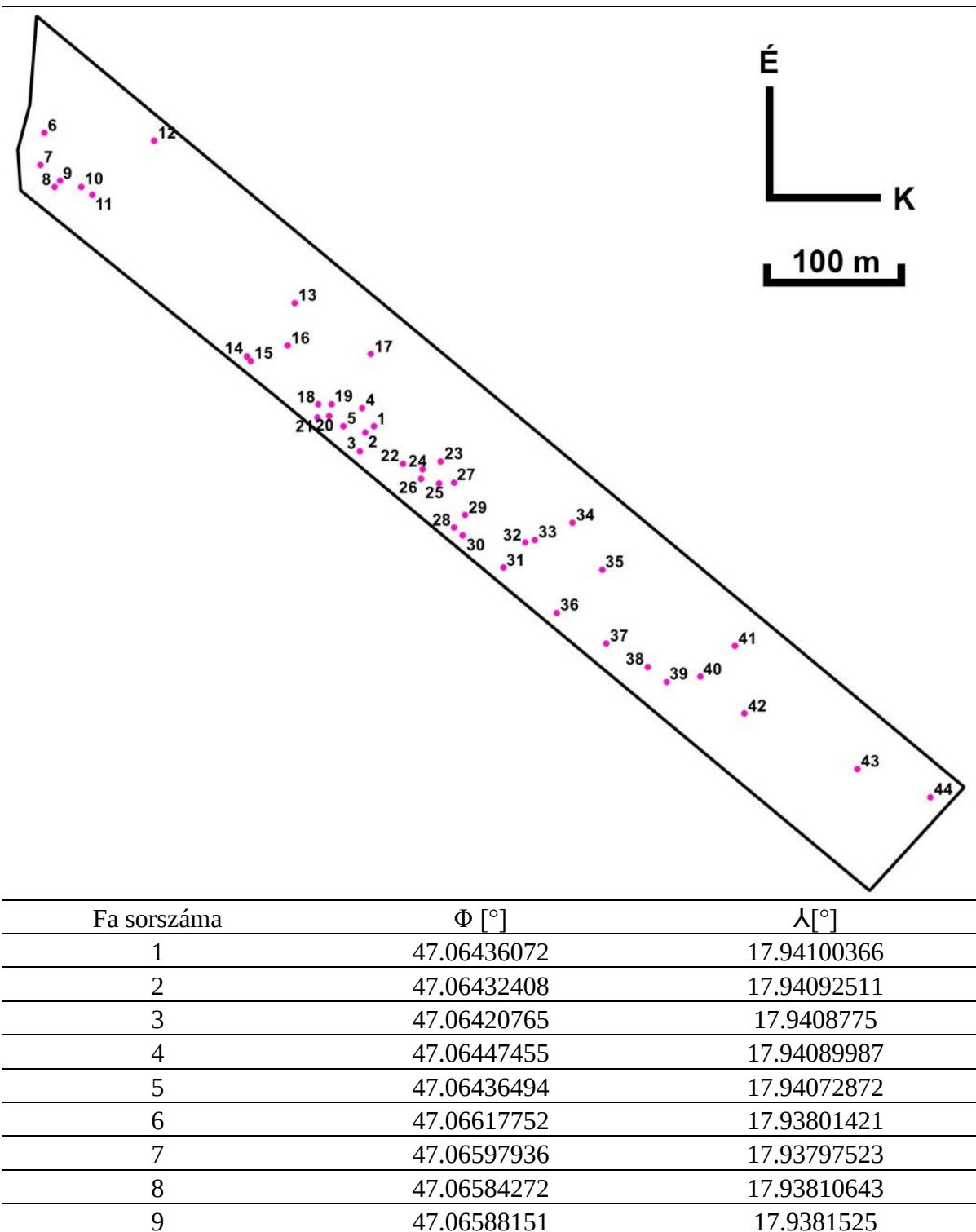


16. ábra. A júniusi (A) és októberi (B, B') VARI (piros szín), TGI (kék szín), és NDVI (zöld szín) vegetációs indexértékek alapján a leggyengébb 10%-ba eső gyümölcsfák elhelyezkedése a gyümölcsös térképén (146 darab / index). A sárga színű poligonok olyan egyedet jelölnek, amelyek több indexérték alapján is gyenge állapotúnak bizonyultak.



17. ábra. A júniusi és októberi kompozitok (16. ábra) átlapolásával létrehozott végső kockázati kompozit, amely az UAV-távérzékelte adatokból számított indexértékek alapján a mintaterület leggyengébb állapotú gyümölcsfáit ábrázolja (középső panel). A kék színnel jelölt egyedek júniusban és októberben egyaránt bekerültek a VARI vagy TGI index mentén elkülönített leggyengébb 10%-ba (kettős-pozitív, 2+). A piros színnel jelölt fák júniusban vagy októberben VARI/TGI kettős-pozitívak voltak, míg a másik felvételezési időpontban csak az egyik indexérték alapján minősültek pozitívnak (3+). Az egyetlen sárga színnel jelölt fa mindkét adatgyűjtéskor VARI/TGI kettős-pozitív volt (4+). A kinagyított paneleken látható nyílhegyek az októberi felvételezés alapján kiszámított NDVI érték mentén elkülönített leggyengébb 10%-hoz tartozó fákat jelölik, tovább növelve az érintett egyedek kockázati besorolását. Ezt a feltevést erősíti, hogy a háromszoros-pozitivitás a kettős-pozitivitáshoz képes nem-paraméteres, független mintás Mann-Whitney próbák alapján mindhárom felhasznált vegetációs index mentén szignifikánsan gyengébb állapottal jár együtt (részletek a szövegben). Az A és B jelű RGB képrészletek a bekeretezett gyenge kondíciójú gyümölcsfák októberi állapotát mutatják be. A feltüntetett számok megegyeznek a 7. táblázatban használt fa-azonosítókkal.

7. táblázat. A végső kockázati kompoziton (17. ábra) látható, gyenge kondíciójuk folytán a növénybetegségekkel szemben vélhetően fokozottan veszélyeztetett gyümölcsfák térbeli elhelyezkedése WGS84 koordinátákban megadva.



10	47.06584497	17.93834604
11	47.0657935	17.93844393
12	47.0661296	17.93901246
13	47.06512446	17.94028571
14	47.06479613	17.93984957
15	47.06476844	17.93989021
16	47.06486089	17.94022582
17	47.06480811	17.94097831
18	47.06449693	17.94050319
19	47.06449985	17.94061822
20	47.0644244	17.94060159
21	47.06441793	17.94049083
22	47.06412974	17.94126994
23	47.06414367	17.94161458
24	47.06409639	17.94144772
25	47.06400961	17.94159936
26	47.06403908	17.94143537
27	47.06401317	17.94173151
28	47.06373455	17.94173607
29	47.06381177	17.94183609
30	47.06368678	17.94181423
31	47.06348634	17.94218025
32	47.06364177	17.94238228
33	47.06365893	17.94246737
34	47.06376417	17.94281058
35	47.06347646	17.94307939
36	47.06320738	17.94267011
37	47.06301633	17.94311742
38	47.06287191	17.94349581
39	47.06278059	17.94366313
40	47.06281149	17.9439702
41	47.06300112	17.9442852
42	47.06258372	17.94437522
43	47.06223918	17.94539914
44	47.06206755	17.94606369

5. ÖSSZEFOGLALÁS

Szakdolgozatom elkészítése során olyan távérzékelési megoldást kerestem, amely költség- és időhatékonyan alkalmas nagy kiterjedésű gyümölcsültetvények felmérésére, és képes adatot szolgáltatni az individuális gyümölcsfák fiziológiai állapotáról. Az ebből nyerhető információ segíthet a jelentős stressznek kitett, pl. tápelemhiánnyal vagy növénybetegséggel küzdő egyedek azonosításában. A pilóta nélküli légi járművekkel alacsony magasságból végzett légi fényképezés kiemelten alkalmasnak ígérkezett erre a feladatra, hiszen ezek az agilis eszközök többféle képalkotó rendszert képesek szállítani, amely rendkívül sokoldalú felhasználhatósággal ruházza fel őket. A napjainkban rendelkezésre álló lítium-polimer akkumulátor-technológia és az optimalizált fogyasztású részegységek egyúttal biztosítják, hogy a drónok figyelemre méltó időn át dolgozhassanak a levegőben, ami jelentős felvételezési területteljesítmény elérését teszi lehetővé. Munkám során két UAV-val végeztem adatgyűjtést a mintaterületként szolgáló kajsziültetvény felett: egy nagy pixelszámú RGB kamerával rendelkező, illetve egy öt szűk hullámhossz sávot érzékelő multispektrális rendszerrel szerelt eszközzel (B: 450 ± 16 , G: 560 ± 16 , R: 650 ± 16 , RE: 730 ± 16 , NIR: 840 ± 26 nm). A két felvételezési időpontban, 2022. június 6-án és október 8-án készített légifelvételekből előállított ortofotó-mozaikok képpontjain összesen háromféle vegetációs index értékét számítottam ki. Közülük a Visible Atmospheric Resistant Index (VARI, [35]) és a Triangular Greenness Index (TGI, [36]) a látható hullámhossz tartományba eső kék, zöld és vörös reflektancia értékekre épül, míg a népszerű Normalizált Vegetációs Index (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI, [17] [18]) a látható vörös és közeli infravörös sávok közt alkot kontrasztot. A vegetációs indexek összefüggésben állnak a növények különféle biológiai jellemzőivel, így alkalmat kínálnak e tulajdonságok távérzékeléssel történő kvantitatív felmérésére. A két felvételezési időpont közt eltelt idő lehetővé tette a képalkotási és adatfeldolgozási módszerem kontrollvizsgálatát, hiszen a nyár eleji és az őszi adatgyűjtés a kajsziültetvény fájának alapvetően eltérő fenológiai fázisai alatt zajlott (gyümölcsérés-lombhullás), amelynek látványosan meg kellett jelennie az eredményekben. Első lépésben elkülönítettem a lombkoronákat alkotó képpontokat, majd az azonosított individuális fákhöz rendelt poligonokra ($n = 1456$) kiszámítottam mindhárom fenti vegetációs index átlagos értékét. Az indexértékek eloszlását

hisztogramon ábrázolva látszik, hogy a VARI és TGI indexek változása megragadta a gyümölcsös fának állapotváltozását. Az eredetileg a talajfelszín vegetációborítottságának műholdas távérzékeléssel történő azonosítására javasolt VARI index egészséges növényzet esetén magas, míg a lombzat fiziológias vagy stressz okozta sárgulásával, a lombhullató növények nyugalmi időszakra való felkészülésével párhuzamosan egyre alacsonyabb értékeket szolgáltat. A levelek klorofill-tartalmának, illetve nitrogén-ellátottságának közvetett felmérésére szolgáló TGI vegetációs index ettől eltérő módon működik. Értéke a látható spektrumtartomány kék (480 nm), zöld (550 nm) és vörös (670 nm) hullámhosszain mért reflektancia-értékek által kijelölt spektrális háromszög területével egyenesen arányos. A növényi stressz, pl. nitrogénhiányos állapot hatására végbemenő spektrális változások megnövelik a háromszög területét, így az index leromlott állapotú vegetáció esetén magasabb értékeket vesz fel. (Az összefüggést kiválóan szemlélteti Hunt és munkatársainak [36] 3. és 7. ábrája.) Saját munkámban a hisztogramokon túl statisztikai próbával is sikerült igazolnom, hogy a gyümölcsfákra jellemző VARI értékek az októberi adatgyűjtés során a júniusiaknál alacsonyabbak, a TGI esetében pedig magasabbak voltak. A két vegetációs index tehát érzékenynek bizonyult a mintaterület gyümölcsfáinak spektrális változásaira. A zöld növényi részek klorofill-tartalmára jellemző vörös tartományú fényelnyelés és a közeli infravörös sávban mérhető magas reflektancia arányára épülő NDVI index számításához az időjárási körülmények folytán csak az októberben gyűjtött felvételeket tudtam felhasználni. Az index hisztogramjára tekintve jól látszik a VARI-val mutatott hasonlósága. Az adataimon végzett Spearman-féle korrelációs számítással rendkívül erős pozitív kapcsolatot mutattam ki a két index októberi értékei között ($r = 0,937$, $p < 0,001$). Ez alapján elmondható, hogy a látható tartományú VARI az általam vizsgált körülmények között igen jó hatásfokkal volt használható a multispektrális szenzort igénylő NDVI értékeinek jóslására vagy helyettesítésére. Ennek a távérzékeléshez használt eszközök kiválasztásakor lehet komoly jelentősége, hiszen az RGB szenzorral szerelt UAV-k beszerzési ára kb. negyede-ötöde az azonos kategóriába tartozó, multispektrális képességgel rendelkező társaikénak.

Munkám legfontosabb eredményeit a kockázati kompozitok jelentik (16-17. ábra), amelyekhez a mintaterület individuális gyümölcsfáinak vegetációs indexértékek alapján meghatározott kondíciója szolgáltatta az alapot. A júniusi és októberi adatgyűjtésből

rendelkezésre álló VARI és TGI értékek alapján kiválasztva és egymással átlapolva a 146 leggyengébb gyümölcsfát (az összes azonosított egyed 10%-át), az indexértékek által egyszeresen vagy többszörösen „megjelölt”, a klinikai diagnosztikából kölcsönzött kifejezéssel élve „pozitív” egyedeket különítettem el. Érdekes és élvezetes tapasztalat, hogy ehhez a módszerhez a jelenlegi foglalkozásom, a neurobiológiai kutatómunka szolgáltatott inspirációt. A laboratóriumban napi rendszerességgel alkalmazzuk az úgynevezett immunhisztokémiai módszert az idegsejt-típusok anatómiai azonosítására. Ehhez fluoreszkáló festékekkel jelölt antitesteket használunk, amelyek fehérjékhez kötődve különböző színű fénybe borítják a neuronokat. Egy mintára több, egymástól elkülönülő hullámhossz sávban fluoreszkáló antitest is felvihető, amelyek így együttesen vizsgálhatók. Ha egy sejt több színben, azaz több csatornán ad jelet, azt jelenti, hogy több vizsgált fehérjét is tartalmaz, azokra nézve tehát „többszörösen pozitív”. A szakdolgozatom kockázati kompozitjai hasonló elven működnek: itt a vegetációs indexek értékei töltik be az antitestek szerepét, amelyekkel megpróbálom „kivilágítani” a fákat. A feltevésém alapján, ha egy gyümölcsfát egyszerre több index tekintetében is gyenge értékek jellemeznek, azaz többszörösen pozitívnak minősül, az jelentősen leromlott fiziológiai állapotra, a növénybetegségekkel szembeni fokozott sérülékenységre, esetleg azok aktuális fennállására utalhat. A júniusból és októberből származó VARI-TGI kompozitokat végül egymással is átlapoltam, így létrehozva a mintaterület legsérülékenyebb 44 gyümölcsfáját (3,02%) bemutató végső kockázati kompozitot (17. ábra). Az itt megjelenő egyedekben közös, hogy mindkét felvételezési időpontban pozitívnak bizonyultak legalább az egyik vegetációs index szempontjából. A kettős pozitív (júniusban és októberben VARI vagy TGI+), hármas pozitív (az egyik adatgyűjtés alkalmával kettős-pozitív a másikban csak egyszeresen VARI vagy TGI+) és négyes-pozitív (mindkét alkalommal VARI-TGI kettős-pozitív) gyümölcsfák egyre fokozódó fiziológiai sérülékenységének ellenőrzéséhez statisztikai próbákat végeztem. A nem-paraméteres, független mintás Mann-Whitney próbák eredménye alapján a végső kockázati kompozit hármas-pozitív egyedei kettős-pozitív társaikhoz képest valóban statisztikailag jelentős mértékben gyengébb kondíciójúnak bizonyultak a felhasznált indexértékek mentén. A felvázolt adatelemzési módszer tehát alkalmasnak látszik a kajszi gyümölcsfák állapotában megmutatkozó finom különbségek megragadására. A sérülékeny egyedek azonosítása után célszerű azokat vizuális szemrevételezés és

mintavétel céljából célzottan felkeresni. Mivel az elemzést georeferált ortofotó-mozaikok alapján végeztem, bármely fa térbeli koordinátái egyszerűen kinyerhetők: a végső kockázati kompozit 44 egyedének WGS84 koordinátáit a 7. táblázat tartalmazza. Az ortofotó-mozaikok geometriai pontosságára vonatkozó adatok alapján (6. táblázat) még a hagyományos GNSS vevővel ellátott RGB kamerás Phantom 4 Pro V2.0 UAV vízszintes irányokban vett hibája is 1 m alatt marad, így az ezzel az eszközzel készített felvételek is alkalmasak az általában 2-5 méter átmérőjű lombkoronával bíró egyedi gyümölcsfák megbízható terepi azonosítására. A hálózati RTK-jelkorrekciós szolgáltatás mellett végzett multispektrális repülésekből származó termékek pontossága kiemelkedő, vízszintes hibájuk 1-2 centiméteres.

A gyümölcsfák UAV-távérzékeléses állapotfelmérésére munkám során több vegetációs index értékét használtam fel a fent bemutatott módon. A gyümölcsös többi egyedéhez képest mért gyenge fiziológiai állapot hátterében a növénybetegségek túl számos tényező húzódnak meg, amelyek azonosításához a bemutatott távérzékelési módszer adhat ugyan támpontokat, önmagában azonban gyakran nem elégséges. Az októberi RGB ortofotó-mozaikra tekintve azonnal szembetűnik a gyümölcsös északi részét sávban átszelő erőteljes sárga lombtömeg, amely érdekes példáját nyújtja a fentieknek. A lombkoronák színezetében megjelenő inhomogenitás egyik fontos okozója a légifényképek feldolgozása során előállított digitális felszínmodell segítségével ismerhető fel. A gyümölcsöst É-D-i irányban metsző, a környezetéhez képes 5-7 méterrel mélyebb árok viszonylag erőteljes lejtésű oldalain elhelyezkedő fák lombjai társaikat megelőzően váltottak színt, illetve hullottak le. Ez feltehetően a vegetációs időszak során intenzívebben kimerült egyedekre lehet jellemző – ráadásul a szóban forgó területeken a gyümölcsös többi részéhez képest nagyobb a fakiesések és -pótlások (kicsi, nehezen fejlődő vagy fiatal fák) aránya. A relatív kimerültség valószínű oka lehet a lejtés miatt kialakuló, a csapadékvíz áramlása okozta talajerózió. Az idei nyár komoly aszályt hozott, amelynek során eleve kevés, a felszínről ráadásul az időbeli koncentráltág miatt gyorsan lefolyó vízmennyiség jellemezte a kérdéses területet. Ez a talajnedvesség csökkenéséhez, így a talajban található tápelemek korlátozott feltáródásához vezethetett, ami jelentős stressznek tette ki az ide telepített gyümölcsfákat, és kialakíthatta a környezethez (az árok aljához és az ároktól É-i és D-i irányban távolabbi részekhez) képest látott látványos

jelenséget. A termesztett növények ökológiai igényei és a termőterület adottságai, a biotikus és abiotikus tényezők sokasága, a tápelem-ellátottságot meghatározó szempontok ugyanakkor mind hatással vannak a vegetációs indexekkel felmérhető növényi kondícióra, így az abban azonosított leromlás pontos okait célzott diagnosztikai módszerekkel, illetve azok társításával célszerű feltárni. Bokor Péter szaktársam több mintaterületről, így az itt bemutatott gyümölcsös kajszifáiról gyűjtött levélmintákat, amelyek elemzésének eredményeit saját szakdolgozatában mutatja be [38]. A két munka tapasztalatait együttesen szemlélve azok remélhetőleg többet nyújtanak a részek összességénél.

Saját munkám következő fejezete várhatóan a tél végi, kora tavaszi időszakban érkezik el. A kajszit érintő egyik súlyos növénybetegségnek, a csonthéjasok európai fitoplazmás sárgulásának (ESFY) jellegzetes tünete a túl korai levélbontás [12], amit a gazdálkodóval egyeztetve egy következő adatgyűjtő repülés során szeretnék felmérni. A fák többségében még tartó nyugalmi állapothoz képest esetlegesen megjelenő kóros vegetáció várhatóan egyaránt észlelhető lesz a látható fényű és az infravörös tartományt felhasználó indexek segítségével. Ennek és a következő vegetációs időszakban végzett további repüléseknek a segítségével szeretnék idősort kialakítani a felvételekből, amelyek alkalmat adhatnak a gyümölcsfák állapotának nyomon követésére, különös tekintettel a szakdolgozatomban kiszűrt sérülékeny egyedekre. Rendkívül fontos feladat, hogy a távérzékeléses módszerek segítségével tett predikciókat terepi bejárás során validáljuk. Erre a téli és kora tavaszi hónapok kínálnak majd lehetőséget, amivel a gazdálkodóval közösen szeretnék élni. Ennek során az időhatékonyság érdekében felhasználjuk az itt bemutatott térbeli koordinátákat, és helyszíni szemrevételezéssel, esetleges mintavétellel és fényképes dokumentációval rögzítjük a tapasztalatainkat, amelyek a jelen munka minőségellenőrzését jelenthetik. A jövőre nézve további izgalmas lehetőség a (multi)spektrális távérzékelést a gyümölcsfák geometriai adottságainak távérzékeléses mérésével társítani (pl. növény magassága, lombkorona térfogata stb.), amely egyes tanulmányok szerint némely gyümölcsfajnál szorosabb korrelációt mutat bizonyos fiziológiai paraméterekkel és a várható hozammal, mint a spektrális indexértékek [39]. Ez az eszközberuházási költségek szempontjából is jó hír, tekintettel arra, hogy a geometriai jegyek kinyerésére a nagy felbontású RGB szenzorokkal készített felvételek a

leginkább alkalmasak, az ilyen képérzékelővel szerelt eszközök pedig egyúttal a leginkább elérhető árúak. (E tekintetben a legideálisabb technikai megoldást a légi LiDAR szkennerek jelentenék, ezek költségei viszont nem összemérhetők az itt tárgyalt eszközökkel.) A spektrális képalkotás megbízhatósága ráadásul a kifinomult kalibrációs és adatfeldolgozási igényei, valamint a mért reflektancia számos tényező függvényében jellemző változékonysága miatt rendkívül törekeny. Gyümölcsfák esetében csak a lombkorona felső része látható a merőleges vetítésű ortofotókon, így a levelek jelentős részéből nem tudunk adatot kinyerni. A lombok összetett térbeli szerkezete (levelek állása, szóródó fény, árnyékok) és bizonyos környezeti szempontok (napállás, a nem teljesen zárt lombozaton át látható talaj) ráadásul további olyan tényezők, amelyeket kontrollálnunk kell ahhoz, hogy az adatfeldolgozás során használt képpontjaink beszennyeződését elkerüljük. E limitációk a saját munkámat is sújtják, noha a fent bemutatott módszerek segítségével mindent megtettem, hogy megbízható adatokkal dolgozhassak. Távlati célom a rendkívül sokoldalú UAV eszközökre építve a kajsziarackra faj- és fajtaszinten jellemző spektrális és geometriai profil összeállítása, és annak terméshozammal mutatott esetleges összefüggéseinek vizsgálata.

Tapasztalataim alapján a kajszi gyümölcsfák általános kondíciójának távérzékeléses felmérésére viszonylag alacsony bekerülési költségű eszközökkel is alkalom nyílhat. Az itt bemutatott kategóriába tartozó, RGB képérzékelővel szerelt kamerával rendelkező UAV eszköz ára a dolgozat írásakor körülbelül 600-700 ezer forint körül alakul. (Multispektrális társai hasonló repülési tulajdonságokkal, de pl. RTK-képességgel jelentősen komolyabb, ugyanakkor a mezőgazdasági termelésben használatos munkagépek árához képest mégis csekély összegbe, kb. 2 és fél millió forintba kerülnek.) Az adatgyűjtéshez és feldolgozáshoz használt kereskedelmi forgalomban kapható szoftverek licencei akár milliós nagyságrendű kiadást jelenthetnek, ráadásul gyakran csak korlátozott ideig biztosítanak szoftverfrissítéseket és / vagy meghatározott mennyiségű számítógépre telepíthetők. Jó hír ugyanakkor, hogy ma már gyakorlatilag az összes adatgyűjtési és feldolgozási lépéshez rendelkezésre állnak ingyenes vagy nyílt forráskódú megoldások, mint az általam használt GroundStation Pro, QGIS, vagy az AgiSoft Metashape alternatívájaként kipróbált, és az RGB tartományban ugyancsak minőségi eredményeket produkálni képes, itt ugyanakkor nem tárgyalt WebODM [40]. A gyűjtött

nagy mennyiségű adat feldolgozása jelentős számítási kapacitást igényel, amit megfelelő saját hardverrel vagy felhő-alapú adatfeldolgozó szolgáltatások igénybevételével tudunk biztosítani – az előbbi megoldás egyszeri jelentős, az utóbbi alacsonyabb, de folyamatos költségvonzattal jár. Egy RGB UAV-ból, a szükséges kiegészítőkből (pl. tablet, további akkumulátorok), és ingyenesen elérhető szoftverekből felépített „növénymonitoring kezdőszett” a tapasztalataim szerint jelenleg kb. egymillió forintos összegből összeállítható. További tételekként jelentkeznek ugyanakkor az UAV-k jogszerű használatához és szakszerű üzemeltetéséhez kapcsolatos képzések és vizsgák költségei, illetve az adatgyűjtés, -feldolgozás, és a nyert adatok interpretációjához szükséges ismeretek megszerzésének anyagiakban és elsősorban befektetett időben és energiában mért költségvonzata. A gazdálkodók ezért várhatóan a jövőben sem önállóan, hanem szolgáltatók útján vesznek majd igénybe UAV-távérzékelési (és egyéb precíziós) szolgáltatást, amihez a hazai és európai uniós agrárfinanszírozás a következő években remélhetőleg egyre szélesebb körben biztosít majd pályázati forrásokat.

ÖSSZEFOGLALÓ

Szakdolgozatomban olyan távérzékelési módszerre tettem javaslatot, amely alkalmas nagy kiterjedésű gyümölcsültetvények idő- és költséghatékony felmérésére úgy, hogy adatot szolgáltat az individuális gyümölcsfák állapotáról. Erre a célra a pilóta nélküli légi járművek (UAV-k) rugalmas platformot kínálnak. A mintaterületül szolgáló közép-dunántúli kajsziültetvény felett két alkalommal, 2022.06.06-án és 2022.10.08-án végeztem adatgyűjtő repülést egy 20MP felbontású RGB kamerával szerelt (Phantom 4 Pro V2.0), és egy ötsávós multispektrális képalkotó rendszert hordozó UAV-val (Phantom 4 Multispectral, B: 450 ± 16 , G: 560 ± 16 , R: 650 ± 16 , RE: 730 ± 16 , NIR: 840 ± 26 nm, 2MP / sáv). A repülések során készült 2898 darab légifelvétel feldolgozásával előállítottam a mintaterület RGB, illetve kék, zöld, vörös, vörös él és közeli infravörös ortofotó-mozaikjait. A képpontokon kiszámítottam a VARI (Visible Atmospheric Resistant Index), TGI (Triangular Greenness Index) és NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) vegetációs indexek értékét. A gyümölcsfák lombkoronáit a digitális felszín és domborzatmodell kombinációjával előállított rasztermaszkkal határoltam el a háttértől. Összesen 1456 gyümölcsfát azonosítottam a mintaterületen, amelyek poligonjaira kiszámítottam a vegetációs indexek átlagértékeit, amelyek közül a VARI és NDVI értékeinek rendkívül erős pozitív korrelációját mutattam ki. A leggyengült állapotú, betegségekkel szemben sérülékeny kajszi fák elkülönítéséhez először indexenként kiválasztottam a leggyengébb átlagértéket mutató 146 egyedet (10%), majd ezek poligonjait átlapoltam egymással. Az eredményül kapott júniusi és októberi VARI-TGI alapú kockázati kompozitokat ezután ugyancsak átlapoltam egymással, majd az NDVI adatokat hozzájuk illesztve kialakítottam dolgozatomban legfontosabb eredményét, a végső kockázati kompozitot. Ezen az ültetvény 44 legsérülékenyebb állapotú gyümölcsfája látható (3,02%), amelyek közös vonása, hogy mindkét felvételezési időpontban bekerültek az állomány leggyengébb 10%-ba legalább egy vegetációs index alapján – azaz, az adott indexre nézve pozitívnak tekinthetők. A feltevésemet, miszerint minél több indexérték alapján pozitív egy egyed, annál gyengébb fiziológiai állapotú, statisztikai próbákkal igazoltam. A sérülékeny gyümölcsfák azonosításukat követően a közölt WGS84 koordinátáik alapján időhatékonyan, célzottan felkereshetők szemrevételezés és mintavétel céljából.

SUMMARY

In my thesis, I attempted to outline a remote sensing method suitable for cost- and time-effective surveying of expansive fruit orchards, and providing data on the health status of individual fruit trees. Unmanned aerial vehicles (UAVs) offer a flexible platform for reaching such a goal. Two flights of aerial data collection were performed over an apricot orchard located in central Transdanubia on 06/06/2022 and 08/10/2022. Two UAVs were selected for the task, one equipped with a 20MP RGB camera (Phantom 4 Pro V2.0) and one carrying a five-band multispectral camera set (Phantom 4 Multispectral, B: 450 ± 16 , G: 560 ± 16 , R: 650 ± 16 , RE: 730 ± 16 , NIR: 840 ± 26 nm, 2MP / band). RGB and blue, green, red, red edge and near infrared band orthomosaics were created from a total of 2898 captured aerial images. Visual Atmospheric Resistant Index (VARI), Triangular Greenness Index (TGI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) data were calculated for each pixel of the sampled orchard. Canopies of individual apricot trees were separated from their background based on a raster mask created by combining digital surface and elevation model data. A total of 1456 trees were identified and average values of each vegetation index were calculated for the individual polygons. A strong positive association was found between VARI and NDVI data. As a first step to isolate trees with low health and potential vulnerability against plant diseases, 146 individuals with the lowest values of each vegetation index were selected (10% of total trees). Next, intersections of the polygons of filtered trees were performed, providing risk composites based on June / October VARI and TGI data. These composites were once again intersected with each other and appended by NDVI data, creating the final risk composite, comprising the most vulnerable 44 (3,02%) trees of the orchard. A shared trait among these individuals is, that based on at least one vegetation index, they had been included in the group of weakest trees both in June and October. In other words, they had been repeatedly found to be positive against the vegetation indices. My hypothesis, that fruit trees positive against multiple indices are characterized by lower health was supported by the results of statistical tests. Apricot trees identified as having low health can subsequently be visually examined in the field utilizing their WGS84 coordinates provided here.

Köszönöm Mókimnak és Babbancsnak, hogy öt héten át türelmesen viselték a derengő monitor előtt töltött estéimet, néha fél éjszakáimat. Csabának pedig rendkívüli segítőkészségeért, érdeklődéséért és nyitottságáért szeretnék köszönetet mondani, és amiért befogadta a repülő masináimat a gyümölcsösébe.

IRODALOMJEGYZÉK

- [1] J. Papp, Gyümölcsstermesztési alapismeretek, Budapest: Mezőgazda Kiadó, 2003.
- [2] I. Gonda and Á. Csihon, A gyümölcsstermesztés alapjai, Debrecen: Debreceni Egyetemi Kiadó, 2018.
- [3] Á. Csihon és I. Gonda, A gyümölcsstermesztés technológiája, Debrecen: Debreceni Egyetemi Kiadó, 2020.
- [4] O. Viczián, B. Kiss, E. Kiss, S. Orosz, A. L. Juhász és E. Megenthaller, „MIT TUDUNK A 'CA. PHYTOPLASMA PRUNORUM' FITOPLAZMA TERJEDÉSÉRŐL MA ÉS MIT GONDOLUNK UGYANERRŐL?,” *NÖVÉNYVÉDELEM*, %1. kötet78 (53), %1. szám12, pp. 525-531, 2017.
- [5] G. Tarcali and J. Kövics, "New data of 'Ca. Phytoplasma prunorum' occurrence in the Eastern part of the Carpathian-Basin.," *Journal of Agricultural Sciences - Acta Agraria Debreceniensis*, vol. 50, pp. 105-110, 2012.
- [6] B. Péntes és L. Szalay, Kajszi, Budapest: Mezőgazda Kiadó, 2003.
- [7] G. Bálint, „balintgazda.hu,” 16 07 2019. [Online]. Available: <https://balintgazda.hu/minden-heten-szuret/julius/kajszi.html>. [Hozzáférés dátuma: 06 11 2022].
- [8] L. Pagliari and R. Musetti, "Phytoplasmas: An Introduction," *Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.)*, vol. 1875, pp. 1-6, 2019.
- [9] B. Oláh, *Érdi kajszi ültetvény fitoplazma- és vírusfertőzöttségének vizsgálata*, Szent István Egyetem, szakdolgozat, 2017.
- [10] E. Seemüller and B. Schneider, "'Candidatus Phytoplasma mali', 'Candidatus Phytoplasma pyri' and 'Candidatus Phytoplasma prunorum', the causal agents of apple proliferation, pear decline and European stone fruit yellows, respectively," *International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology*, vol. 54, pp. 1217-1226, 2004.
- [11] P. Ermacora and R. Osler, "Symptoms of Phytoplasma Diseases," *Methods in Molecular Biology (Clifton, N.J.)*, vol. 1875, pp. 53-67, 2019.
- [12] C. Marcone, B. Jarausch és W. Jarausch, „CANDIDATUS PHYTOPLASMA PRUNORUM, THE CAUSAL AGENT OF EUROPEAN STONE FRUIT YELLOWS: AN OVERVIEW.,” *Journal of Plant Pathology*, %1. kötet92, %1. szám1, pp. 19-34, 2010.

- [13] L. Carraro, N. Loi and P. Ermacora, "Transmission characteristics of the European stone fruit yellows phytoplasma and its vector *Cacopsylla pruni*," *European Journal of Plant Pathology*, vol. 107, pp. 695-700, 2001.
- [14] G. M. Gurr, A. C. Johnson, G. J. Ash, B. A. L. Wilson, M. M. Ero, C. A. Pilotti, C. F. Dewhurst and M. Y. You, "Coconut Lethal Yellowing Diseases: A Phytoplasma Threat to Palms of Global Economic and Social Significance.," *Frontiers in Plant Science*, vol. 7, no. 1521, pp. 1-21, 2016.
- [15] J. Albetis, S. Duthoit, F. Guttler, A. Jacquin, M. Goulard, H. Poilvé, J.-B. Féret and G. Dedieu, "Detection of Flavescence dorée Grapevine Disease Using Unmanned Aerial Vehicle (UAV) Multispectral Imagery.," *Remote Sensing*, vol. 9, no. 308, pp. 1-20, 2017.
- [16] G. Tarcali, G. J. Kövics and E. Kiss, "Occurrence of Stone Fruit Yellows Phytoplasma Disease (*Candidatus Phytoplasma prunorum*) in Hungary and Central Europe," in *Micorbial Diversity and Biotechnology in Food Security*, Springer India, 2014, pp. 205-216.
- [17] M. Veróné Wojtaszek, "Fotointerpretáció és távérzékelés," Nyugat-magyarországi Egyetem, Székesfehérvár, 2011.
- [18] M. Wójtowicz, A. Wójtowicz and J. Piekarczyk, "Application of remote sensing methods in agriculture," *Communications in Biometry and Crop Science*, vol. 11, no. 1, pp. 31-50, 2016.
- [19] C. Zhang, J. Valente, L. Kooistra, L. Guo and W. Wang, "Orchard management with small unmanned aerial vehicles: a survey of sensing and analysis approaches," *Precision Agriculture*, no. 22, pp. 2007-2052, 2021.
- [20] S. Khanal, K. C. Kushal, J. P. Fulton, S. Shearer and E. Ozkan, "Remote Sensing in Agriculture – Accomplishments, Limitations, and Opportunities," *Remote Sensing*, vol. 12, no. 22: 3783, 2020.
- [21] National Aeronautics and Space Administration (NASA), „LANDSAT 1,” NASA, [Online]. Available: <https://landsat.gsfc.nasa.gov/satellites/landsat-1/>. [Hozzáférés dátuma: 15 11 2022].
- [22] A. Roman and T.-M. Ursu, "Multispectral satellite imagery and airborne laser scanning techniques for the detection of archaeological vegetation marks," in *LANDSCAPE ARCHAEOLOGY ON THE NORTHERN FRONTIER OF THE ROMAN EMPIRE AT POROLISSUM. An interdisciplinary research project*, Cluj-Napoca, Mega Publishing House, 2016, pp. 141-150.

- [23] F. DadrasJavan, F. Samadzadegan, S. H. S. Pourazar and H. Fazeli, "UAV-based multispectral imagery for fast Citrus Greening detection," *Journal of Plant Diseases and Protection*, no. 126, pp. 307-318, 2019.
- [24] Da-Jiang Innovations (DJI), "Phantom 4 Pro V2.0," DJI, 01 2020. [Online]. Available: <https://www.dji.com/hu/phantom-4-pro-v2>. [Accessed 24 11 2022].
- [25] Da-Jiang Innovations (DJI), „P4 Multispectral,” DJI, 09 2019. [Online]. Available: <https://www.dji.com/hu/p4-multispectral>. [Hozzáférés dátuma: 24 11 2022].
- [26] Da-Jiang Innovations (DJI), *DJI GS Pro (Software.)*, DJI, 2022.
- [27] AgEagle-Micasense, "How to use the Calibrated Reflectance Panel (CRP)," AgEagle, 10 10 2022. [Online]. Available: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/1500001975662-How-to-use-the-Calibrated-Reflectance-Panel-CRP->. [Accessed 23 11 2022].
- [28] GISGeography, „GISGeography,” 06 06 2022. [Online]. Available: <https://gisgeography.com/what-is-photogrammetry/>. [Hozzáférés dátuma: 22 11 2022].
- [29] Interspect Kft., „ORTOFOTÓ-TÉRKÉPEK,” Interspect Kft., 2022. [Online]. Available: www.interspect.hu/ortofoto.html. [Hozzáférés dátuma: 22 11 2022].
- [30] G. Bakó, "Légifényképből térkép - Hogyan készülnek az ortofotó-térképek," in *Légi fényképezés a gazdálkodásban és a közszolgáltatásban*, Budapest, E-Government Alapítvány a Közigazgatás Modernizációjáért, 2014, pp. 8-12.
- [31] AgiSoft LLC., *AgiSoft Metashape Professional (Version 1.8.1) (Software)*, 2022.
- [32] AgEagle-Micasense, „Use of Calibrated Reflectance Panels For MicaSense Data,” AgEagle, 25 01 2022. [Online]. Available: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/115000765514-Use-of-Calibrated-Reflectance-Panels-For-RedEdge-Data>. [Hozzáférés dátuma: 23 11 2022].
- [33] AgEagle-Micasense, „How do calibrated reflectance panels improve my data?,” AgEagle, 26 01 2022. [Online]. Available: <https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/220154947-How-do-calibrated-reflectance-panels-improve-my-data->. [Hozzáférés dátuma: 23 11 2022].
- [34] QGIS Association, *QGIS (version 3.24.3 - Tisler) (Software.)*, QGIS Association, 2022.
- [35] A. A. Gitelson, R. Stark, U. Grits, D. Rundquist, Y. Kaufman és D. Derry, „Vegetation and soil lines in visible spectral space: a concept and technique for

- remote estimation of vegetation fraction,” *International Journal of Remote Sensing*, %1. kötet23, %1. szám13, pp. 2537-2562, 2002.
- [36] R. E. Hunt Jr, P. C. Doraiswamy, J. E. McMurtrey, C. S. Daughtry, E. M. Perry és B. Akhmedov, „A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale,” *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, %1. kötet21, pp. 103-112, 2013.
- [37] „Statistics Kingdom,” 11 2017. [Online]. Available: <https://www.statskingdom.com/index.html>. [Hozzáférés dátuma: 07 12 2022].
- [38] P. Bokor, *Mintavételi helyek kiválasztása levélanalízis céljára nagyfelbontású légifelvételek felhasználásával*, Óbudai Egyetem, szakdolgozat, kiadás alatt.
- [39] A. Matese és S. F. Di Gennaro, „Beyond the traditional NDVI index as a key factor to mainstream the use of UAV in precision viticulture,” *Scientific Reports*, %1. kötet11, %1. szám2721, 2021.
- [40] WebODM Authors, „OpenDroneMap,” [Online]. Available: <https://www.opendronemap.org/webodm/>. [Hozzáférés dátuma: 10 12 2022].

ÁBRAJEGYZÉK

1. ábra. A kajszi hazai termőfajai.....	12
2. ábra. A csonthéjasok európai sárgulásának (ESFY) rovarvektora és tünetei	19
3. ábra. Az egészséges és a stressznek kitett növényzetre jellemző reflektancia-görbe	26
4. ábra. A mintavételi területként szolgáló kajsziültetvény elhelyezkedése	29
5. ábra. A gyümölcsös hosszmeteszének relatív magassági viszonyai.....	30
6. ábra. Az adatgyűjtéshez használt UAV-k és tartozékaik.....	33
7. ábra. A 2022.10.08-i multispektrális felvételező repülés terve	36
8. ábra. Az adatgyűjtés, -feldolgozás, és -megjelenítés során használt szoftverek, funkciók és az előállított termékek	38
9. ábra. A lombkoronák háttértől való elkülönítésének lépései.....	41
10. ábra. A 2022.06.06-i adatgyűjtő repülés felvételeiből készített vágatlan RGB ortofotó-mozaik	45
11. ábra. A 2022.10.08-i adatgyűjtő repülés során készült felvételekből összeállított RGB ortofotó-mozaik és digitális felszínmodell	46
12. ábra. A mintaterület 2022.10.08-án elvégzett multispektrális felvételezése alapján elkészített ortofotó-mozaikok	47
13. ábra. Az lehatárolt mintaterület képpontjaira kiszámított VARI, TGI és NDVI vegetációs indexek.....	48
14. ábra. A gyümölcsfákra jellemző indexértékek mennyiségi eloszlása.....	49
15. ábra. A VARI és NDVI indexértékek korrelációs számítással megerősített erős pozitív összefüggése.....	49
16. ábra. A júniusi és októberi VARI, TGI, és NDVI kockázati kompozitok	50
17. ábra. A végső kockázati kompozit.....	51

TÁBLÁZATOK JEGYZÉKE

1. táblázat. A kajszi ökológiai tűrőképessége	13
2. táblázat. A mintaterület sarokpontjainak WGS84 és EOVS koordinátái.....	30
3. táblázat. Az alkalmazott UAV-k legfontosabb tulajdonságai.....	34
4. táblázat. Az adatgyűjtő repülések legfontosabb paraméterei.....	37
5. táblázat. A dolgozatban felhasznált vegetációs indexek.....	40
6. táblázat. Az ortofotók térbeli pontossága	48
7. táblázat. A gyenge kondíciójú gyümölcsfák pozíciója	53