



SZAKDOLGOZAT

Csepregi Tamás

Mezőgazdasági és Élelmiszeripari

Gépészmérnök BSc

Gödöllő

2023



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem
Szent István Campus
Műszaki Intézet
Mezőgazdasági és Élelmiszeripari gépészmérnök

Mezőgazdasági Területek Drónos

Távérzékelésének Lehetőségei

Belső konzulens:	Bércesi Gábor egyetemi tanársegéd
Belső konzulens intézete/tanszéke:	Műszaki Intézet Járműtechnika Tanszék
Külső konzulens:	Varga Krisztián fejlesztőmérnök
Készítette:	Csepregi Tamás HMJAVI nappali tagozat
Intézet:	Műszaki Intézet
Tanszék:	Járműtechnika Tanszék

Gödöllő

2023

**MŰSZAKI INTÉZET MEZŐGAZDASÁGI ÉS ÉLELMISZERIPARI
GÉPÉSZMÉRNÖK ALAPSZAK
Erőgéptechnika specializáció**

SZAKDOLGOZAT

feladatlap

Csepregi Tamás Zoltán

részére

A szakdolgozat címe:

Mezőgazdasági területek drónos távérzékelésének lehetőségei

Feladatkiírás:

Szakirodalmi adatok alapján tekintse át a talaj nedvességtartalom mérésnek lehetőségeit távérzékeléssel gyűjtött adatok alapján. Önálló vizsgálatokkal egy választott talajtípus esetében ellenőrizze a felkutatott összefüggések alkalmazhatóságát, végezzen bizonytalanság becslést. Vizsgálja meg, hogy a növényborítottság hogyan befolyásolja a módszerek alkalmazhatóságát, adott kultúra esetén adjon becslést arra, hogy mekkora növényborítottságig alkalmazhatók a távérzékeléses talajnedvességtartalom meghatározási módszerek.

Közreműködő tanszék: Járőműtechnika Tanszék

Külső konzulens: Varga Krisztián, Fejlesztőmérnök, Febagro Zrt.

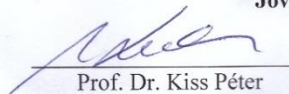
Belső konzulens: Bércesi Gábor, egyetemi tanársegéd, MATE, Műszaki Intézet, Járőműtechnika Tanszék

Beadási határidő: 2023. november 2. (szerda) 12.00 óra

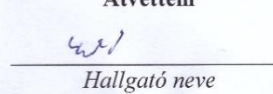
Gödöllő, 2023. június 15.

Jóváhagyom

Átvettem


Prof. Dr. Kiss Péter
tanszékvezető


Dr. Bartfai Zoltán
szakfelelős


Hallgató neve
hallgató

A dolgozat készítőjének külső konzulense nyilatkozom arról, hogy a hallgató az előre egyeztetett konzultációkon megjelent.

Gödöllő, 2023. 10 hó 29 nap


(külső konzulens)

Tartalom:

1. Bevezetés, célkitűzés	3
2. Az adatgyűjtés és módszerei	4
2.1 Történeti áttekintés.....	4
2.2 A spektroszkópia.....	6
2.3 A reflektancia mérése	9
2.4 Feldolgozási lehetőségek	10
2.5 Indexek és számításaik.....	11
3. A talaj nedvességtartalom mérése és hatásai	13
3.1 A talaj és tulajdonságai	13
3.2 A nedvességtartalom hatása a talajra	14
3.3 A talaj nedvességtartalom mérésének lehetőségei	14
3.3.1 A gravimetriás szárítás.....	14
3.3.2 Atomfizikai módszerek:.....	15
3.3.3 Gyors, elektromos mérési eljárások.....	17
3.3.4 Radaros módszer.....	17
3.3.5 Sugárzás távérzékeléses módszerek.....	18
3.4 A drónos távérzékelés elve, eszközei és módszerei.....	20
3.4.1 A drónok	20
3.4.2 A multispektrális kamerák és drónos alkalmazásaik	21
3.4.3 A drónos felmérés elve	22
3.4.4 A távérzékelésből nyert adatok, és felhasználásuk	23
4. A drónos távérzékelés mezőgazdasági alkalmazásai	24
4.1 A kitűzött probléma, megoldási lehetőségek	24
4.2 A vizsgált talajok	25

4.3 A méréshez szükséges eszközök.....	26
4.3.1 A multispektrális felmérő drón	26
4.3.2 A gravimetriás méréshez használt eszközök.....	28
4.3.3 Az ASD spektrofotométer.....	30
4.3.4 Az adatokat feldolgozó szoftverek.....	32
4.4 A mérés menete.....	32
4.4.1 A drónos mérés és talajmintavétel	32
4.3.2 A gravimetriás mérés	33
4.3.3 A spektrofotométeres mérés	35
5. Az eredmények értékelése	36
5.1 Gravimetriás mérések értékelése	36
5.2 Reflektancia becslése a multispektrális felvételekből.....	37
5.2.1. Reflektanciaadatok becslése Pix4D szoftverrel	38
5.2.2. Reflektanciaértékek becslése a DJI számítási módszere alapján.....	39
5.2.3. Reflektanciaértékek becslése referencia adatok alapján	39
5.3. Nedvességtartalom becslése multispektrális adatok alapján.....	41
5.4 Hiperspektrális mérések értékelése	43
5.4.1 Hiperspektrális felvételek általános értékelése	47
5.4.2 Az NSMI és NDMI becslésvizsgálata	48
5.4.3 Egyedi módszer kidolgozása a relatív méréshez	50
6. Összefoglalás	53
7. Summary	54
8. Nyilatkozatok.....	55
9. Irodalomjegyzék	57

1. Bevezetés, célkitűzés

A modern mezőgazdaságban elengedhetetlen, hogy pontos adatokat tudjunk nyerni a területekről, amelyeken gazdálkodunk. A precíziós mezőgazdasági módszerek terjedésével adott mennyiségű mezőgazdasági terméket kisebb költséggel tudunk előállítani, vagyis növelhetjük a hatékonyságot. A drónos távérzékelés alkalmazásával a mezőgazdaságban dolgozók költséghatékonyan értékes információkhoz juthatnak a terület és a növényállomány állapotára vonatkozóan, hogy manuális módszerekkel át kellene fésülni az egész táblát. A mezőgazdasági, az erdészeti, különböző ipari tevékenységek, vagy a hadászat területén számos terepen mozgó nehéz járművet alkalmazunk. A tevékenységek hatékony elvégzésének feltétele, hogy biztosított legyen a gépeknek a területen való mozgásának feltételei. A járművek terepi mozgékonyágát számos tényező befolyásolja, melyek részben a gép, részben a terület adottságaihoz kapcsolódnak. A terület jellemzői közül a legfontosabbak a domborzati jellemzők, mikro -és makroakadályok, valamint a talaj hordképességét jellemző paraméterek. A mozgékonyághoz egyrészt a talaj nyomószilárdsága kell, hogy elegendően nagy legyen a jármű járószerkezete által okozott terhelésnek az elviseléséhez, anélkül, hogy a mozgékonyágot akadályozó deformáció alakulna ki. Továbbá a talaj nyírószilárdságának is elegendőnek kell lennie a szükséges vonóerő létrehozásához. A fenti talajparamétereket a talaj sok fizikai jellemzője befolyásolhatja, melyek közül a legjelentősebbek a talaj összetétele és a nedvességtartalom.

A munkám célja a talaj víztartalmának hagyományos, és távérzékeléssel gyűjtött adatokon alapuló meghatározási, becslési módszereire vonatkozó szakirodalom áttekintése után egyes kiválasztott módszerek gyakorlati alkalmazásának bemutatása, és a velük nyerhető eredmények összehasonlítása. Ennek érdekében, kiválasztott, eltérő nedvességtartalmú és összetételű talajokból mintákat véve laboratóriumi körülmények között meghatározom azok nedvességtartalmát, és ezzel párhuzamosan is-situ és laboratóriumi multispektrális reflektancia felvételeket készítek a mintákról, illetve a vizsgált területekről. A távérzékeléses módszerekkel gyűjtött adatokból a szakirodalomban elérhető különböző számítási eljárásokkal becslést adok a nedvességtartalom értékeire, és összevetem őket a hagyományos módszerrel végzett mérésből kapott értékekkel. Az eredmények alapján becslést adok a mérés bizonytalanságára, valamint arra is, hogy a növényborítottság hogyan befolyásolja a nedvességtartalom meghatározás hibáját.

2. Az adatgyűjtés és módszerei

2.1 Történeti áttekintés

A távérzékelés és fotogrammetria újabban igen fontos téma a tudományos világban, hiszen a technológia fejlődésével igen sok új lehetőség nyílt arra, hogy más perspektívából is betekintést nyerjünk bizonyos folyamatokba. Legyen az a mezőgazdaságban való alkalmazás a növények állapotának felmérésére, vagy az építkezéseken, esetleg történelmi helyszíneken való lidar alapú felmérés, számos területen hasznosítható ez az adatgyűjtési módszer. A távérzékelés olyan információgyűjtést jelent, amikor az érzékelő és az érzékelni kívánt jelenség nincsenek egymás közvetlen közelében, az információt az atmoszféra zavaró hatásán át terjedő rezgésjelenség, legtöbbször elektromágneses sugárzás hordozza. Ennek elődjének tekinthető a légi fényképek készítése amikor a felmérés közben a felmérést végző személy is a levegőben tartózkodott. Az első fennmaradt levegőből készített fényképet 1860-ban készítette James Wallace Black, egy hőlégballonról, amely Boston felett lebegett. A hagyományos légi fényképezést ezután szerették volna továbbfejleszteni, hogy akár személyzet nélkül is lehessen felvételeket készíteni, hiszen egy kamera súlya önmagában jelentősen kevesebb mint ha emellett a működéshez szükséges fotográfust is hozzáadjuk. Erre a célra fejlesztett 1903-ban egy német mérnök, Alfred Maul egy rakétát, amely pár száz méter magasságba juttatott egy kamerát, hogy azután egy ejtőernyővel való lefelé ereszkedés közben képeket készítsen. Julius Neubronner más ötlettel állt elő. A gyógyszereket szállító betanított galambjai nyakába akasztott egy kamerát és időzítve készített képeket. (1. ábra) (Neubronner 2017)



1. ábra: Neubronner galambjai

(<https://slate.com/culture/2012/10/julius-neubronner-and-the-amazing-world-of-pigeon-photography.html>)

Az így készült képek ténylegesen kielégíthetik a “madártávlat” elnevezést. A következő nagy lépést a légi felvételek készítésében az 1. világháború alkalmával tették, hiszen rájöttek arra, hogy repülőgépből készített fényképek alapján könnyebben lehet következtetni az ellenfél következő lépéseire. A távérzékelés ekkor nehezen volt megvalósítható hiszen míg a fényképezést lehetett automatizálni, a fényképezőgép feljuttatása és a célpont fölötti mozgatása még nem volt megoldható emberi beavatkozás nélkül. A nagyobb területek távérzékeléssel gyűjtött adatainak hatékony értékeléséhez az elkészített képeket rendszerbe kell foglalni, egy térképen kell elhelyezni őket. A távérzékeléssel gyűjtött adatok kvantitatív elemzésével a fotogrammetria tudományága foglalkozik. A korszerű fotogrammetria műholdakon, vagy légijárműveken elhelyezett érzékelők által gyűjtött adatokra támaszkodik, melyek kiegészülnek a korszerű helymeghatározás eszközrendszerével, esetlegesen kontakt méréssel gyűjtött referencia adatokkal és az ezeket összefogó geoinformatikai rendszerek alkalmazásával. A műholdakra szerelt érzékelők kezdetben monokromatikus képet készítettek, majd több hullámhossztartományban történő egyidejű képkészítéssel színes kép megjelenítésére is lehetőség nyílt. Ezen túl elkezdtek elterjedni a nem

látható fénytartományban képeket készítő szenzorok is. A műholdas adatok felhasználásával ma már körülbelül 10 méter per pixel pontossággal szinte bármelyik hullámhossztartományban, bárholnan kaphatunk adatokat és elemezhetjük őket. Ez a térbeli felbontás azonban legjobb esetben is csak mezőgazdasági felmérésekre alkalmas, hiszen minden egyes pixel a 100 négyzetméteres terület átlagos értékeit veszi fel, ha ezen belül található egy vizes terület is és egy száraz terület is, az eredmény egy átlagérték lesz, ami nem feltétlenül jellemző a területre. (Russel 2010) Az új pilóta nélküli légi járművek (UAV) vagy egyszerűbben drónok előnye pontosan ebben rejlik, hiszen ezek segítségével centiméteres pontossággal tudunk képeket készíteni. Digitális gépek révén rögtön helyadatokat kapcsolhatunk a képekhez, amelyek alapján algoritmusokkal automatikusan összevonhatók a képek egy nagy orthomozaiikká, ezzel jelentősen lecsökkentve a hasonló távérzékeléshez szükséges adatelemzés idejét. Az új technológiákkal lokálisan akkor készítünk felvételeket amikor arra szükség van, mindig friss adatokkal rendelkezünk és gyorsan tudunk reagálni a változó körülményekre. A modern, sokféle hullámhosszon végzett mérés eredményét értékelő spektroszkópia lehetőséget ad arra, hogy az elkészített képek alapján következtessünk különféle tulajdonságokra. Például ilyen lehet a növények vegetációs állapota, de ilyen a talaj nedvességtartalma is. A fotogrammetria és távérzékelés fejlődése és a pontos adatgyűjtés könnyen elérhetővé válása miatt sokkal precízebb méréseket tudunk folytatni a területeken, sok tudományos kutatásban lehet a segítségünkre, illetve sok szakmához kapcsolódóan adhat értékes információt, amely alapján aztán döntést lehet hozni.

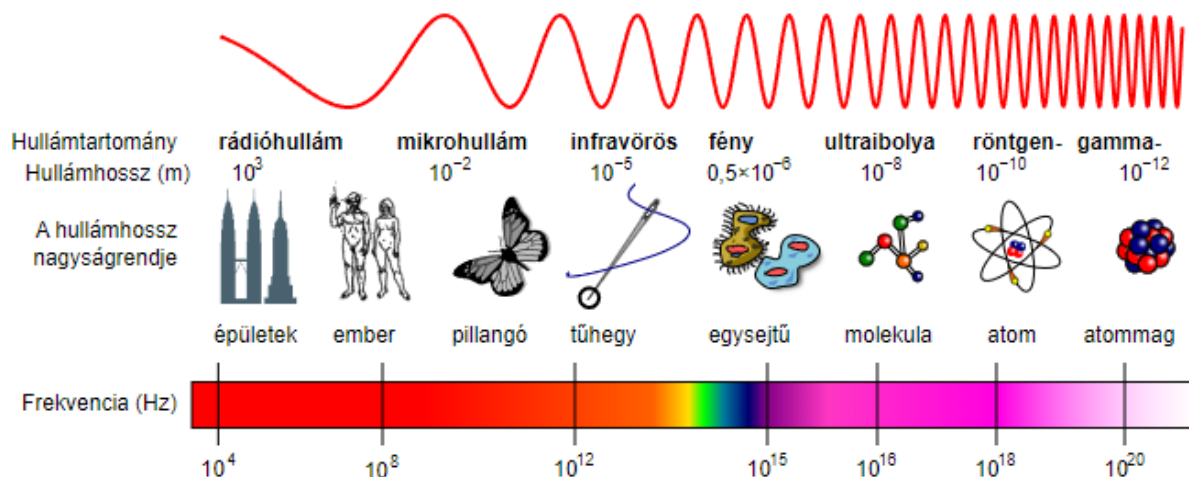
2.2 A spektroszkópia

A spektroszkópia az a tudományág, amely az anyag és az elektromágneses sugárzás kölcsönhatásait. Spektroszkópia alatt érthetnénk akár a látást is, hiszen a látható fény is az elektromágneses sugárzás egy bizonyos hullámhossztartománya, de általában véve csak olyan esetekben szoktunk spektroszkópiáról beszélni, ahol valamilyen speciális műszerrel, adott hullámhossztartományban vizsgáljuk az anyagot. (David 1962) A spektroszkópiás méréseket jelentősen befolyásolják az anyag jellemzői (felület textúrája, összetétel...) és környezeti tényezők is, mint a megvilágítás jellemzői, a hőmérséklet, vagy az érzékelő és a vizsgált tárgy távolsága (levegőréteg vastagsága). A mérési módszer előnye, hogy roncsolásmentesen, akár távérzékeléssel is végezhető, így gyorsan és hatékonyan juthatunk adatokhoz. (Edward 2009)

Az elektromágneses spektrum 7 részre bontható:

- γ -sugárzás ($\approx 0\text{pm} - 10\text{pm}$),
- röntgen sugárzás ($10\text{pm} - 10\text{nm}$),
- ultraibolya sugárzás ($10\text{nm} - 400\text{nm}$),
- látható fény ($380\text{nm} - 750\text{nm}$),
- infravörös sugárzás ($100\mu\text{m} - 1\mu\text{m}$),
- mikrohullámú sugárzás ($1\text{m} - 1\text{mm}$),
- rádióhullámok (10m fölött).

A **Error! Reference source not found.** az elektromágneses spektrum hullámhossz szerinti eloszlását szemlélteti.



2. ábra: Az elektromágneses spektrum

(https://eta.bibl.u-szeged.hu/2173/2/az_elektromagneses_spektrum.html)

Ezeknek a sugárzási tartományoknak mindegyike más tulajdonságokkal rendelkezik és az anyagokra máshogyan hat. A sugárzás hullámhossza és a sugárzás energiája között az összefüggést Planck egyenletével írjuk le: μ

$$E = h \cdot f = h \cdot \frac{c}{\lambda} \quad (1)$$

ahol:

h: Planck állandó [Js],

f: sugárzás frekvenciája [Hz],

c: fénysebesség [m/s],

λ : sugárzás hullámhossza [m],

A sugárzás kölcsönhatása az anyaggal klasszikus esetben lehet visszaverés (reflexió), elnyelés (adszorpció), kibocsátás (emisszió) és áteresztés (transzmisszió). (Hollas 1982) A spektroszkópiás mérések elsősorban az anyagról visszaverődő fény (reflexió) elemzésén alapulnak. A felületről visszavert fény intenzitása, és annak hullámhossz szerinti eloszlása természetesen nem csak az anyag jellemzőitől, hanem a megvilágítás minőségétől, a fényforrás kibocsátott sugárzásának intenzitásának hullámhossz szerinti eloszlásától és a beesési szögtől is függ. Ezért a visszavert fénymennyiség abszolút értéke alapján nem lehet a különböző anyagokat összehasonlítani, így a gyakorlati spektroszkópiában a reflektancia fogalmát alkalmazzuk, melyet a vizsgált felületre beeső és az onnan visszavert fény intenzitásának arányaként definiálunk.

$$R(\lambda) = \frac{L_{visszavert}(\lambda)}{L_{beeső}(\lambda)}, \quad (2)$$

ahol:

R – a reflektancia a hullámhossz függvényében [-],

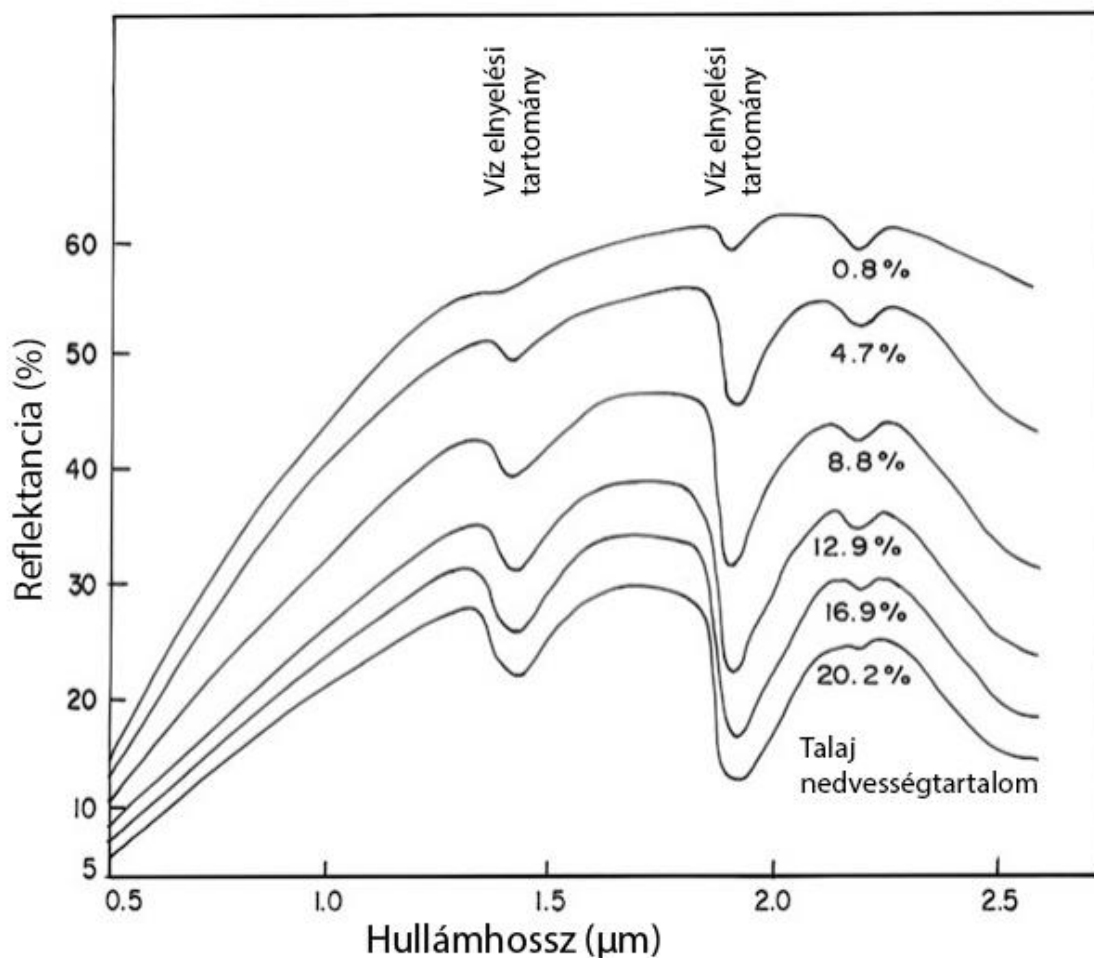
$L_{visszavert}$ – a vizsgált felületről visszaverődő fényintenzitás (radiancia) a hullámhossz függvényében $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,

$L_{beeső}$ – a vizsgált felületre beeső fényintenzitás (radiancia) a hullámhossz függvényében $\left[\frac{W}{m^2}\right]$,

A spektroszkópiában a reflektancia hullámhossz szerinti eloszlását vizsgáljuk. Abban az esetben, ha a reflektancia mérése egyidőben 2 – 10 hullámhossztartományban (sávon) történik, multispektrális, annál több sáv esetén hiperspektriális vizsgálatról beszélhetünk.

A talaj nedvességtartalmának becslésére leginkább az infravörös sugárzás 700 és 2500 nm hullámhossztartományát alkalmazzák (közeli infravörös, NIR és rövidhullámú infravörös - SWIR tartományok), mert itt a víz jelenléte a látható tartománynál nagyobb mértékben befolyásolja a

visszavert sugárzás spektrumát. A nedvességtartalom és reflektancia kapcsolatát a 3. ábra mutatja be.



3. ábra: A reflektancia és a víztartalom közötti kapcsolat

(Ravi Shankar Dwivedi Remote Sensing of Soils 2017)

2.3 A reflektancia mérése

Különböző hullámhossztartományokban a fényintenzitás mérésével a hagyományos RGB kamerákban is találkozunk, melyek azonban kizárólag a látható fény három hullámhossztartományát érzékelik, melyekből összeállítják a színes képet. A korszerű kamerák olyan fényérzékelő elemeket alkalmaznak, melyek a beeső fény intenzitását képpontonként érzékelik és a hozzájuk kapcsolódó elektronika a mért jellemzőket digitális jellé alakítja. Így a képek digitális formában az alkalmazott érzékelőelem mérési tartományának megfelelő digitális számértékeként jelennek meg, ez tehát nem reflektancia értékeket jelent. A látható tartományban

működő kamerák a három vizsgált hullámhossztartományhoz tartozóan képpontonként három különböző érzékelőelemet tartalmaznak. Multispektrális és hiperspektrális spektrofotométerek is több, különböző hullámhossztartományra érzékeny szenzort tartalmazhatnak, ugyanakkor a nagy felbontása (akár 1 nm-es sáv szélességű) mérés esetén ezeket különböző szűrőelemekkel is ki kell egészíteni. A 4. ábra egy 6 szenzorral rendelkező multispektrális kamerát mutat be.



4. ábra: Micasense Rededge multispektrális kamera

<https://support.micasense.com/hc/en-us/articles/4410824602903-RedEdge-P-Integration-Guide>

A spektroszkópiában a képalkotó műszerek mellett, elsősorban hiperspektrális mérésre olyan spektrofotométereket is alkalmaznak, melyek csak egyetlen pontban képesek mérni a beeső fény spektrális eloszlását.

A szenzorok digitális jelének reflektancia értékekké alakítását a legtöbb mérőműszer kalibrált, ismert reflektanciával rendelkező referencia felületek segítségével oldja meg. A vizsgált felület mérését megelőzően adott megvilágítási mellett a műszerrel rögzítjük a referencia panelről visszavert fény intenzitási spektrumát, és annak ismert reflektanciája alapján korrigáljuk a később rögzített felvételek adatpontjait, így átszámítva azokat reflektancia értékekre.

2.4 Feldolgozási lehetőségek

A mért reflektancia adatok feldolgozáshoz a legtöbb esetben korszerű térinformatikai szoftvereket alkalmazunk, melyek egyedi algoritmusokat és kódot használva képesek arra, hogy az elkészített

képeket rendezzék, helyadatok alapján térképen megfelelő helyre helyezzék, és ezután összefűzzék. A képek összeillesztése után kalkulációkat lehet végezni az egész felmért terület adataiból. A szoftver reflektancia adatokból előre meghatározott indexeket tud számolni, valamint a területről ismert további adatokkal együtt kezelve lehet az adatok értékelését elvégezni, melyből így további hasznos információkhoz juthatunk. Lehetőség van egyedi indexek létrehozására, amelyhez a képletet teljesen egyedi módon be lehet juttatni, így a célnak megfelelő indexet tudjuk kapni. A számított indexek ezután kiértékelhetők, azokból megállapítható a vizsgált paraméter.

2.5 Indexek és számításaik

Vegetációhoz használt indexek, leaf area, stb...

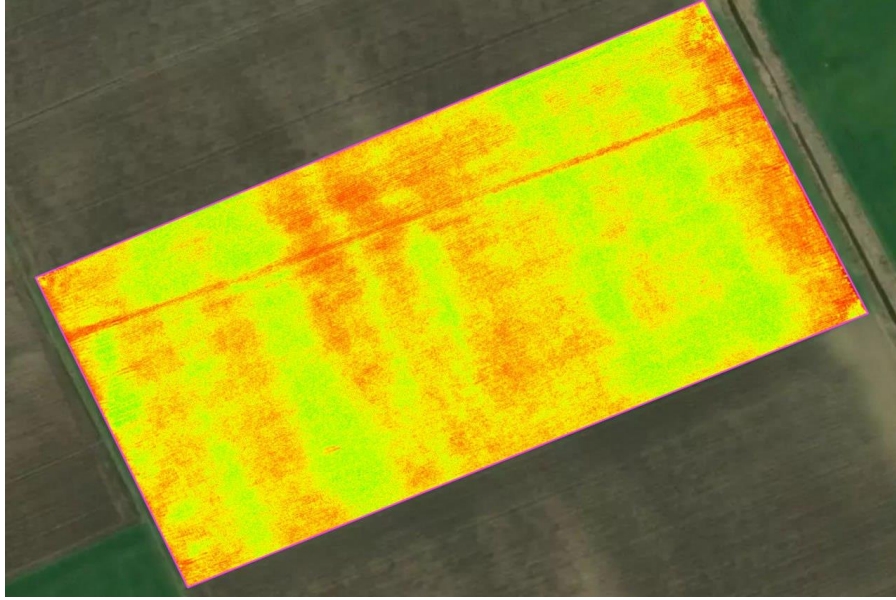
A mezőgazdaságban használt távérzékelésben használt, a mért spektrális adatokból számítható indexek nagyrésze a növények állapotáról szolgáltat információt. A legtöbbet használt index az NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), amely a következő képlet alapján számítható: (Rouse 1973). Az 5. ábrán egy mezőgazdasági területről készített NDVI képet láthatunk.

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED} \quad (3)$$

ahol:

NIR – közeli infravörös sávban mért reflektancia

RED – a vörös sávban mért reflektancia



5. ábra: NDVI térkép
(saját felvétel)

Az NDVI értéke -1 és +1 között változik, és megmutatja, hogy mennyire egészséges a növény, illetve, hogy egyáltalán található-e növény az adott területen.

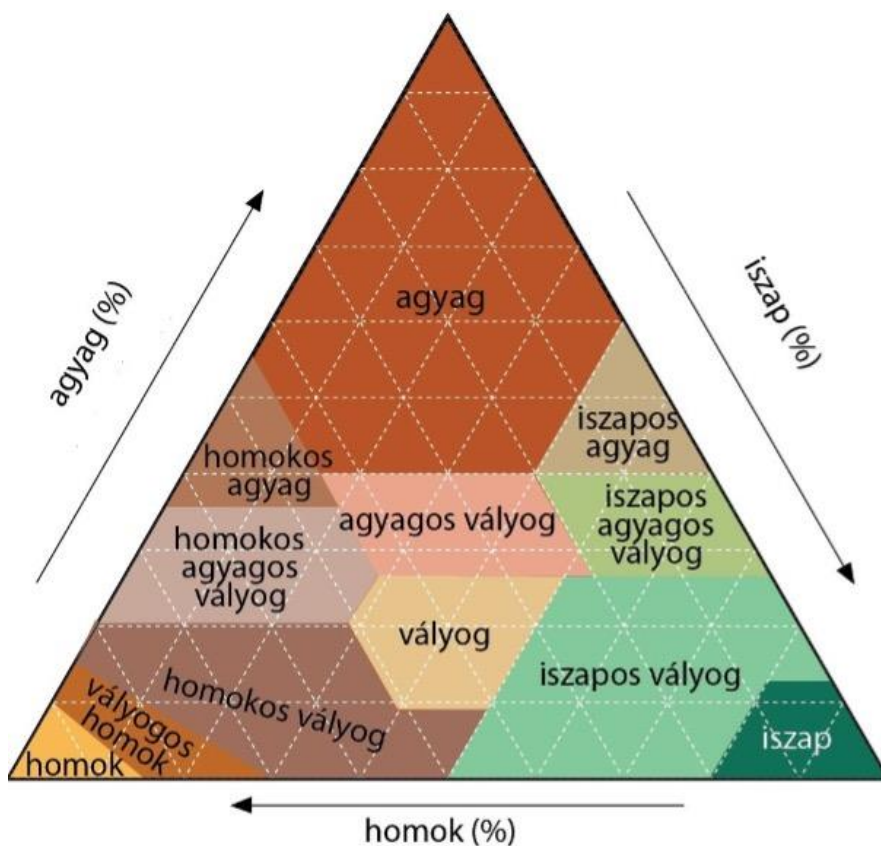
Egyéb indexek is használatosak, amelyek nagyrésze a klorofiltartalom miatti reflektancia különbséget használja ki, ilyenek az LCI (Leaf Chlorophyll Index), MCARI (Modified Chlorophyll Absorption in Reflective Index), NDRE (Normalized Difference Red Edge). Az élő növényi sejtek a klorofiltartalom miatt a NIR sávban jól visszaverik a sugárzást, míg a nem élő részecskék kevésbé verik vissza, így jól elkülöníthetők az élő részek az élettelenről.

A nedvességtartalom esetén a legtöbbször használt index az NDMI (Normalized Difference Moisture Index), melyet azonban a növények nedvességtartalmának meghatározására szoktak használni, illetve egy területre jellemző átlagos nedvességtartalom becslésére alkalmas, melyet legtöbbször műholdas távérzékelési adatok alapján szoktak kiszámítani. Ez a képlet NIR és SWIR sávokat is igényel. Céлом a munkám során azonban az, hogy a drónos felmérő rendszereken elérhető sávokat használva tudjak becslést adni, amelyek nem rendelkeznek érzékelési lehetőséggel a SWIR sávban. (Gao 1996)

3. A talaj nedvességtartalom mérése és hatásai

3.1 A talaj és tulajdonságai

A talaj legfontosabb tulajdonsága az összetétele, amely alapvetően 3 nagy szemcseméret frakció kombinációjából adódik, ezek a homok, iszap és az agyag. A talajokat összetételük alapján szoktuk csoportosítani, ezt a 6. ábra szemlélteti.



6. ábra: Talajösszetétel háromszög

(<https://utepitesakademia.hu/talaj-surusege/>)

Ez az összetétel befolyásolja a mechanikai tulajdonságokat, a sűrűséget, a vízháztartást, és egyéb paramétereket is. A talaj sűrűsége szintén fontos tulajdonság. A nedvességtartalom szintén fontos tulajdonság, amelynek függvényében változnak a talaj mechanikai tulajdonságai, illetve a számunkra fontos reflektancia szintjei is. A talajban ható kohéziós és adhéziós erők adják a mechanikai tulajdonságok alapját. A mechanikai tulajdonságokat nagyban befolyásolja a nedvességtartalom, amelyet megadhatjuk tömegszázalékban, térfogatszázalékban. A talaj

nedvességtartalmát legtöbbször relatív egységben, a szárazanyag tömegéhez viszonyítva, tömegszázalékban szoktuk kifejezni.

$$n_{(t\%)} = \frac{m_{\text{víz}}}{m_{\text{szárazanyag}}} \cdot 100\%, \quad (4)$$

ahol:

$m_{\text{víz}}$ – a talajban található víz mennyisége [kg],

$m_{\text{szárazanyag}}$ – a talaj szárazanyag tartalmának tömege [kg].

3.2 A nedvességtartalom hatása a talajra

A talaj terepjárás szempontjából két jelentős mechanikai jellemzővel rendelkezik. Az egyik a hordképesség, amely meghatározza, hogy mekkora normál irányú nyomást képes elviselni a talajszerkezet mielőtt abba a nyomó felület túlságosan belesüllyedne. A hordképességet a talaj szemcseösszetétele, a sűrűsége és a nedvességtartalma befolyásolja leginkább. (Bedidi 1992) A hordképesség megállapítására nyomólapos és nyomókúpos mérési módszerek állnak rendelkezésre, ezek segítségével becsülhető, hogy egy valódi jármű az adott talajon képes-e áthaladni anélkül, hogy elsüllyedne. A másik fontos mechanikai tulajdonság a nyírószilárdság, amely azt mutatja meg hogy a talaj mekkora nyíróigénybevételt tud elviselni mielőtt a szemcsék elmozdulnak egymáson. A nyírószilárdság függ a talaj nedvességtartalmától és az összetételétől.

3.3 A talaj nedvességtartalom mérésének lehetőségei

A talaj nedvességtartalmának mérésére sokféle módszer létezik, a hagyományos módszerektől kezdve a távérzékelésig. A mérések egy részéhez mintát kell venni, másik részéhez elég a mérőműszert a talajba helyezni, de van olyan módszer is, amelyhez nem is szükséges közvetlen kapcsolatba kerülni a talajjal.

3.3.1 A gravimetriás szárítás

A legpontosabb mérésnek tekinthető a gravimetriás szárítás, amely során a nedves minta tömegét lemérjük, majd szárító kemencébe helyezve az összes nedvességet elpárologtatjuk belőle. A szárítás után ismét megmérjük a minta tömegét. A két mért tömeg különbsége az elvont víztartalom tömegét adja, amit a száraz tömeggel elosztva a (4) képlett alapján kifejezhető a relatív nedvességtartalom. A módszer alkalmazásához szabványos eljárások is vannak, melyek általában

105°C-os hőmérséklet melletti tömegállandóságig, vagy legalább 24 órán keresztüli szárítást írnak elő, de kevésbé pontos, de gyors eredményt adó módszerként a halogén lámpás gyors nedvességmérők is ezt az elvet alkalmazzák. A 7. ábra ilyen gyors nedvességmérőket szemléltet.



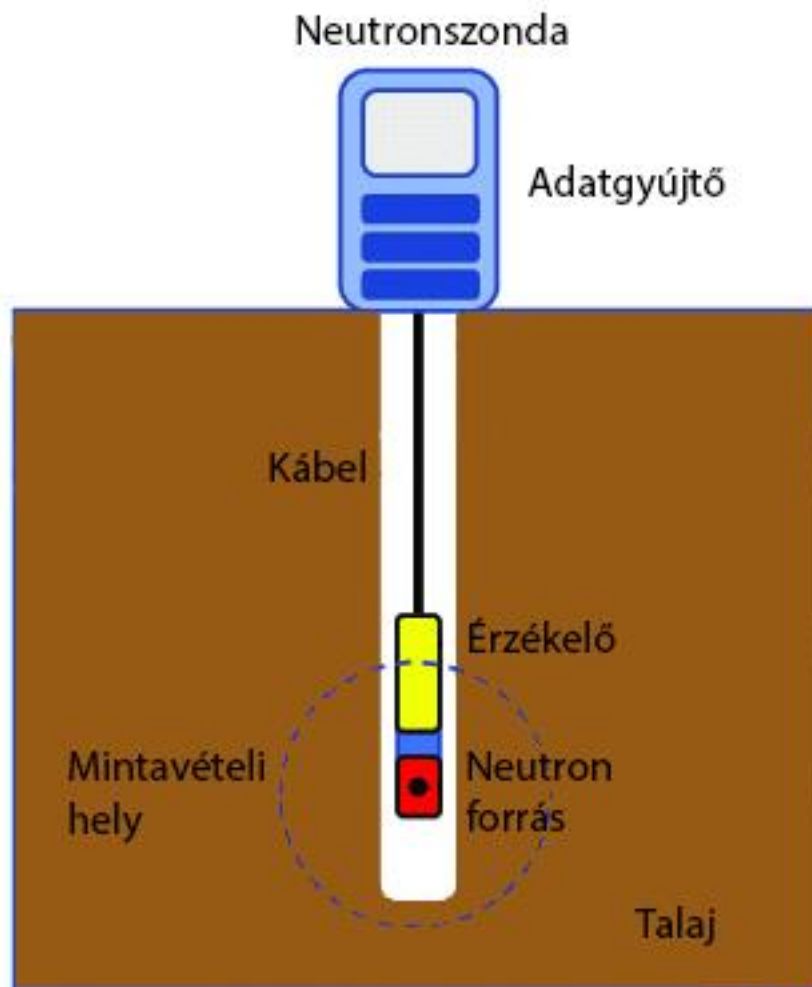
7. ábra: Gyors gravimetriás nedveségmérő

(<https://www.precisa.com/blog/measure-and-determine-soil-moisture-content-using-the-gravimetric-method/?lang=de>)

3.3.2 Atomfizikai módszerek:

Az atomfizikai módszerek közül két módszert érdemes említeni.

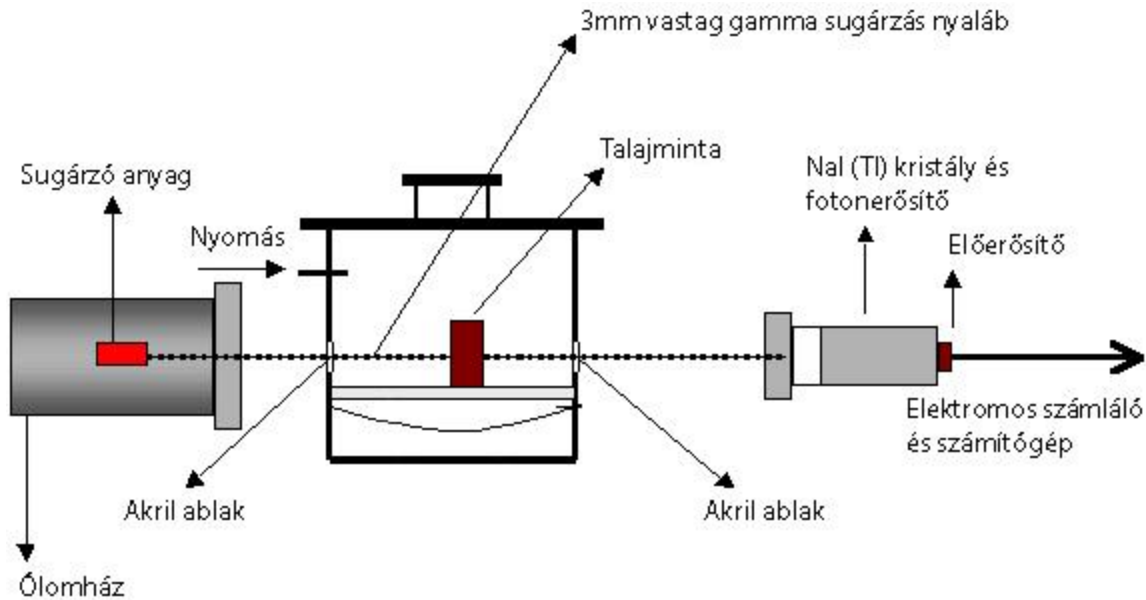
Az első a neutronszondás módszer, amely során a talajba egy radioaktív anyagot helyeznek sugárforrásnak, ebből gyors neutronok szabadulnak ki, amelyek a talajban található víz hidrogénatomjai miatt lelassulnak. A mérőrendszer egyszerűsített ábráját a 8. ábrán láthatjuk. A szonda a lassú neutronok mennyiségét méri, hiszen minél nedvesebb a talaj, annál több hidrogénatom található benne, amely lassítja a neutronokat. Használható még a kozmikus sugárzásból származó neutronmennyiség is, ebben az esetben nem szükséges radioaktív anyag, hátránya viszont, hogy pontosan le szükséges mérni a kozmikus sugárzásból származó gyors neutronok mennyiségét. Ezt a módszert jellemzően laborban, és tudományos mérésekhez használják, hiszen körülményes a mérés vele, de pontos adatokat szolgáltat. (Ravi 2017)



8. ábra: Neutronszoonda

(https://www.researchgate.net/figure/Schematic-of-a-neutron-probe-SMC-sensor-deployed-in-the-field_fig4_348776836)

A másik módszer gamma sugarakat használ fel. A módszer alapfeltételezése, hogy a gamma sugarak szóródása és elnyelése változik az anyag sűrűségével, a sűrűség pedig változik a nedvességtartalommal, így meghatározható a nedvességtartalom. A gamma sugarak egy sugárban kibocsáthatók, a mérésről egyszerűsített modellt a 9.ábrán láthatunk. A kibocsájtott sugárban a minta bármely tartományából nyerhetünk mérési eredményeket. (Ravi 2017)



9. ábra: Gamma sugárzásos mérőrendszer

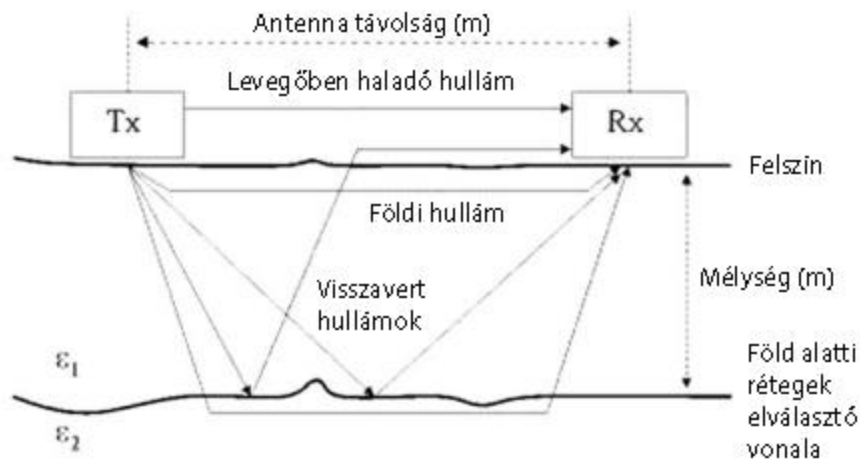
(<https://www.scielo.br/j/sa/a/Gpqb3xFrF3vrWRY6Mx4yjSL/?lang=en#ModalFigfig1>)

3.3.3 Gyors, elektromos mérési eljárások

A talaj villamos jellemzői, fajlagos vezetőképessége és dielektromos állandója (permittivitása) is jelentősen függ a nedvességtartalom értékétől. Azonnali eredményt szolgáltató helyszíni mérésre lehetőséget adó eljárások általában ezeket a jelenségeket használják ki. A műszerek a talajba szúrható szondákkal a vezetőképesség (ellenállás) értékét, vagy két fém felület közti villamos kapacitás értékét mérik, melyből következtetni tudnak a nedvességtartalom értékére.

3.3.4 Radaros módszer

Ez a módszer egy adó antenna rádióhullámait használja, amelyeket a földbe sugároz, a 10. ábra szemlélteti a módszer menetét. A talajban levő rétegek és összetételük következtében más rétegek más módon verik vissza ezt a sugárzást, amely érzékelhető egy másik antenna segítségével. Az adó és a vevő között a levegőben is hullámokat bocsátanak ki, ez a referencia jelszint, amelyhez képest a talajban levő jelek késnek, illetve gyengülnek. (Ravi 2017) A visszavert jelek késése és az adott talajban való jelterjedési sebességgel számolva egy vertikális képet kaphatunk a talajról, amely azt mutatja, hogy hol mennyire verődött vissza a jel, illetve hol haladt gyorsabban és lassabban.



10. ábra: Radaros mérési módszer

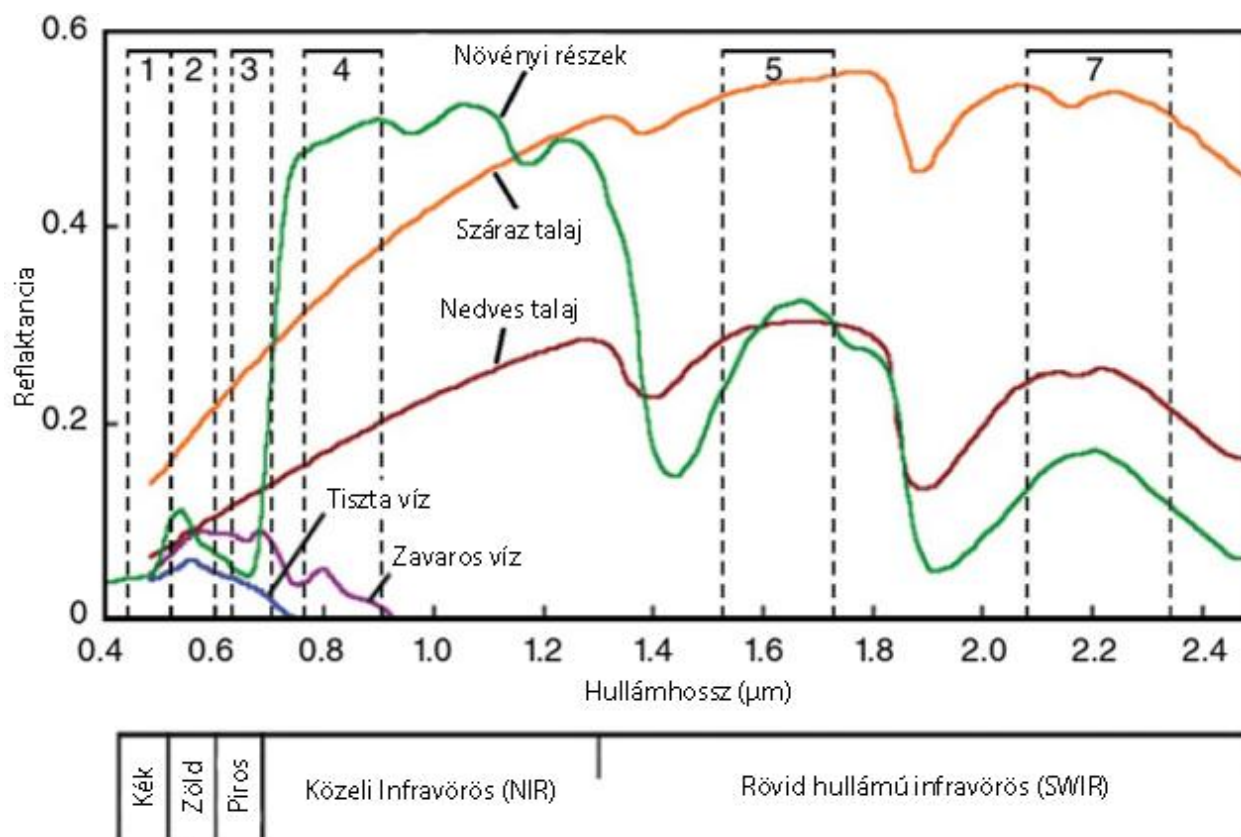
(Ravi Shankar Dwivedi Remote Sensing of Soils 2017)

3.3.5 Sugárzás távérzékeléses módszerek

A sugárzásos távérzékeléses módszerekben közös, hogy valamilyen frekvenciájú elektromágneses sugárzás reflexióját vagy emisszióját vizsgálják. A víz jelenlététől és mennyiségétől függően a sugárzás és a talaj kölcsönhatása széles hullámhossz tartományban változásokat mutat.

A gamma sugárzás hasonló az atomfizikai módszereknél említett gamma sugárzásos módszerhez, azzal a különbséggel, hogy itt nem két pont között vizsgáljuk a sugarak mennyiségét, hanem az egy pontból kibocsátott, és oda visszavert sugarak mennyiségét mérjük. (Ravi 2017)

A látható fényű, közeli és rövid infravörös tartományokban való mérés során a 400 és 2500 nm közötti hullámhosszú fény visszaverődését vizsgáljuk, a reflektancia alapján pedig következtetni tudunk a talaj nedvességtartalmára. Ezt a módszert a legolcsóbb és legkönnyebb alkalmazni hiszen a látható tartományban akármilyen kamera alkalmazható, de pontosabb mérésekhez célszerűbb infravörös tartományon belül is érzékelő kamerákat alkalmazni. A módszer hátránya, hogy a felszín textúrája, felületi érdessége is befolyásolja az eredményeket, illetve növényborítottság esetén nem tudunk adatokat kapni a talajról, csak a növények vegetációs állapotából tudunk következtetni. A tipikus reflektancia értékeket a 11. ábrán láthatjuk.



11. ábra: Különböző anyagok reflektanciája egyes hullámhossztartományokban

(https://ebrary.net/205126/engineering/overview_applications_hyperspectral_satellites_earth_observations)

A hő infravörös tartományú méréssel (10-12μm) szintén jól megállapítható a nedvességtartalom, hiszen a víz más fajhővel és hővezetési tulajdonságokkal rendelkezik, mint a talaj, ezért a nedvesebb területek emissziója jelentősen különbözik a száraz területekétől. A mérés igen érzékeny a napfény minőségére, hiszen a napfény az alapvető energiaforrás a talaj melegítéséhez. A módszer szintén nem alkalmazható, ha a talajfelszín nem látható közvetlenül.

A mikrohullámú módszer során a talaj mikrohullámú világosságát mérjük egy sugárzásmérővel. A talaj ezen tulajdonsága a nedvességtartalom növekedésével jelentősen változik. A mérésre használhatjuk a passzívan beérkező mikrohullámú sugarakat, de mérés során mesterségesen kibocsátott sugárzással is ugyanilyen eredmények érhetők el. (Ravi 2017)

3.4 A drónos távérzékelés elve, eszközei és módszerei

3.4.1 A drónok

A drón, más néven pilóta nélküli légi jármű egy olyan repülésre alkalmas elektromos eszköz, amely képes minden irányú mozgásra a levegőben, akár egy kezelő kézi irányításával, akár egy előre meghatározott munka szerinti útvonal alapján automatikus módon. Drónok lehetnek bármilyen pilóta nélküli légi járművek, legyenek azok helikopter jellegű rotoros, egyhelyben lebegni képes megoldások, vagy a repülőkhöz hasonló szárnnal rendelkező járművek. Elsősorban a rotoros, helikopter jellegű drónokra fókuszálunk, hiszen az ipari drónok szinte kizárólag ilyenek.



12. ábra: DJI Mavic 3M

(saját felvétel)

A drónok legnagyobb része 4 rotorral rendelkezik, mint ahogy az a 12. ábrán látható drónnál is megállapítható. Minden rotorhoz egy-egy motor tartozik, léteznek 6-8 rotoros drónok is, ezek jellemzően nagy tömegeket is, akár 30-40 kg-ot is képesek mozgatni és ipari felhasználási célúak. A rotorok lehetnek elhelyezése lehet fix rögzített karokon vagy akár összecsuksukható karokon, hogy szállításkor kisebb helyen is elférjen a jármű. A rotorok mind külön vezérelhetők, és ezek

sebességének változtatásával érhető el a szabad mozgás minden irányba. A drónokhoz tartozik az azok irányításához szükséges kontroller, a rajtuk elhelyezkedő kamera, illetve a cserélhető rotorok. A kontroller rádióhullámokkal kommunikál, akár több kilométeres távolságból is képesek vagyunk irányítani a járművet. A drónok számos szenzorral is rendelkeznek, található bennük gyorsulásmérő, giroszkóp, magnetométer, egyes esetekben ultraszonikus vagy infraszonizációs távolságmérő, illetve a fő kamerán kívül számos kisebb kamera, amelyek a pilótasegítő rendszerek részei, az akadályokba ütközést akadályozzák meg. Külön említésre méltó a GPS rendszer a járművekben, hiszen segítségével a felszállási helyre pontosan vissza tud érkezni akkor, ha elveszíti a jelet a repülés során, illetve RTK modullal kiegészítve pontos helyadatokat tud kötni az adatokhoz, amelyeket készít, így később a feldolgozáskor pontosan georeferált adatok állnak rendelkezésre. A repüléskezelő modul a drónokban képes az összes szenzorból származó adatot feldolgozni, a beérkező vezérlést fogadni, lefordítani a megfelelő jelekre, és az alapján vezérelni a motorokat, illetve folyamatosan rögzíti a telemetria adatokat.

3.4.2 A multispektrális kamerák és drónos alkalmazásai

A drónos felmérésnél használt multispektrális kamerák alapvetően a növényállapot mérésére használatosak, de segítségükkel látható tartományokon kívül is vizsgálhatjuk a reflektanciát. A multispektrális kamerák vagy integrált rendszerként érhetők el egy adott drónnál, amelyet nem lehet megbontani, vagy úgynevezett payload-ként, amely egy cserélhető része a drónos rendszernek. Az integrált rendszerek előnye, hogy mindig fix pozícióban található a kamera, ezért a helyzetet kalibrálni nem szükséges, illetve a drón többi érzékelőjével és rendszerével folyamatos kommunikációban áll. A hátránya, hogy nem fejleszthető később másik kamerára, amellyel nagyobb felbontásban, vagy esetleg más sávokon is lehetne mérni. A payload rendszerű multispektrális kamerák előnye, hogy bármikor cserélhetők, más kamerarendszerre, amely nem is feltétlenül kell, hogy multispektrális legyen. Emiatt a rendszer miatt ugyanazzal a drónnal akár LiDAR-os felmérést is végezhetünk, majd csere után multispektrális felmérést végezhetünk, és szükség esetén hagyományos kamerára is cserélhetjük, amellyel videó készítése lehetséges. A 13. ábrán egy payload-os rendszerű multispektrális kamerát láthatunk. A payloados rendszer hátránya, hogy jelentősen nagyobb a költsége, és minden kamerát külön kalibrálni kell felhelyezéskor.



13. ábra: Micasense Altrum PT multispektrális kamera

(<https://ageagle.com/drone-sensors/altum-pt-camera/>)

A multispektrális kamerákból minden egyes sávon, vagyis hullámhossztartományban egy monokróm képet kapunk, amelyben a világosabb részek nagyobb reflektanciára, a sötétebb részek kisebb reflektanciára utalnak. A képek, amelyek elkészülnek helyadatokkal rendelkeznek, vagyis pontosan tudjuk, hogy hol készültek, így, ha a feldolgozáskor a szoftver megnyitja őket, rögtön a megfelelő helyre tudja helyezni őket, nem kell manuálisan elrendezni.

3.4.3 A drónos felmérés elve

A drónos felméréseket alapvetően nem manuális irányítással végezzük, hanem egy előre elkészített repülési tervet adunk a gépnek, amelyen azután végighalad és képeket készít. A repülési tervek elkészítésének első lépése a felmérni kívánt terület meghatározása, lehetőség szerint előzetes szemrevételezés, akadályok és egyéb befolyásoló tényezők feltérképezése. A repülési tervhez rengeteg paramétert meg kell határozni, ilyenek a repülési magasság, a képek közötti vertikális és horizontális átfedés, a repülési sebesség és a biztonságos hazatérési magasság.

Felszállás előtt ellenőrizni kell a drónt, és a környezetet, illetve mindig megfelelő engedélyekkel kell rendelkezni a repüléshez. A felmérés ideje alapvetően attól függ, hogy mekkora felbontással és mekkora területet szeretnénk felmérni. A folyamat során kézi beavatkozásra jellemzően nincs szükség, ez alól kivételt képezhet az akkumulátor cseréje abban az esetben, ha nagy területről van

szó, illetve az sd kártya cseréje, ha nincs rajta elegendő hely a felvételekhez. A munka során a drón egy magasságban repül, konstans sebességgel, amelyből adódóan viszont fontos leszögezni, hogy a megfelelő minőségű képekhez sok fényre van szükség. Egyrészt azért is mert a felhőborítottság befolyásolja a beérkező fényt, másrészt azért, mert ha kevés a fény, a kamera le fogja csökkenteni a zársebességet, amely viszont elmosódáshoz, bemozduláshoz vezethet. Bemozdult képekből nem lehetséges hasznos adatokat nyerni. A felmérés végeztével a drón visszatér a kiindulási pozícióba, majd, ha szükséges önmagától le is száll. Ezután az sd kártyáról a felvételeket egy számítógépen feldolgozhatjuk.

3.4.4 A távérzékelésből nyert adatok, és felhasználásuk

A felméréskor képet készítünk, amely alapvetően sok pixel halmaza. Minden pixel rendelkezik egy DN (digital number) értékkel, amely a világosságát adja meg. Mivel monokróm képekről beszélünk, és a besugárzás minden esetben azonos, ezért a világosság értéke közvetlen kapcsolatban áll a reflektanciával. A reflektancia értékek pedig kapcsolatban állnak a nedvességtartalommal, vagyis a talaj felső rétegének nedvességtartalma ez alapján meghatározható. Az elkészült képeket feldolgozó szoftverben vizsgáljuk. A program a képeket a hozzájuk kötött helyadatok alapján elhelyezi és elforgatja a megfelelő irányba. A reflektancia értékek számítása ezután automatikusan megtörténik, az elkészült képet ezután kiexportálhatjuk a számunkra megfelelő formátumban, vagy készíthetünk rá további rétegeket. A nedvességtartalomhoz kötés is ilyen réteggént hozzáadható, majd a kész kép kiexportálható és más célokra felhasználható.

4. A drónos távérzékelés mezőgazdasági alkalmazásai

4.1 A kitűzött probléma, megoldási lehetőségek

A mezőgazdaságban való információgyűjtés kulcsfontosságú a hatékony termeléshez, ehhez pedig minden információra szükség van, ilyen például a talaj nedvességtartalma is. Munkámban a talaj felső, látható rétegének nedvességtartalmának távérzékeléses módszerrel történő mérési lehetőségeit vizsgálom. A talajnedvesség meghatározására igen sok módszer van, amelyeket korábban ismertettem is, a célom tehát nem az, hogy új módszert alkalmazzak, hanem az, hogy a meglevő mezőgazdasági dróntechnológiával, amelyet elsősorban növényállapot felmérésre használnak, olyan nedvességtartalom adatokat nyerjek, amelyek hasznosak lehetnek a termelés szempontjából. Leginkább abból a szempontból tartom hasznosnak egy becsült nedvességtartalom érték gyors felmérésének lehetőségét, mert tapasztalataim alapján egy eső után a munkához visszatérni a megfelelő időpontban mindig azzal jár, hogy ki kell menni, megpróbálni az adott munkát és csak akkor folytatni, ha megfelelőek a körülmények és szép munkát végez a gép. A felszíni nedvességtartalom ugyan csak egy része a munkagépek által mozgatott talajtömegnek de a felszín alapján következtetni lehet a mélyebb rétegekre, amelyek már relevánsak a művelés szempontjából. A nedvességtartalom ismeretében tehát elkerülhetőek lennének az olyan esetek amikor nem telt még el elég idő és túl nedves talajban mennénk ki dolgozni. A drónos felméréssel el sem szükséges menni a tábláig, távolabbról is megállapítható, hogy alkalmas-e művelésre a tábla. A nedvességtartalom távérzékeléses becslésének további fontos alkalmazási területe a terepjáráselemletben való mozgékonyasági vizsgálatokhoz kapcsolódik. Az önjáró járművek számára fontos információ a talaj hordképessége, amelyet, befolyásol a nedvességtartalom is. Így ahhoz, hogy egy önjáró jármű biztonsággal haladhasson terepen, a nedvességtartalom ismerete is szükséges lehet. Nem lehetséges minden honnan mintát venni, hiszen a mintavételhez előbb fizikailag is a talaj közelében, a talajon kell lennie a mintavételező járműnek is. Ezért kell távérzékelést alkalmazni, amellyel anélkül adunk becslést a talajnedvességre, hogy a közvetlen közelében kellene lennünk. Az önjáró jármű irányítása során ez a módszer hatékonyan alkalmazható lehetne úgy, hogy egy ismeretlen területen való áthaladás előtt információt kérne egy drónos rendszertől, amely a szükséges méréseket elvégezné és térképeket készítené arról, hogy hol tud elhaladni a jármű és hol nem a becsült nedvességtartalom alapján.

A nedvességtartalom meghatározására létrehozták a Normalized Difference Moisture Index-et (NDMI), amely a SWIR és NIR (Sentinel 2B esetében: SWIR 1377nm, NIR 833nm) sávok kombinációjából tud megadni becsült nedvességtartalmat. A SWIR sávot jelenleg csak spektrométerrel, illetve műholdas kamerákkal lehetséges költséghatékonyan érzékelni, a repülésre alkalmas hordozható kamerák nem széles körben elterjedtek, ezért ez az index nem használható a drónos felmérésnél, ugyanakkor hasznos információt szolgáltathat átlagos nedvességtartalomról a területen, illetve összevethető a drónnal felmért adatokkal.

$$NDMI = \frac{NIR - SWIR}{NIR + SWIR} \quad (5)$$

ahol:

NIR – A felmérőrendszer NIR sávja (Sentinel 2B esetében 833nm)

SWIR – A felmérőrendszer SWIR sávja (Sentinel 2B esetében 1377nm)

A rendelkezésemre álló drónos mérőrendszerrel gyűjthető multispektrális adatok alapján történő nedvességtartalom becslésre ezért a NIR sávon mért reflektancia értékeket felhasználására töreksem, mivel a 11. ábrán is szemléltetett módon a talaj reflektanciája nedvességtartalom változásával nagyobb hullámhosszakhoz tartozóan nagyobb mértékben változik. Fontos még, hogy a talaj textúrája és összetétele is befolyásolhatja a mérés eredményét, illetve biztosan nem lesz olyan pontos, mint akár egy gyors talajba szúrható szonda, de úgy vélem, hogy a távérzékelési módszernek is van létjogosultsága hiszen gyors becslést tud adni.

4.2 A vizsgált talajok

Vizsgálataimat 10 db különböző nedvességtartalmú, és textúrájú, mezőgazdasági termelésben használt talajtípuson végeztem, a mintavételt és a helyszíni multispektrális felvételeket 2023. szeptember 29-én végeztem, napsütéses időben, így a felhőborítottság sem volt befolyásoló tényező a mérések során. A talajösszetétel kis mértékben változott a vizsgált területek között, a talajösszetételeket a Dosoremi használatával ([http 3](http://3)) becsültem meg és az 1. táblázatba foglaltam össze.

1. táblázat: A minták összetétele

Minta azonosítója	Agyag [%]	Iszap [%]	Homok [%]
406, 29	16	35	49

101, 122, 313, 125, 315, 25	18	29	53
107, 18	20	24	56

A mintákat szemmel is jól elkülöníthető nedvességtartalmú területekről vettem, illetve olyan területről, amelyen aktív művelés folyt, ezért tudtam olyan mintát is venni, amely a közvetlen művelés előtti és utáni állapotokat hasonlítja össze. A mérés során visszanedvesítettem egy területet a mintavétel előtt, hogy egy olyan mintával is tudjak dolgozni, amely közvetlenül a mérés előtt kapott nedvességet, ez a minta volt a 313-as. A 107-es és 18-as minták egy olyan területről származnak, ahol egy mélyedés miatt összegyűlt az esővíz, és nem száradt még ki a talaj, ezért ezek között a minták között számítok a legnagyobb nedvességtartalom különbségre.

4.3 A méréshez szükséges eszközök

Vizsgálataim során a kiválasztott talajtípusokon háromféle vizsgálatot végeztem a területről multispektrális drónos felvételt készítettem, és a kiválasztott talajtípusokból mintát is vettem. A mintáknak laboratóriumi körülmények között gravimetriás módszerrel megmértem a nedvességtartalmát, valamint nedves és száraz állapotban is hiperspektrális reflektancia felvételeket készítettem róluk. A vizsgálatokhoz a következőkben ismertetett eszközöket és szoftvereket alkalmaztam.

4.3.1 A multispektrális felmérő drón

Gyártó: DJI

Típus: Mavic 3M

Kamerák:

RGB: 20MP színes

Multispektrális: 5MP monokróm, 4 sáv (Zöld 550nm, Piros 650nm, Red edge 730nm, NIR 860nm)

Repülési idő: 43 perc akkumulátoronként



14. ábra: Repülésre kész drón

(saját felvétel)

A multispektrális drón sok rendszer összessége, amelyek együttműködése miatt lehetséges a távolról való felvételkészítés. Az egyik legfontosabb eleme a kamera, amely ezen a drónon különleges, hiszen nem csupán látható tartományban készít felvételeket. A kamera összesen 5 képet készít minden esetben, egy RGB valós színű képet és 4 monokróm képet, a zöld, piros, vörös széli és közel infravörös tartományokban. A kamera mechanikus zárral rendelkezik, amely rolling shutter effect csökkentésére hivatott. Az elektronikus zárral működő kamerák esetében jelentkezhet ez, amikor gyors oldalirányú mozgás közben készítünk felvételeket, torzulhat a kép. A kamera egy stabilizátoron helyezkedik el, amely a drón mozgása közben mindig a horizontra merőlegesen tartja a kamerát, és lehetőséget ad a betekintési szög változtatására. A stabilizátor giroszkópokat, gyorsulásérzékelőket és kis villamos motorokat használva képes stabilan tartani a kamerát. A főkamerán kívül számos kisebb nagylátószögű érzékelő kamera található a drónon, amelyek a pilótasegítő rendszerhez tartoznak ennek a rendszernek a lényege, hogy a kamerák, és a távolságmérő szenzorok segítségével jelentősen lecsökkentik a balesetek valószínűségét. A rendszereket a drón központi fedélzeti számítógépe köti össze, amely minden szenzoradatot, képadatot befogad, és feldolgoz, majd a főkamerából érkező képet a vezeték nélküli távadónak továbbítja, ahonnan az eljut a kezelőhöz a kontroller képernyőjére. Fontos része még a drónos

rendszernek az sd kártya, amelyre az adatokat rögzíti, ennek elég nagy sebességűnek kell lennie, hogy a nagy mennyiségű adatot, amelyet a több kamera készít időben le tudja írni, ne kelljen a kártyára várnia a gépnek. Az akkumulátorok cseréjekor külön figyelmet kell fordítani arra, hogy jól rögzüljön a gépben. A drónos rendszerhez tartozik még a kontroller is, amely önmagában tartalmaz egy Android alapú érintőkijelzős eszközt, az antennákat, és az irányításhoz szükséges két joystick-ot. A kontrollerrel repülési terveket anélkül is tudunk készíteni, hogy a gépnek magának bekapcsolva kéne lennie, előre lehet dolgozni ezzel, hogy az akkumulátor teljes kapacitását a repülésre tudjuk használni. A drónhoz használt RTK modul a rendszer utolsó része, egy usb csatlakozón keresztül kommunikál a drónnal, tulajdonképpen egy modemmel rendelkező kiegészítő, amely a mobilhálózat alapú RTK hálózatra képes csatlakozni, a megfelelő hitelesítő adatok megadása után. A bemutatott drónt a 14. ábrán láthatjuk.

A felmérő drónok kisebb különbségekkel mind ugyanilyen rendszerekkel rendelkeznek, és ugyanilyen elven működnek. Lehetséges más drónos rendszerek alkalmazása, amelyek nem integrált kamerákkal rendelkeznek, hanem cserélhető payloadokkal használhatók. Ezeknek az az előnye, hogy a technológia fejlődésével más sávokon való felmérés is lehetséges lesz. A mérést pontosítani lehetne, ha rendelkezésre állna SWIR sávban felmérő drónos kamera, azonban ilyet nem tudtam beszerezni a méréshez.

4.3.2 A gravimetriás méréshez használt eszközök

A gravimetriás méréshez a vizsgált talajokból mintákat vettem egy Ejkelkamp típusú fém talajmintavevő készülékkel, melyeket gondosan, légmentesen lezárva szállítottam az egyetem laboratóriumába, a gravimetriás méréshez szükséges mérleg egy Sartorius LE6202S-0CE típusú labormérleg volt (15. ábra).



15. ábra: A mérleg és a mérés menete

(saját felvétel)

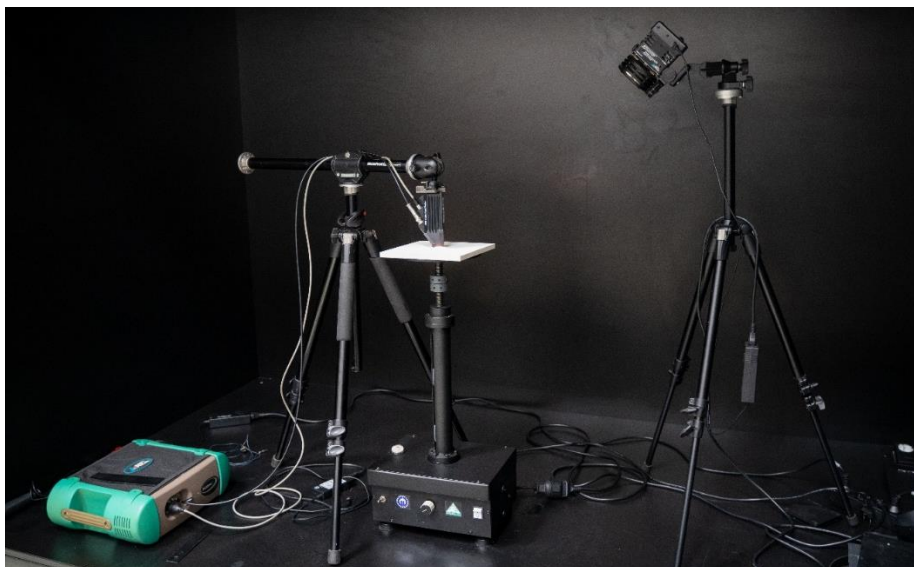
Ez a mérleg 6200 g és 0,5 g közötti mérési tartománnyal, 0,01 g felbontással és 0,1 g bizonytalansággal rendelkezik. A talajminták tömege jellemzően 80 g (száraz) és 300 (nedves) g között volt, így a 0,1 g bizonytalanság megfelelő az alkalmazásra,. A mintákat befőttesüveg kupakokra helyeztem, amelyeknek szintén feljegyeztük a tömegét. A mintákat egy LP-321 típusú szárítókemencében szárítottuk, amelyben az összes minta egyszerre elfért (16. ábra).



*16. ábra: A szárításra használt LP-321 szárítókemence
(saját felvétel)*

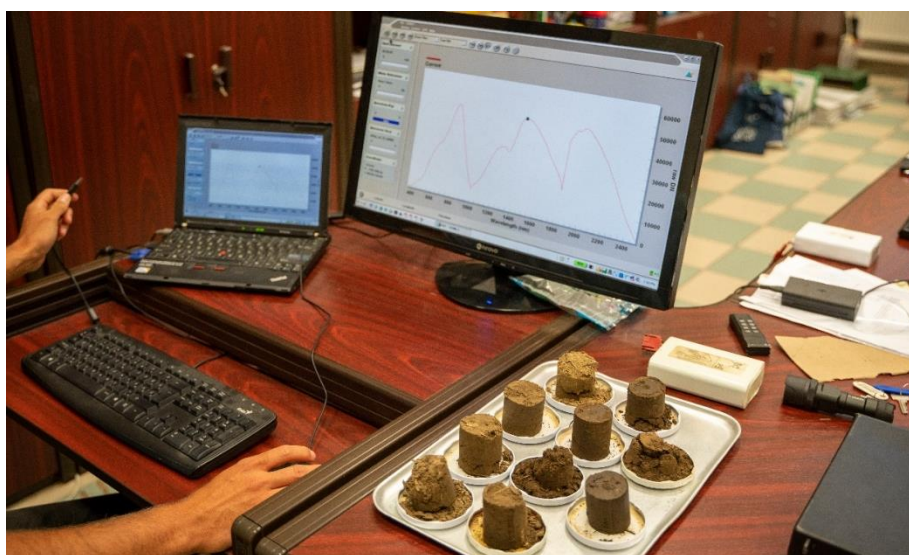
4.3.3 Az ASD spektrofotométer

A spektrofotométer a látható és nem látható tartományban is vizsgálja a talaj reflektanciáját. Az általam használt ASD Fieldspec 3 spektrofotométer (17. ábra) 400 nm-től 2450 nm-ig képes mérni. A rendszer egy feldolgozóegységből és egy vizsgáló szondából áll, amelyek között üvegszál kábel viszi át a fényt. A szondában rögzítve van a szenzorokhoz a visszavert fényt továbbító üvegszál, amelynek 25 fokos látószöge van és egy lámpa, amely a megvilágítást adja a méréshez. A feldolgozóegységbe beérkező visszavert fényt összesen 3 szenzor dolgozza fel. A 3 szenzor azért szükséges mert egyetlen szenzor nem képes az egész spektrumot lefedni, illetve nem minden szenzortechnológia alkalmas bizonyos hullámhosszok érzékelésére. (http 4)



*17. ábra: A spektrofotométer és a méréshez szükséges egyéb eszközök
(saját felvétel)*

A feldolgozóegység egy laptop-hoz kapcsolódik, amelyen az ASD mérőszoftvere fut. A szonda és feldolgozóegység egyaránt egy zárható, fekete kamrában található, így a külső megvilágítástól függetlenedik a mérés, csak a saját megvilágításból visszavert fényt érzékeli. A mintákat egy forgó asztalra szükséges helyezni, ami szintén a kamrában található, állítható a magassága, amelyet mindig közel azonosan kell beállítani, hiszen a tárgytávolság is befolyásolja a mérést.



*18. ábra: A mérőszoftver és a mérése várakozó minták
(saját felvétel)*

4.3.4 Az adatokat feldolgozó szoftverek

A drónos felvételek feldolgozásához számos szoftver áll rendelkezésre. A DJI saját szoftvere a Terra igen sok indexet és egyéb adatot ki tud hozni a drónos felvételekből, azonban nyers reflektancia adatokat nem kaphatunk belőle, ezért nem alkalmas számunkra. A Pix4d mapper nevű program alkalmas ilyen reflektancia adatok kinyerésére, és sok egyéb más feladat ellátására. Az adatok értékeléséhez, továbbá QGIS térinformatikai szoftvert és Matlab szoftvert is alkalmaztam. Az utolsó említendő szoftver az ASD mérőszoftvere, amelynek használatáról a 18. ábrán láthatunk pillanatképet. A mérőszoftverben minden zavaró tényező lehető legjobb kizárására való optimalizálásos és kalibrációs lehetőségek vannak. A mérőszoftverben minden mérési paramétert, erősítést és a kimeneteli fájlok számát is testre lehet szabni. A talajminták mérése viszonylag kontrollált környezetben történt így a sok korrigáló eljárásból nem fogom az összeset használni. A szoftver nyers DN (Digital Number) adatból, számol reflektanciát az előre bevitt fehér referencia panel bevitt értékeiből, amelyet laborban állapítottak meg, és eltároltak a kalibrációs fileban. A kimeneti file egy táblázat, amelyben minden hullámhosszra megtalálható a mért reflektanciaérték.

4.4 A mérés menete

A mérést több napon végeztem, egyrészt mivel a körülmények így voltak adottak, másrészt pedig eleve szükséges volt, hogy idő teljen el a szárítás miatt. A mérést a drónnal való képek készítésével kezdtem, majd talajmintákat vettem a felmért területről, majd ezt gravimetriás mérési módszerrel mértem le. A gravimetriás méréssel párhuzamosan zajlott a spektrofotométeres mérés, hiszen a nedves talajokat és a szárított talajokat is egyaránt megvizsgáltuk.

4.4.1 A drónos mérés és talajmintavétel

A drónos mérés a drón előkészítésével kezdődött, az sd kártya formázása az akkumulátor feltöltése után felraktam a propellereket és elmentem a helyszínre. A helyszínen bekapcsoltam a drónt és csatlakoztattam az RTK hálózatra, megvártam amíg a GPS jel megfelelő erősségű lesz. A hazatérési pont megadása után felszálltam a drónnal, és mivel ez nem egy egész nagy terület felmérése volt, csak egy egy helyszíni kép, ezért nem készítettem repülési tervet, csak manuálisan a kívánt helyre repültem és fényképeket készítettem. A repülés során külön figyelmet fordítottam arra, hogy mindig közel azonos magasságban készüljenek a képek, illetve, hogy ez a magasság ne legyen kisebb, mint a kamera minimum fókusztávolsága hiszen akkor életlen képeket kaptam volna. A mintákat mind egymáshoz közeli helyekről vettem, azonban így is fontos volt

odafigyelni, hogy az egyik pontról a másikra való átrepülés során a környezetben található-e valamilyen akadály. A kamerát RAW minőségre állítottam, hogy biztosan minden adat meglegyen, amit csak ki lehet nyerni, illetve figyeltem arra, hogy ne csak az RGB kamera legyen bekapcsolva, hanem a multispektrális is. Az felmérés végén az sd kártyát kivettem a drónból és biztos helyre tettem, majd, amikor visszaértem akkor rögtön bemásoltam a számítógépre, ezzel kiküszöbölve az adatvesztés lehetőségét. Az adatokat ezután rendszereztem, hogy pontosan tudjam melyiket melyik helyről vettem.

4.3.2 A gravimetriás mérés

A gravimetriás mérés során az előzőleg említett talajminták vizsgálatát végezzük. A talajmintákat a vételezéskor a lehető legjobban lezártam, majd, amikor a mérésre került sor, az első dolgom ezeknek a csomagoknak a kibontása volt. Az előkészített mérleggel először lemértem egy befőttesüveg kupakot és rögzítettem az azonosítójával együtt. A feljegyzést követően a mintát óvatosan eltávolítottam a mintavételező kapszulából, a kupakra helyeztem, az esetlegesen lelógó részeket eltávolítottam, majd lemértem a mérleggel. A mért értéket felírtam, majd a következő mintával kezdtem el ugyanezt, addig amíg az összes minta nedves tömege meg nem volt lejegyezve. Az 1. táblázat a gravimetriás mérés eredményeit foglalja össze.

2. táblázat: A gravimetriás mérésből nyert adatok

Minta azonosító	Minta neve	Kupak száma	Kupak tára tömeg [g]	Bruttó nedves tömeg [g]	Bruttó száraz tömeg [g]	Nettó nedves tömeg [g]	Nettó száraz tömeg [g]	Nedvességtartalom (száraz tömegre, tömegszázalék) [%]
1	Műveletlen száraz 1	101	13,03	135,56	116,48	122,53	103,45	18,4
2	Művelt 1	122	12,88	167,64	142,84	154,76	129,96	19
3	Műveletlen nedvesített	313	13,22	202,46	173,04	189,24	159,82	18,4
4	Precmet	406	17,08	143,84	127,71	126,76	110,63	14,6
14a/22a	Műveletlen száraz 2	125	16,75	133,14	114,06	116,39	97,31	19,6
23f/39a	Műveletlen száraz 3	315	12,8	114,59	99,96	101,79	87,16	16,8
36a/39f	Művelt 2	25	13,24	139,97	121,63	126,73	108,39	16,9
27a/34a	Teszt 1	29	13,09	133,31	112,64	120,22	99,55	20,8
8f/22f	Sár	107	13,29	164,54	136,88	151,25	123,59	22,4
28a/25f	Sár mellett	18	15,17	116,98	106,78	101,81	91,61	11,1

Ezzel a folyamattal a lehető leggyorsabban végezni kaptam hiszen ezután a spektrofotométeres mérés következett, és minél több ideig van szabadtéren a minta annál pontosabb lesz a mérés. A spektroszkópiai mérést követően a mintákat egy tálcára helyeztem, illetve elkezdtem melegíteni a szárítókemencét. Beállítottam 115°C-ot a digitális panelen, hiszen tapasztalat alapján ezzel a beállítással lesz a kemencén belül mindenhol 105°C a hőmérséklet. A beállításokat a 19. ábrán láthatjuk.

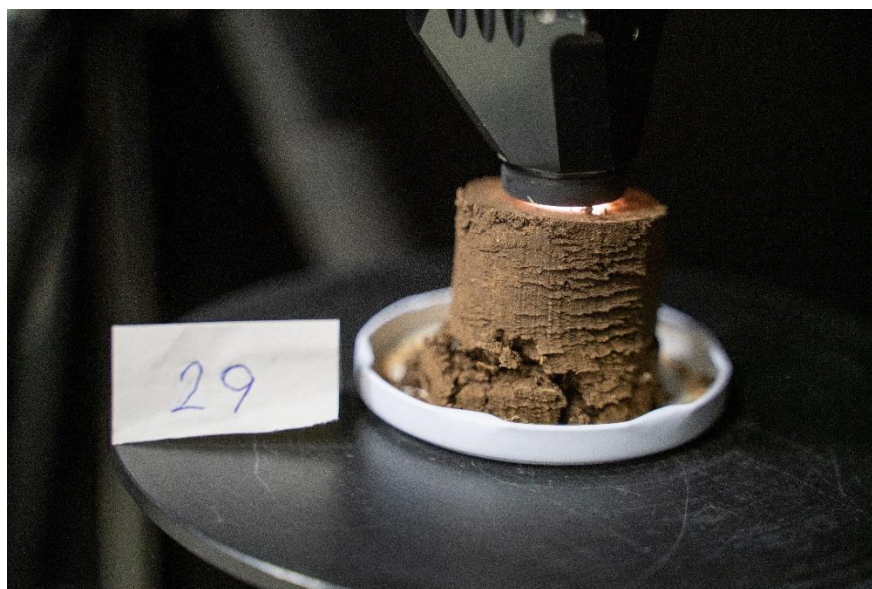


*19. ábra: A szárítókemence melegítése
(saját felvétel)*

A mintákat ezután 48 órán keresztül szárítottam, majd amikor ez letelt, kivettem őket, és újra méréseket végeztem rajtuk. A kivétel után rögtön megmértem a mintát a mérlegen, feljegyeztem a mért eredményt, majd átvittem egyesével minden kivételkor a mintát a spektrofotométerhez és elvégeztem a száraz reflektancia mérést, így elkerülve a visszanedvesedés lehetőségét. A mérések befejeztével a használt eszközök elmosása volt az utolsó feladat.

4.3.3 A spektrofotométeres mérés

A spektrofotométeres mérés előkészítésekor a rendszer bekapcsolása után elővettük a fehér referenciapanelt, amellyel felvettünk egy fehér referencia értéket. A felvétel után optimalizáltuk az érzékelő erősítését, hogy az egész spektrumban közel egyenletes legyen. A nedves minták mérésekor egyszerre állt rendelkezésre az összes minta, egymás után tudtuk végezni megszakítás nélkül. A mintákat a forgóasztalra helyeztem, majd beállítottam a magasságot, készítettem egy fényképet, elindítottam a forgóasztalt, becsuktam a szekrény ajtaját, és elindítottam a mérést. A mérés körülbelül fél percet vesz igénybe, ez alatt 15 alkalommal méri végig a rendszer a reflektanciát. Az összes mérést külön fileban tárolja el, ezeket utána átlagolni lehet. A mérést követően kinyitottam a szekrényt, leállítottam a forgást, kissé lejjebb engedtem a forgóasztalt, hogy véletlenül se érjen bele a szonda végébe a talajminta, majd kivettem a mintát és kicseréltem egy másikra. A mérési elrendezés a 20. ábrán látható.



20. ábra: A spektrofotométeres mérés menete

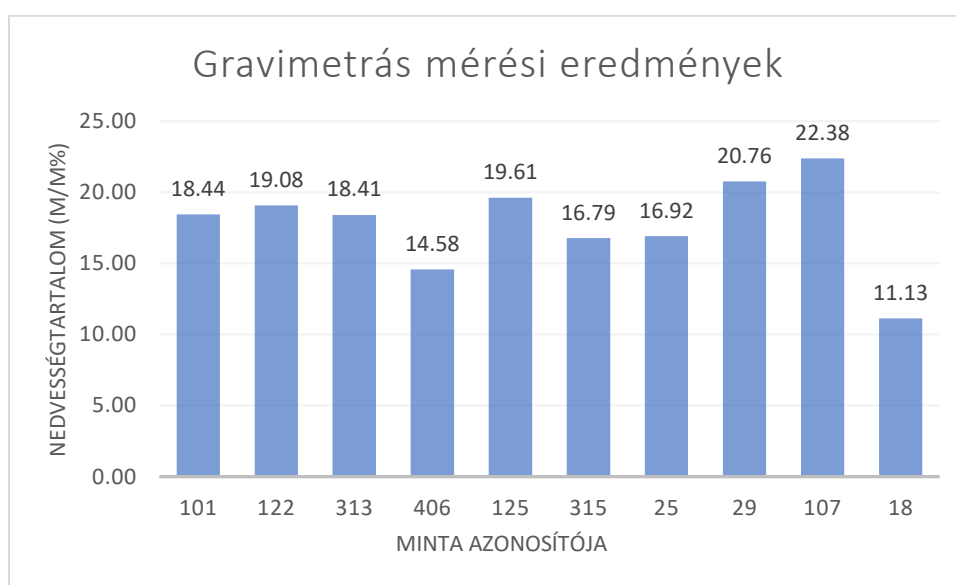
(saját felvétel)

A száraz minták mérésekor annyi különbség volt a mérés menetében, hogy a kemencéből egyesével vettem ki a mintákat, melyeknek először a tömegét mértem le, majd rögtön azután a reflektanciáját is. A spektroszkópiai mérésekből kapott fileok neveit feljegyeztem, de az egyszerűség kedvéért a kupakok számát követték. A kapott adatokat lementettem, hogy el lehessen kezdeni feldolgozni.

5. Az eredmények értékelése

5.1 Gravimetriás mérések értékelése

A gravimetriás mérésből nyert adatok a már korábban is ismertetett 1. táblázatban találhatóak. A gravimetriás mérés elvégzése azért volt szükséges, hogy meg tudjam állapítani mennyire pontosan lehet meghatározni a nedvességtartalmat a reflektanciaszintek alapján, illetve végső esetben arra is alkalmas, hogy egy fix pontot tudjon szolgáltatni, amely alapján aztán relatív nedvességtartalmat lehet számítani a reflektanciákból. A gravimetriás mérés nedvességtartalmainak ábrázolása a 21. ábrán látható.



21. ábra: A gravimetriás mérés eredményei

A gravimetriás mérésből tehát megállapítható, hogy a minták jelentős része között igen kis különbség volt, amely nem ideális a reflektancia alapú mérés szempontjából, de a 107-es és 18-as minták, amelyek közvetlenül egymás melletti területről származnak, jelentős különbséget mutatnak, ezeket fogom részletesebben használni a továbbiakban, de a többi adatot is feltüntetem. A gravimetriás mérések bizonytalanságát számos tényező befolyásolja, ezek a következők:

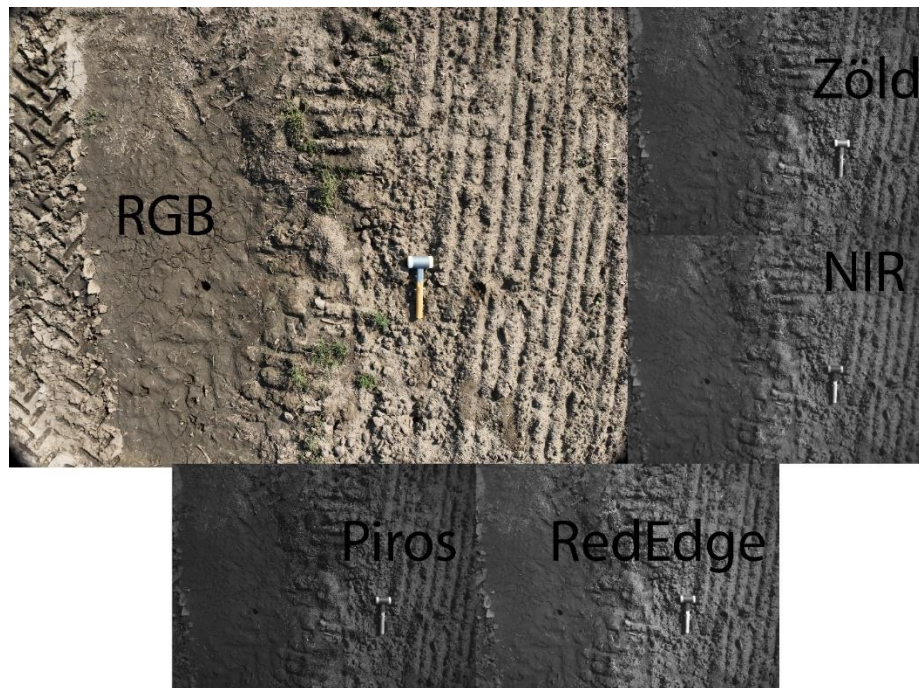
- A talajmintavételtől a mérésig eltelt idő közbeni természetes száradás
- A mintadarabok vételének kézi módjából adódó inkonzisztencia a minták vételi mélységében
- A mintadarabok száradása a szárításra való előkészítés során

- A szárítás után a kemencéből való kivétel és a mérés között eltelt idő alatti visszanedvesedés
- A mérleg felbontása

Összességében azonban ezek a hibatényezők csak kis mértékben befolyásolják az eredményeket, ezért a gravimetriás mérés eredményeinek a megbízhatósága sokkal jobb a távérzékeléses becsléssel elérhetőhöz képest, így ezek eredményei etalonnak, viszonyítási alapnak tekinthetők.

5.2 Reflektancia becslése a multispektrális felvételekből

A multispektrális drónnal készült képek közül az egyik helyszínen rögzített felvételtől készített színes RGB, valamint monokróm zöld, piros, NIR, és RedEdge képek összevetve a 22. ábrán láthatók.

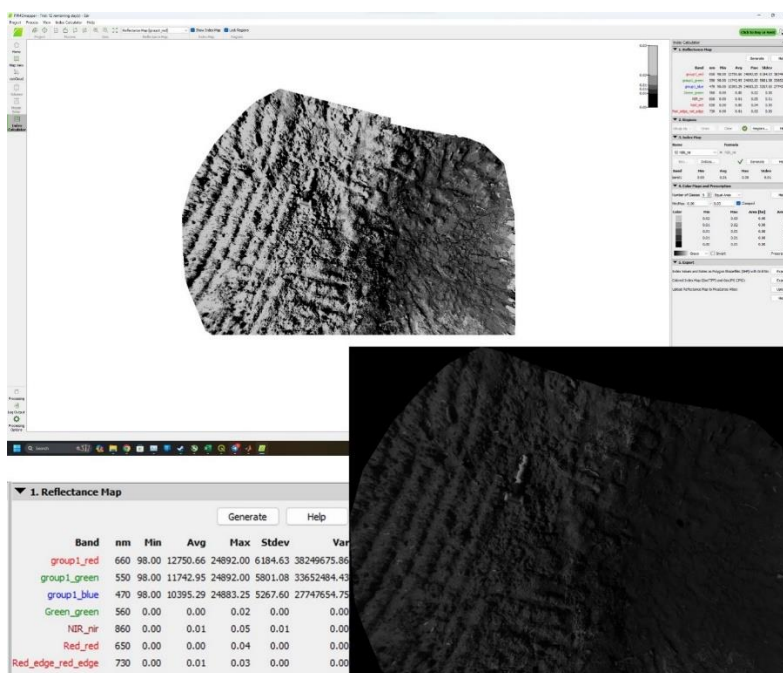


22. ábra: A multispektrális képek összevetve

A készített képeket beimportáltam a megfelelő programba és megkezdtem a feldolgozást. Az elsődleges cél reflektancia meghatározása volt, hiszen azután abból lehet a nedvességtartalomra következtetni.

5.2.1. Reflektanciaadatok becslése Pix4D szoftverrel

Számos szoftver alkalmas a felhasznált multispektrális kamera jellemzőire, valamint a drón által mért megvilágítás adatokra támaszkodva a multispektrális kamera nyers, digitális értékeket tartalmazó kimeneti fájljából a reflektanciaadatok becslésére. Ezek közül az egyik legismertebb, Pix4dmapper nevű program próbaverziójának alkalmazásával próbálkoztam, amely azonban függvényhiba miatt, vagy azért, mert ezt a típusú kamerát nem kezeli jól, túlságosan kis értékeket adott vissza, irreálisnak tűnő adatokkal. A feldolgozóprogram és a kapott reflektanciaértékek a 23. ábrán láthatók.



23. ábra: A pix4d program, a kapott reflektancia adatok és a végső, erősítés utáni kép

Az ábra jobb alsó sarkában látható kép a kiexportált reflektancia kép, melynek pixel értékei a szoftver által számított reflektancia 10-szeresének felelnek meg. Az így kapott értékeket összevetve a spektrofotométerrel végzett vizsgálattal körülbelül megfelelő reflektanciaértékek jöttek ki, tehát tulajdonképpen maga a konvertálás megfelelően működik, ha végső lépésként egy ilyen átalakítást végzünk még. A feldolgozást tovább nehezítette, hogy mivel nem egész földterületeket mértem fel nedvességtartalom meghatározásra, ezért a programok nehezen illesztették össze a képeket és volt, hogy nem is akarták elvégezni a számításokat. Ha több idő állna rendelkezésre és olyan földterületre olyan időszakban ki tudtam volna jutni, ahol nagyon

változók voltak a nedvességtartalom értékek akkor lehetséges, hogy sokkal jobban sikerült volna ezeknek az automatikus programoknak feldolgozni.

5.2.2. Reflektanciaértékek becslése a DJI számítási módszere alapján

A felhasznált multispektrális felmérő drónt gyártó DJI cég szintén közread egy számítási módszert a kamerák kimeneti adatainak, a mért megvilágításnak és a kamera jellemzőinek ismeretében a reflektancia becslésére. A közeli infravörös (NIR) sávra vonatkozóan az alábbi összefüggések használhatók: (http5)

$$N_{ref} = \frac{NIR_{reflected}}{NIR_{incident}} = \frac{NIR_{camera} \cdot pCam_{NIR}}{NIR_{LS} \cdot pLS_{NIR}} \cdot \rho_{NIR} \quad (6)$$

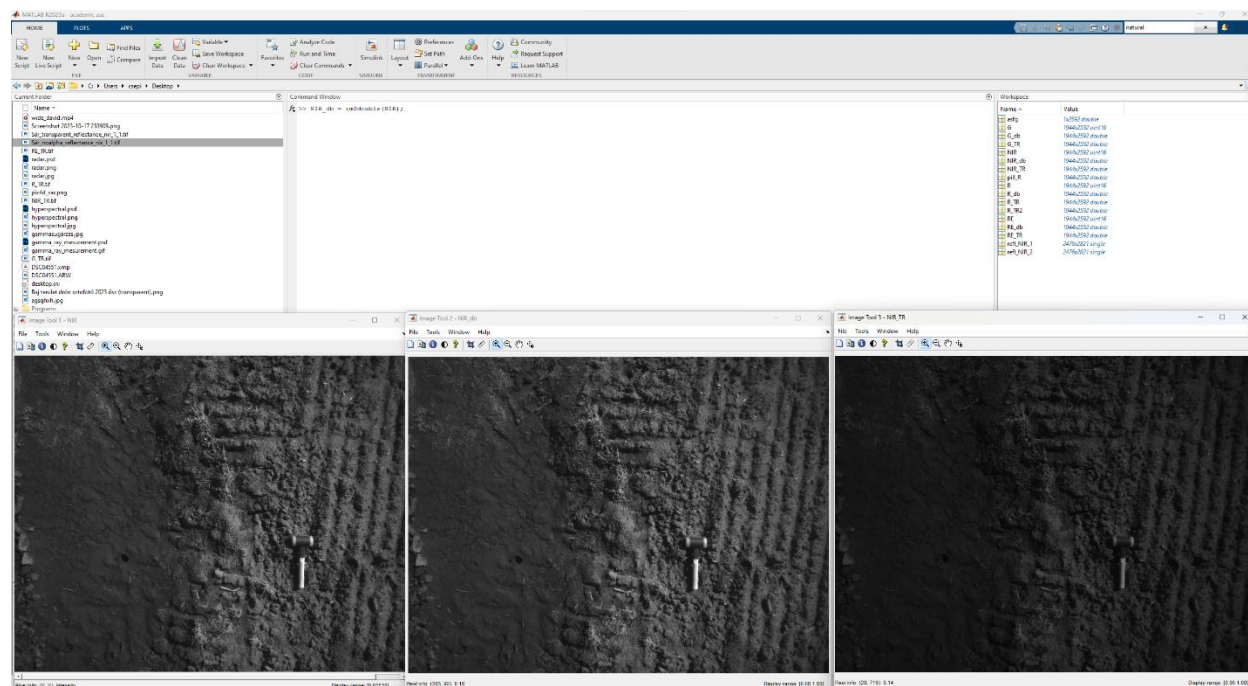
$$NIR_{camera} = \frac{I_{NIR} - I_{Blacklevel}}{NIR_{gain} \cdot \frac{NIR_{etime}}{10^6}} \quad (7)$$

A képlet alkalmazásával azonban több probléma is felmerült. Egyrészt a dokumentációban nem ismertetik pontosan a képletekben használt változók megfelelőit a képek metaadataiból, másrészt a képletben használt expozíciós idő értékét mikroszekundumban várják, ugyanakkor a képek metaadataiban ez szekundumban szerepel, ezért korrigálni kellett ezt is. A kalkuláció elvégzése után a Pix4D alkalmazással kapott, és a valósnak tekinthető hiperspektrális adatokhoz képest nagyságrendekkel eltérő számok adódtak, ezért a kiadott képlet hibájára következtetek, ezt a feldolgozási lehetőséget nem tudom használni így hiszen másik dokumentáció nincs erről a rendszerről.

5.2.3. Reflektanciaértékek becslése referencia adatok alapján

Mivel az általam alkalmazott multispektrális drónnal gyűjtött adatokból történő reflektancia becslésre egyik irodalmi módszer sem tűnt megbízhatóan alkalmazhatónak, a hiperspektrális mérés alapján ismert pontokhoz tartozó reflektancia értékeken alapuló saját számítási módot alkalmaztam. A saját feldolgozási módszerem szerint a képeket először img2double függvénnyel átkonvertáltam, amely automatikus konvertálást végez az eredeti 16 bites „unit16” adathalmazból,

amelyben a képpontok 0 és 65535 között vehetnek fel értékeket a double nevű adattípusra, amelyben minden érték 0 és 1 között van. A konvertálást követően az image viewer tool nevű eszközzel megnyitom a képet és megvizsgálom, hogy a pontnak, ahol a referencia mért értékkel rendelkezünk mekkora az értéke, majd ennek az értéknek és a referencia mérésből való értéknek a hányadosából tudok kapok egy számot, amellyel, ha leosztom a képet akkor jó közelítéssel a referenciamérésnek megfelelő értékeket kapok reflektanciaértéknek. A kapott reflektanciaértékekhez ezután hozzárendelhető a nedvességtartalom értéke. A feldolgozás menete a 24. ábrán látható.

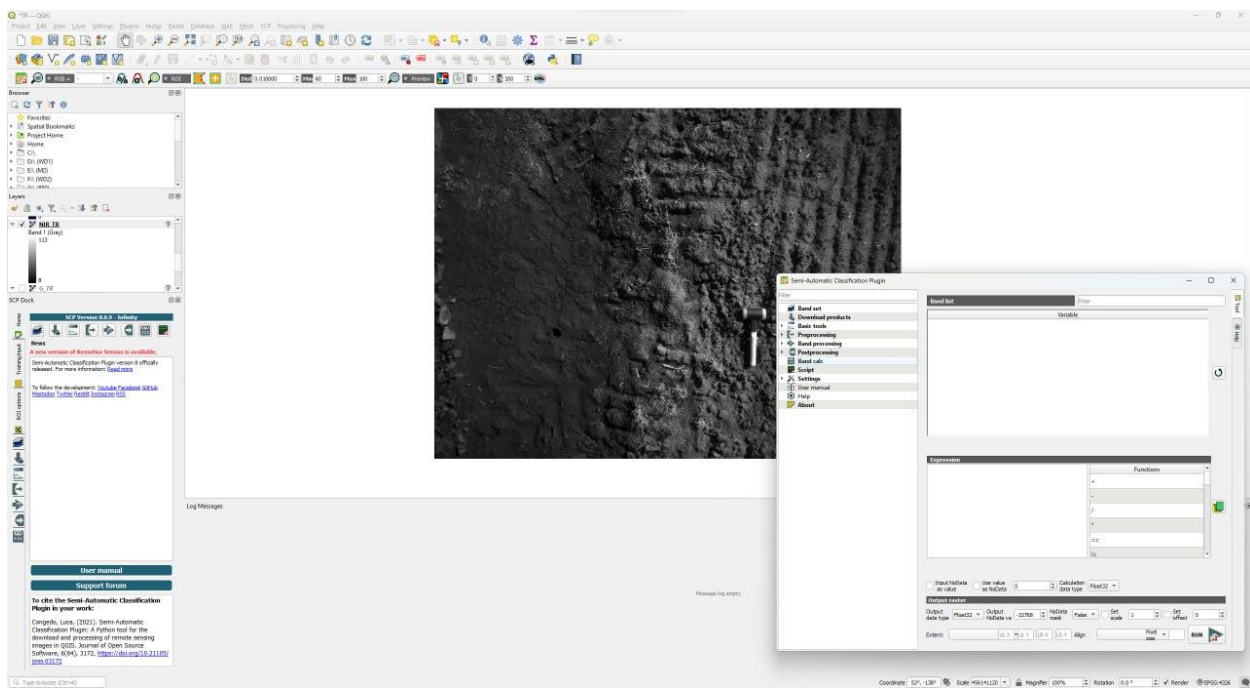


24. ábra: A feldolgozás menete Matlab-ban

A multispektrális mérés pontossága ezzel az egyedi módszerrel végzett kalibráció után megfelelő, így relatív nedvességtartalom meghatározásra alkalmazható. A multispektrálisból kapott reflektanciaérték a másik talajmintánál vizsgált pontra 0,1964 volt, míg a hiperspektrális mérés alapján ennek 0,1826 kellett volna lennie. A relatív hiba így 7%, ez nem hatalmas eltérés, viszonylag jó pontossággal alkalmazható tehát a módszer a relatív nedvességtartalom meghatározására az így számított reflektancia értékből, de fontos kiemelni hogy kizárólag szabad talajfelszín esetében alkalmazható, a növényborítottság használhatatlanná teszi ezt a módszert.

5.2.4. Eredmények megjelenítése

A végső feldolgozási lehetőség a QGIS Semi_Automatic Classification Plugin-ja, amellyel jellemzően a műholdas adatokat szokták feldolgozni. Ebbe beimportálva a képeket nem tudunk külön reflektanciaértéket számolni, azonban reprezentatív hamis színezésű képeket készíthetünk, ezért a kezdeti nyers képekkel való próbálkozás után ide inkább a pix4d-vel vagy a Matlabbal készített képeket vittem be. Ezeket a képeket ezután egyedi színezéssel tudtam ellátni, amellyel könnyen prezentálható képeket kaptam, illetve segítségével térképbe is illeszthetők az adatok. A 25. ábrán látható a QGIS és a használt plugin kezelőfelülete.



25. ábra: A QGIS-ben való feldolgozás menete

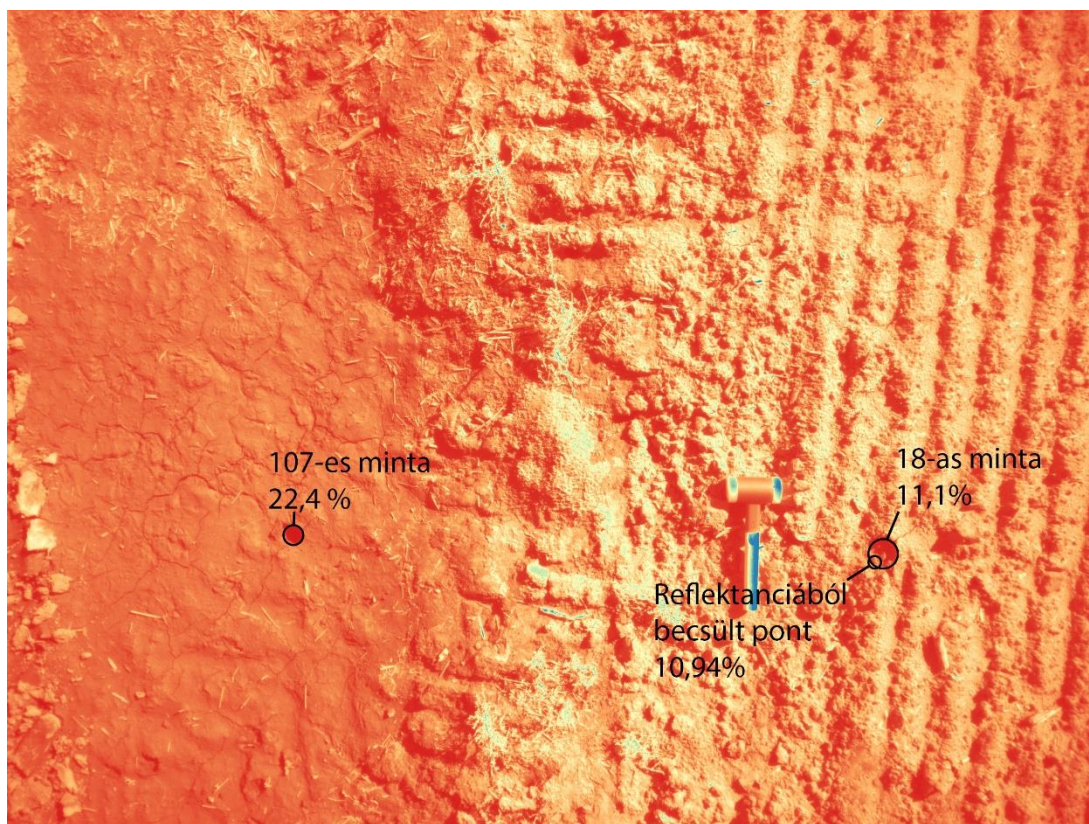
5.3. Nedvességtartalom becslése multispektrális adatok alapján

A fent leírtaknak megfelelően a talaj reflektanciája a nedvességtartalom mellett sok egyéb jellemzőtől is függ. Ilyen a talaj szervesanyag tartalma, szemcseméret összetétele, textúrája, a benne található növényi részek mennyisége stb. Továbbá, az egyes érzékelési sávokhoz tartozó reflektancia becslésének pontossága biztosan függ a megvilágítás jellemzőitől is (ezt a dolgozatomban nem vizsgáltam). Vizsgálataim alapján arra a következtetésre jutottam, hogy az alkalmazott multispektrális mérőrendszer nem alkalmas a talaj nedvességtartalmának becslésére, ha a felvételezés idejében nem rendelkezünk információval a talajnak legalább egy pontján a

nedvességtartalom értékéről. A figyelmet ezután a relatív nedvességtartalomra fordítottam, vagyis arra, hogy ha az adott képen egy pontról megmondom, hogy milyen nedvességtartalmú akkor a többi pontról is meg tudjam mondani a képen, hogy azok milyen nedvességtartalommal rendelkeznek.

A reflektanciaadatok alapján a nedvességtartalom becslését úgy végeztem, hogy az azonos területről származó egyik mintának a gravimetriás mérésből adódóan ismert nedvességtartalmát hozzárendeltem a mintavétel helyén (ez a felvételekből jól látható) mért reflektanciaértékhez. A korábbiak alapján a reflektancia értéke fordítottan arányos a nedvességtartalommal, kisebb reflektanciához („sötétebb” felület) nagyobb nedvességtartalom tartozik. Továbbá a modellezésem során úgy tekintettem, hogy a teljesen száraz (0% nedvességtartalmú) talajhoz 1 értékű (100%) reflektancia tartozik. Ez a közelítés természetesen nem minden talajtípus esetében alkalmazható, így itt is ki kell emelni, hogy ennek a módszernek az alkalmazásakor minden talajtípusra külön kell elvégezni a kalibrálást, lehetőleg legalább két különböző, ismert nedvességtartalmú pontban.

A nedvességtartalom becsléséhez kalibrációs pontként a 107. számú, 22,4 % nedvességtartalmú mintát alkalmaztam. A becslés ellenőrzését (validálását) a 18. számú mintán végeztem. Itt a multispektrális mérésből megállapított nedvességtartalom 10,94% volt, a tényleges érték pedig 11,1%. A relatív hiba így 1,35%, ez nem hatalmas eltérés, viszonylag jó pontossággal alkalmazható tehát a módszer a relatív nedvességtartalom meghatározására az így számított reflektancia értékből, de fontos kiemelni, hogy kizárólag szabad talajfelszín esetében alkalmazható, a növényborítottság használhatatlanná teszi ezt a módszert. A mérések eredményét és szemléltetését a 26. ábrán láthatjuk.



26. ábra: A nedvességtartalom ábrázolása a kiexportált képen

5.4 Hiperspektrális mérések értékelése

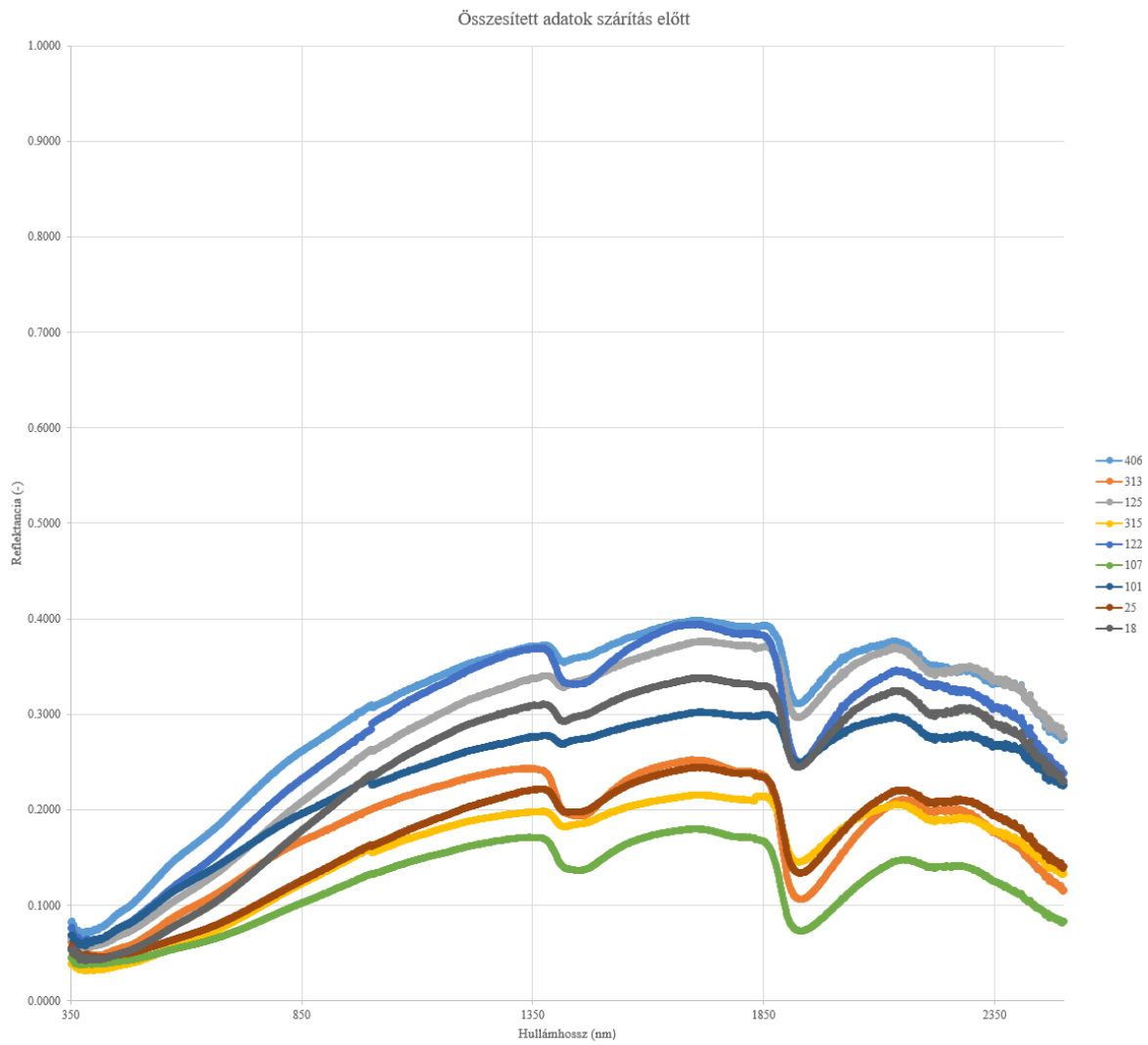
A spektrofotométeres mérés vagy más néven hiperspektrális mérés során a talajmintákról reflektanciagörbéket kaptunk, mind a szárítás előtt, mind a szárítás utáni állapotban. A mért adatokat táblázatban kaptam meg, minden mintáról 15 darab mérés történt és 1nm-es felbontással hullámhosszonkénti reflektanciaértékeket kaptam vissza. Első lépésként a 15 mérés átlagát vettem, és ebből készítettem egy átlag adatsort, amelyet aztán ábrázolni tudtam az összes minta esetében. A 2. táblázatban látható az adatsorból kivett 350 és 355nm közötti nyers táblázat. A táblázatban található értékek reflektancia értékek, amelyek nem rendelkeznek mértékegységgel.

3. táblázat: A nyers reflektancia adatok a spektrofotométerből (részlet)

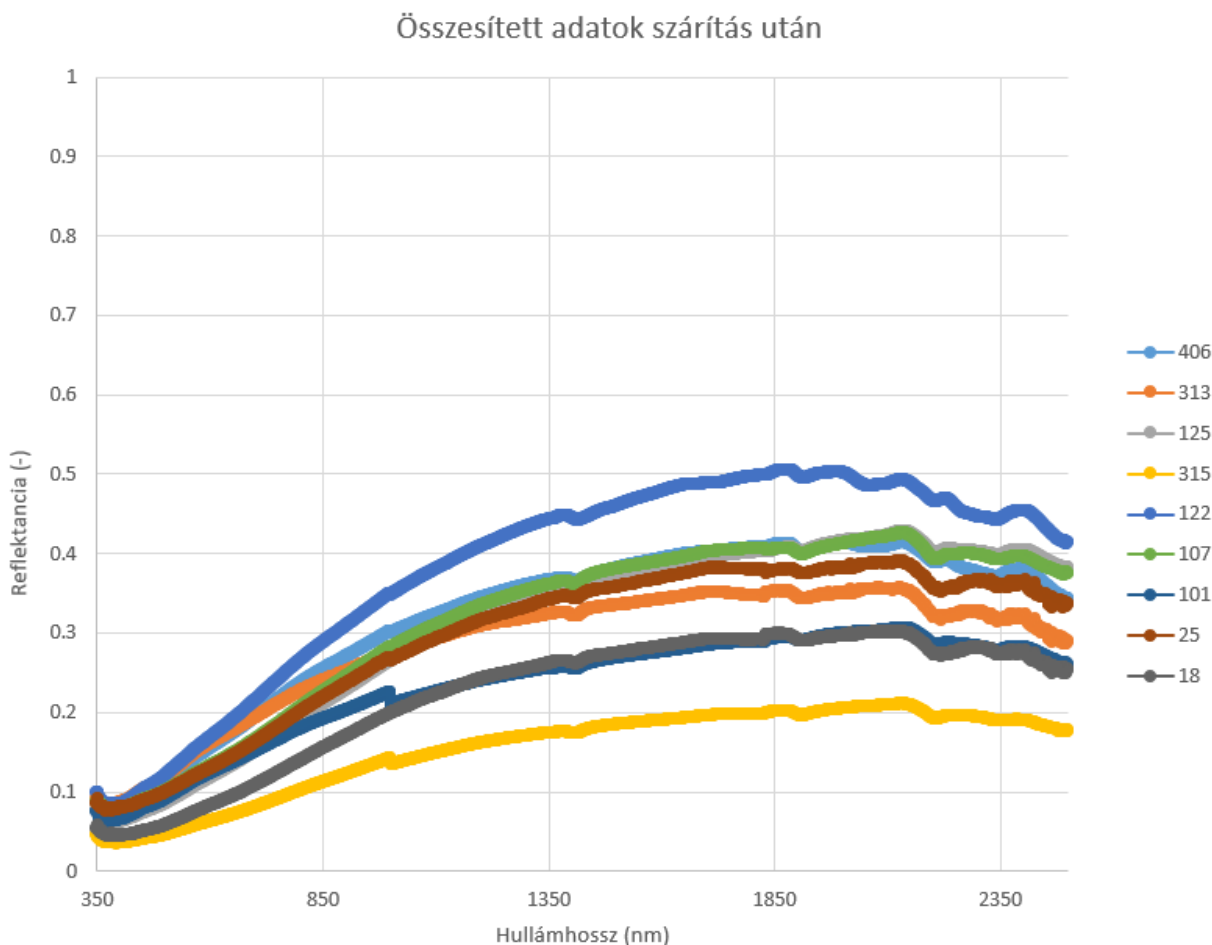
Hullámhossz [nm]	107_0 0000.a sd.ref	107_0 0001.a sd.ref	107_0 0002.a sd.ref	107_0 0003.a sd.ref	107_0 0004.a sd.ref	107_0 0005.a sd.ref	107_00 0006.asd .ref	107_0 0007.a sd.ref	107_00 0008.asd .ref
350	0,0436	0,0435	0,0485	0,0484	0,0409	0,0508	0,0429	0,0515	0,0443
351	0,0409	0,0503	0,0447	0,0496	0,0412	0,0496	0,0467	0,0474	0,0500
352	0,0380	0,0542	0,0418	0,0444	0,0443	0,0457	0,0466	0,0464	0,0495

353	0,0355	0,0506	0,0443	0,0435	0,0462	0,0409	0,0408	0,0483	0,0426
354	0,0336	0,0399	0,0480	0,0506	0,0443	0,0380	0,0332	0,0413	0,0464
355	0,0387	0,0448	0,0389	0,0519	0,0411	0,0369	0,0321	0,0404	0,0461
107_000 09.asd.ref	107_000 10.asd.ref	107_000 11.asd.ref	107_000 12.asd.ref	107_000 13.asd.ref	107_000 14.asd.ref			Reflektancia átlag	
0,0397	0,0394	0,0358	0,0455	0,0591	0,0387			0,0449	
0,0428	0,0441	0,0466	0,0510	0,0590	0,0491			0,0480	
0,0407	0,0507	0,0492	0,0534	0,0530	0,0523			0,0480	
0,0352	0,0506	0,0403	0,0499	0,0487	0,0456			0,0448	
0,0338	0,0393	0,0325	0,0441	0,0498	0,0452			0,0419	
0,0369	0,0373	0,0384	0,0435	0,0455	0,0489			0,0416	

A kapott átlag adatsort a Reflektancia oszlopban számoltam ki, majd ezt a reflektancia oszlopot a hullámhossz függvényében ábrázoltam, így kaptam reflektancia görbéket a mintákra az egész tartományból. Az eljárást mind a szárítás előtti mind a szárítás utáni adatsorral elvégeztem. A kapott diagramokat egybe összegeztem, a 27. ábra a szárítás előtti, a 28. ábra pedig a szárítás utáni reflektancia görbéket mutatja.



27. ábra: Az összesített adatok száritás előtt

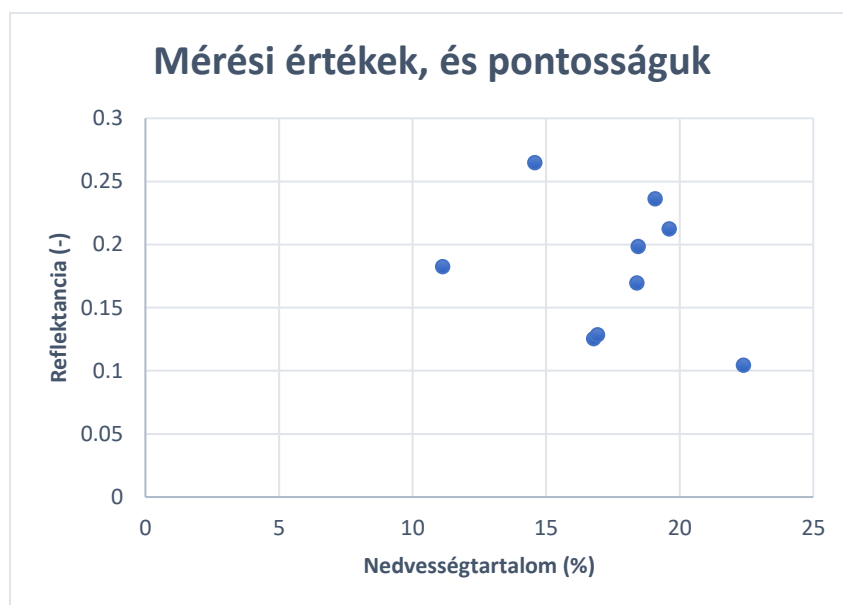


28. ábra: Az összesített adatok száritás után

A diagramokon látszik, hogy egyes nagyobb nedvességtartalmú talajminták is nagyobb reflektanciával rendelkeznek, mint a kisebb nedvességtartalmúak, ez egy abnormalis jelenség, és több dolognak is betudható, amelyek, mint hibalehetőségek lépnek fel ezeknél a méréseknél. Az egyik ilyen hibalehetőség az, hogy nem egyenlő távolságra voltak mindig a mérés során a talajminták a lencsétől, ez pedig befolyásolja a reflektanciaértéket ennél a mérőműszernél. Egy másik hibaforrás a minták egyenetlen felülete volt, mivel elég száraz talajokból tudtam mintákat venni, így a minták kinyerésekor azok összetöredezték, nem maradt vízszintes felületük, így inkonzisztens eredményeket kaptunk róluk. Még egy hibaforrás lehetett az, hogy a talajoknak, ha kis mértékben is de más textúrája volt mindhárom helyen, ahonnan a mintát vettem, ez is befolyásolni tudja a reflektancia értékét.

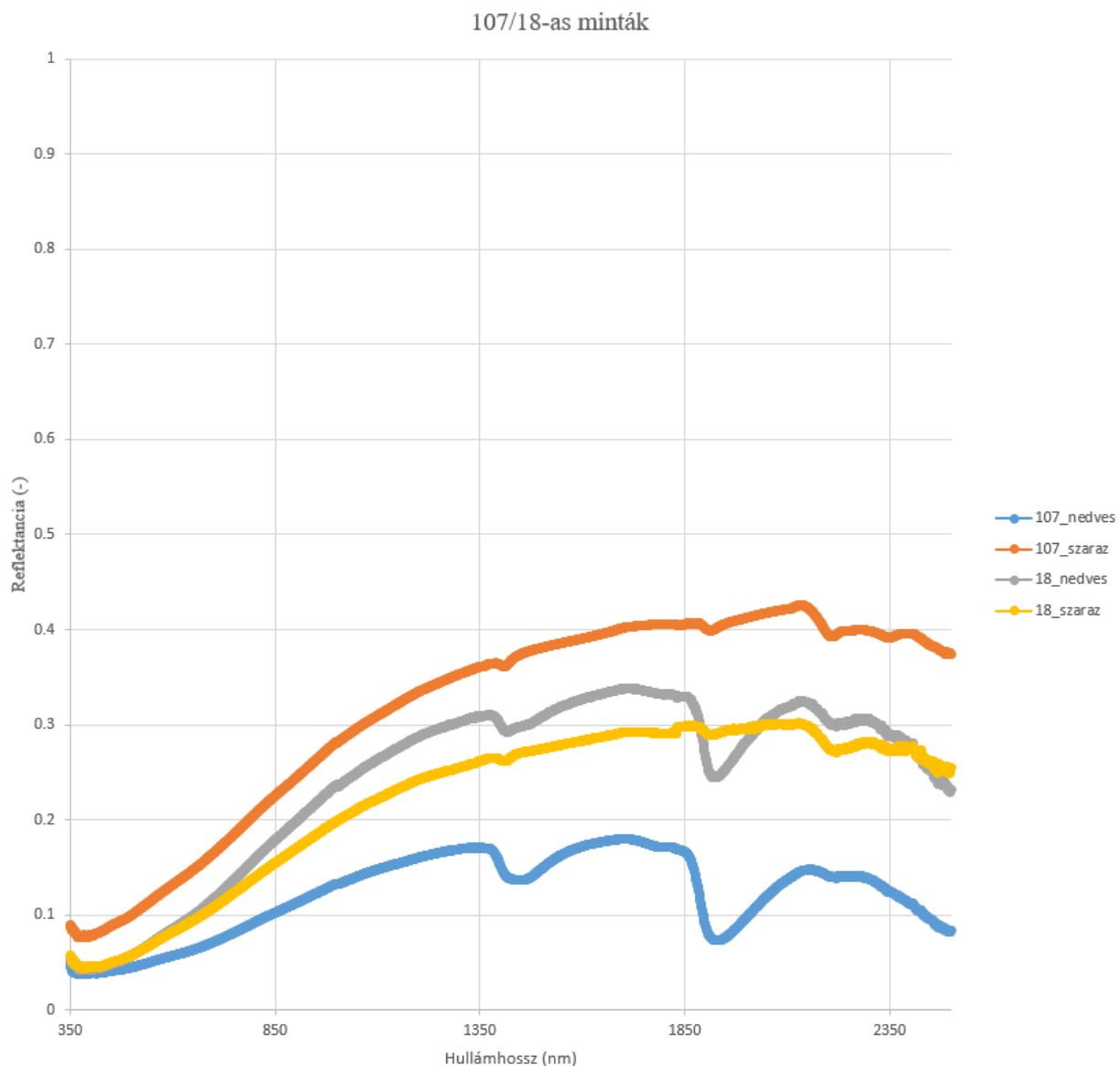
5.4.1 Hiperspektrális felvételek általános értékelése

A minták igen nagy szórást mutattak a talajtextúrák különbsége, a mérési távolság és a mintában található növényi részek miatt. A multispektrális adatokban is szereplő NIR sávnak megfelelő 860 nm-es sávban, melyben az irodalmi adatok alapján is a reflektancia jelentős változásait kellene látnunk a nedvességtartalom változásának a függvényében, a reflektanciaértékek alakulását a 29. ábra szemlélteti. Látható, hogy a mérési adatokban a NIR sáv közelében nem figyelhető meg korreláció a reflektancia és a nedvességtartalom között, annak ellenére sem, hogy ezek a mérések laboratóriumi körülmények között, jól kontrollált megvilágítás mellett kerültek elvégzésre. Így kijelenthető, hogy önmagában ez a sáv szintén nem alkalmas az abszolút nedvességtartalom becslésére.



29. ábra: A mérési pontosság szemléltetése

A nagy bizonytalansághoz hozzájárulhatott a vizsgált minták és az érzékelő távolságának beállításának pontatlansága, de elsődleges oka a vizsgált talajok különböző textúrája lehet. Emiatt itt is csak a 107-es és 18-as mintákra fogok koncentrálni, amelyek a sárból, illetve a sár melletti száraz területről származnak, és a legnagyobb a nedvességtartalom különbségük. Erről a két mintáról összesített képet mutat a 30. ábra.



30. ábra: A 107-es és 18-as minták szárítás előtt és után

5.4.2 Az NSMI és NDMI becslésvizsgálata

A hiperspektrális mérést a multispektrális kalibrációjára és korrigálására végeztük, de ennek segítségével is lehet nedvességtartalmat becsülni, erre többféle indexet is készítettek, elsősorban a Normalised Soil Moisture Indexet (Hausbrock 2008) és Normalised Difference Moisture Indexet szerettem volna használni.

$$NSMI = \frac{R_{1800} - R_{2119}}{R_{1800} + R_{2119}} \quad (8)$$

ahol:

R_{1800} – Reflektancia az 1800nm-es sávban

R_{2119} – Reflektancia a 2119nm-es sávban

Elvégeztem a számításokat a 107-es és 18-as mintákra. A reflektancia értéke a nagyobb nedvességtartalommal egyre kisebb lesz, ezért az NSMI index értéke is egyre kisebb lesz a nagyobb nedvességtartalmak mellett. Az indexek azonban közvetlenül nem értelmezhető nedvességtartalomként, itt szintén szükséges egy referencia pont, melyhez viszonyítva az index alapján a nedvességtartalom becsülhető, ezért a hiba meghatározására a két különböző nedvességtartalom mellett számított NSMI indexek közti arányt és a valós nedvességtartalmak közti arányt használtam. A számított értékeket a 4. táblázat foglalja össze.

4. táblázat: Az NSMI index számítása és értékelése

Minta azonosítója	18	107
1800nm reflektancia	0,331	0,170
2119nm reflektancia	0,322	0,142
NSMI	0,0141	0,09
Valódi nedvességtartalom	11,1 %	22,4 %
NSMI értékek közötti arány	0,156	
Valós nedvességtartalom közötti arány	2,018	
Hiba	92,3%	

A teljes körű vizsgálat érdekében megpróbáltam nem fordítottan arányosítani az NSMI értékeket a nedvességtartalommal, azonban abban az esetben még nagyobb, 217,3%-os hiba adódott. Az NSMI index használatával tehát nem jutottam eredményre, ezért saját megoldást kerestem a nedvességtartalom becslésére.

Az NDMI alapvetően a levelekben található nedvességtartalom becslésére volt kitalálva, de ennek ellenére is pontosabb értékeket adott. (Az NDMI képletét a [4.1 fejezetben](#) fejttem ki) Az NDMI vel számított értékeket az 5. táblázat foglalja össze.

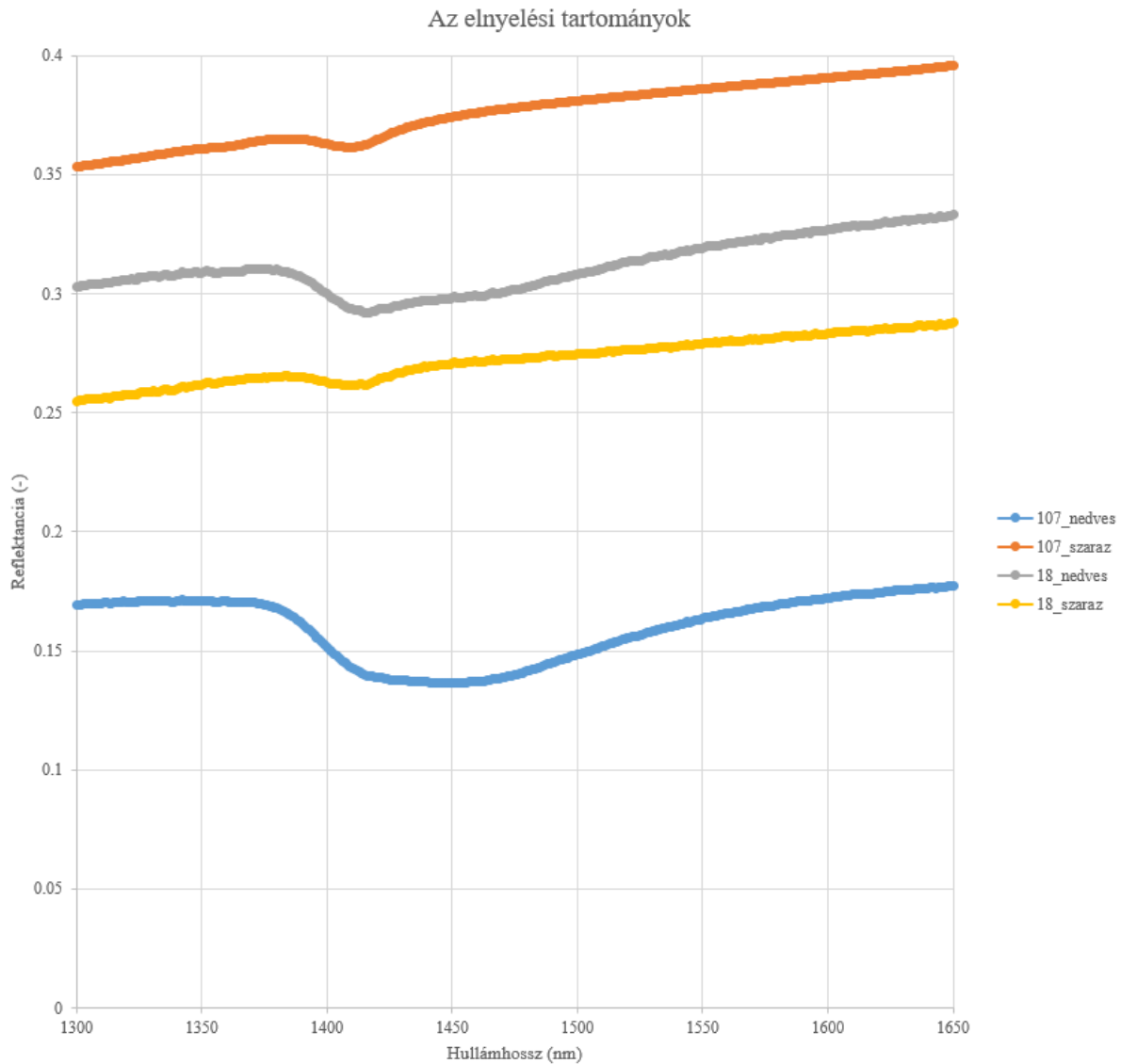
5. táblázat: Az NDMI index számítása és értékelése

Minta azonosítója	18	107
833nm reflektancia	0,172	0,099
1377nm reflektancia	0,31	0,168
NDMI	-0,286	-0,259
Valódi nedvességtartalom	11,1 %	22,4 %
NDMI értékek közötti arány	1,101	
Valós nedvességtartalom közötti arány	2,018	
Hiba	45,4%	

Az NDMI index ugyan pontosabb, azonban a pontossága még mindig elmarad a használható szinttől.

5.4.3 Egyedi módszer kidolgozása a relatív méréshez

Egy olyan megoldást szerettem volna alkalmazni, amely a víz elnyelési tartományát használja ki, illetve az elnyelés mértékét kvantifikálja. A diagramok alapos vizsgálata után kiválasztottam az 1380-as és az 1440-es sávot a két mintavételi pontnak, hiszen az 1380 as sáv nem esik bele az elnyelésbe, de a közvetlen közelében van, az 1440 es sáv viszont általában az egyik leginkább elnyelt sáv a diagramok alapján, amelyet a 31. ábra mutat be.



31. ábra: Az elnyelési tartományok

A 107-es és 18-as minták esetében is kivontam az 1380nm-nél található reflektanciából a 1440nm-nél mért reflektanciát, majd a 107-es minta esetében az ismert nedvességtartalom függvényében egy együtthatót kerestem, amellyel a reflektanciakülönbségből kijön a nedvességtartalom értéke. Ez az együttható 707 lett, amellyel megszorozva a 18-as mintában mért különbséget 9,31 % nedvességtartalmat kaptam, a valóban mért 11,13 % helyett. A mérés hibája így: 16,35 %

A számításokhoz a következő egyenleteket használtam:

$$\rho_x = \frac{x_1}{R_{1380} - R_{1440}} \quad (9)$$

ahol:

x_1 : A mért nedvességtartalom a referenciaponton

R_{1380} : A reflektancia 1380nm-nél a referenciapontnál

R_{1440} : A reflektancia 1440nm-nél a referenciapontnál

ρ_x : Az együttható a korrekciós számításához

$$x_2 = (R_{1380} - R_{1440}) \cdot \rho_x \quad (10)$$

ahol:

x_2 : A számított nedvességtartalom

R_{1380} : A reflektancia 1380nm-nél a mért pontnál

R_{1440} : A reflektancia 1440nm-nél a mért pontnál

ρ_x : Az együttható a korrekciós számításához

A hiba elfogadható, tehát ezzel a módszerrel relatív nedvességtartalmat szintén egész jó pontossággal lehet meghatározni. Ez a módszer alkalmas lehet abszolút nedvességtartalom meghatározásra is, azonban csak akkor, ha a talajtextúra és a mérési körülmények is megegyeznek a minták esetében.

6. Összefoglalás

A terepjárás és mezőgazdaság szempontjából hasznos információkat gyűjteni a talajról mindig fontos volt, és fontos is marad, távérzékeléssel elvégezni vizsgálatokat pedig egy sokkal kényelmesebb alternatívát jelent, mint egyesével begyűjteni őket.

Dolgozatomban célul tűztem ki a távérzékeléses módszerek alkalmazásával a talaj nedvességtartalom becslési módszereinek elemzését és bemutatását. A dolgozatban szakirodalmi források alapján bemutattam a távérzékeléses vizsgálatok történeti háttérét és elméleti alapjait, valamint a talaj nedvességtartalom mérés jelentőségét és mérési módszereit. Ezt követően kiválasztott, eltérő textúrájú és nedvességtartalmú mezőgazdasági talajokon saját méréseket végeztem és értékeltem ki. A kiválasztott területeken helyszíni multispektrális felvételeket készítettem egy erre alkalmas drónos mérőrendszerrel és a talajok további elemzése céljából talajmintákat is vettem az így felmért területekről. A begyűjtött talajminták alapján laboratóriumban gravimetriás méréssel meghatároztam a vizsgált anyagok nedvességtartalmát, melyet a távérzékeléses adatok feldolgozása során referencia adatoknak tekintettem. Ezt követően elemeztem a multispektrális adatok feldolgozási lehetőségeit. Ennek első lépése a felvételekből a felületre jellemző reflektancia adatok kiszámítása volt. Itt számos, az irodalomban található módszerrel próbáltam elvégezni a számításokat, melyek nem hoztak kielégítő pontosságot, így végül saját, referencia adatokon alapuló módszert javasoltam a számításokra. A multispektrális reflektancia adatok alapján a nedvességtartalom becslésére szintén saját módszert javasoltam és alkalmaztam.

A begyűjtött talajmintákon hiperspektrális reflektancia méréseket is végeztem. A hiperspektrális mérési adatok alapján történő nedvességtartalom becslésnél szintén több irodalomban fellelhető módszert alkalmaztam és saját számítási eljárást is alkalmaztam.

Az általam kidolgozott számítási módszerek mind a multispektrális, mind a hiperspektrális mérés esetében kielégítő pontosságú nedvességtartalom becsléshez vezettek, azonban ki kell emelni, hogy ezek a módszerek mind referencia adatok használatán alapulnak. Vizsgálataim szerint ilyen távérzékeléses felvételekből a nedvességtartalom becslése csak ismert referencia pontok alapján végezhető el. További feltétel még a megfelelő megvilágítás és az is, hogy a terület a talajfelület láthatósága és az elkülöníthetőség a növényzettől.

7. Summary

From the perspective of off-road driving and agriculture, collecting useful information about the soil has always been important and will remain so. Conducting investigations through remote sensing provides a much more convenient alternative than collecting them individually.

In my thesis, I set out to analyze and present methods for estimating soil moisture content using remote sensing techniques. Based on literature sources, I introduced the historical background and theoretical foundations of remote sensing studies, as well as the significance and measurement methods of soil moisture content. Following this, I conducted my own measurements on selected agricultural soils with varying textures and moisture levels. In the chosen areas, I captured on-site multispectral images using a suitable drone-based measurement system and collected soil samples for further analysis.

Using the collected soil samples, I determined the moisture content through laboratory gravimetric measurements, which I considered as reference data during the processing of remote sensing data. Subsequently, I analyzed the processing possibilities of multispectral data. The first step was to calculate reflectance data characteristic of the surface from the images. I attempted several calculation methods found in the literature, but they did not yield satisfactory accuracy. Therefore, I proposed my own calculation method based on reference data. I also proposed and applied my own method for estimating moisture content based on multispectral reflectance data.

I also conducted hyperspectral reflectance measurements on the collected soil samples. In the estimation of moisture content based on hyperspectral data, I applied various methods found in the literature and developed my own calculation procedure.

The calculation methods I developed for both multispectral and hyperspectral measurements led to satisfactory accuracy in estimating moisture content. However, it should be emphasized that these methods are all based on the use of reference data. According to my research, estimating moisture content from such remote sensing images can only be done with known reference points. Another requirement is appropriate lighting, and the area must be visible on the soil surface and distinguishable from vegetation.

8. Nyilatkozatok

NYILATKOZAT

Csepregi Tamás Zoltán (HMJAVI) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a szakdolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A szakdolgozatot a záróvizsgán történő védeésre javaslom / nem javaslom¹.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem^{*2}

Kelt: ____ 2023 ____ év ____ 11 ____ hó ____ 2 ____ nap


belső konzulens

¹ A megfelelő aláhúzendő.

² A megfelelő aláhúzendő.

NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: Csepregi Tamás Zoltán
A Hallgató Neptun kódja: HMJAVI
A dolgozat címe: Mezőgazdasági területek drónos távérzékelésének lehetőségei
A megjelenés éve: 2023
A konzulens intézetének neve: Műszaki Intézet
A konzulens tanszékének a neve: Járműtechnika Tanszék

Kijelentem, hogy az általam benyújtott szakdolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkori szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem könyvtári repozitori rendszerébe. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem könyvtári repozitori rendszerében.

Kelt: 2023. év november hó 3 nap



Hallgató aláírása

9. Irodalomjegyzék

Bedidi, A., Cervelle, B., Madeira, J., Pouget, M., (1992) Moisture effects on visible 597 spectral characteristics of lateritic soils. Soil Sci. 153, 129–141. D

Bo-cai Gao, (1996) NDWI: A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space, Greenbelt, 257-266, ISSN 0034-4257

David W. Ball (1962) The Basics of Spectroscopy, SPIE

Edward J. Milton, Michael E. Schaepman, Karen Anderson, Mathias Kneubühler, Nigel Fox, (2009) Progress in field spectroscopy: Remote Sensing of Environment

J. Michael Hollas (1982) High Resolution Spectroscopy, Butterworth & Co.

Julius G. Neubronner (2017) The Pigeon Photographer, Rorhof

Russell G. Congalton (2010) Remote Sensing: An Overview, GIScience & Remote Sensing, 47:4, 443-459, DOI: 10.2747/1548-1603.47.4.443

Rouse, J.W., Haas, R.H., Schell, J.A. and Deering, D.W. (1973) Monitoring Vegetation Systems in the Great Plains with ERTS (Earth Resources Technology Satellite), Greenbelt, SP-351, 309-317

Shankar, Dwivedi. (2017). Remote Sensing of Soils, Hyderabad, Springer, 10.1007/978-3-662-53740-4.

S.-N. Haubrock, S. Chabrillat, C. Lemmnitz & H. Kaufmann (2008) Surface soil moisture quantification models from reflectance data under field conditions, International Journal of Remote Sensing, 29:1, 3-29, DOI: 10.1080/01431160701294695

http 1: http://www.digkep.hu/konyv/Hiper/Berke_Taverzekeles2_Kvark.pdf

http 2: <https://www.techtarget.com/whatis/definition/CMOS-sensor>

http 3: <https://dosoremi.hu/maps/genetikus-tipus/>

http 4: https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item_1388298/component/file_1388299/content

http 5:

https://dl.djicdn.com/downloads/DJI_Mavic_3_Enterprise/20230829/Mavic_3M_Image_Processing_Guide_EN.pdf