



INTÉZMÉNYI TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

2024. november 20.

Napraforgó állomány vizsgálata műholdas távérzékelési adatok és növényélettani paraméterek alapján

Examination of Sunflower Crops Based on Satellite Remote Sensing Data and Plant Physiological Parameters

Készítette: **Harangozó Máté Gábor**

ETFN6A

Mezőgazdasági mérnök, Bsc

Nappali tagozat

Szenti István Campus

Témavezető: Dr. Balogh János, egyetemi tanár

Növényélettan és Növényökológia Tanszék

Növénytermesztési- tudományok Intézet, MATE

Lehetséges OTDK szekció: Agrártudományi szekció

Gödöllő

2024.

Tartalom

1	Bevezetés és célkitűzés	4
2	Szakirodalmi áttekintés	6
2.1	Mit is jelent a távérzékelés?	6
2.2	A reflektancia spektroszkópia alapjai	6
2.3	Távérzékelés a mezőgazdaságban	8
2.4	A vegetációs indexek (NDVI, EVI) fogalma	9
2.5	Műholdak és a felszín feletti képalkotás	11
2.6	A napraforgó származása, jelentősége	13
2.6.1	A napraforgó rendszertana	13
2.6.2	A napraforgó morfológiája	14
2.7	A fotoszintézis	14
2.7.1	A kloroplasztisz	15
2.7.2	A fotoszintézis színanyagai	15
2.7.3	A fény abszorpciója, és a fotoszintézis fényszakasza	17
2.7.4	A fotoszintézis szénredukciós (sötét) szakasza	18
2.8	A növényi stressz	19
3	Anyag és módszer	22
3.1	Szántóföldi mérések	22
3.1.1	Klorofill-tartalom („Zöldesség”) mérése	23
3.1.2	Fotoszintézis és transzspiráció mérése	24
3.1.3	A LAI-mérése	25
3.2	A mérések során használt indexek (NDVI, EVI)	26
3.3	Adatfeldolgozás	27
4	Eredmények és értékelésük	28
4.1	Meteorológiai adatok elemzése	28
4.2	A területről készült műholdfotók elemzése	30
4.3	Háttér és élettani változók térbeli heterogenitása	33

4.4	A mért értékek közötti korrelációk és összefüggések keresése	38
5	Összefoglalás	42
6	Irodalomjegyzék	44
7	Köszönetnyilvánítás	47

1 BEVEZETÉS

A mezőgazdaság szerepe az emberiség történelmében mindig kulcsfontosságú volt, hiszen egész civilizációk és birodalmak emelkedtek fel, vagy éppen buktak el miatta. Ahogy haladtunk előre az időben, a mezőgazdaság jelentősége exponenciálisan növekedett a föld növekvő populációjával, ami azonban megkövetelte az agráriumtól, hogy az is egyre hatékonyabb legyen, különben birodalmakat megbuktató éhínség vette kezdetét. Manapság azonban, ugyanezt az elvárt növekvő tendenciát olyan új kihívások mellett kell kielégítenie a mezőgazdaságnak, mint például az új invazív kártevők, paraziták és növényi betegségek megjelenése, a termelésre alkalmas területek csökkenése, hogy a helytelen talajművelési szokások miatt, a gazdálkodás már eleve ledegradálódott talajokon történik, illetve az egyre gyakoribb és óriási károkat okozó időjárási szélsőségek megjelenése, mint például az év során lehulló csapadék változó eloszlása, vagy a nyári aszályok, melyek extrém 40 fok feletti hőmérséklettel párosulnak és akkor még nem említettem a rossz kémiai védekezések következtében immunissá vált kártevők elszaporodását (Mir et al., 2022).

Tény, hogy az említett kihívások többsége a klímaváltozáshoz kötődik, melyet mindenki megtapasztalhatott az elmúlt években már ha csak az évszakok jelentős eltolódására vagy a gyümölcsösök elfagyásáért felelős áprilisi fagyokra gondolunk. Európában és így Magyarországon is két nagyon fontos tényező fogja meghatározni a jövőben a szántóföldi termelés hatékonyságát. Az egyik a „klimatikus változásokhoz való alkalmazkodás szintje” (Birkás, 2011). A másik fontos tényező viszont, amivel ez a kutatás is foglalkozik, a folyamatos megfigyelésen és információszerzésen alapul, ami az elmúlt évtizedekhez képest már sokkal könnyebben bárki számára elérhető. Ez a távérzékelésen alapuló precíziós gazdálkodás, mely ma már nem csak elméletben, de a gyakorlatban is egyre nagyobb szerepet kap az agráriumban (Molnár és Somogyi, 2019). Gondoljunk csak a mezőgazdasági felvételező vagy kijuttató drónokra, mely utóbbiak amióta 2019-ben bekerültek a köztudatba, olyan szintű fejlődésen mentek keresztül, mint a számítógépek az első 4. generációs gépek (20.század vége) óta. Manapság, a mesterséges intelligencia korszakában már egy műhold vagy drón felvétel, annak feldolgozását követően olyan információkkal láthatja el a gazdákat, az éppen most vagy akár a múltban termesztett növényállománnyal kapcsolatban, amikre csak kíváncsi lehet.

2 CÉLKITŰZÉS

Kutatásom során, Pest megyében egy Aszód környékén található napraforgó táblát vizsgáltunk (mely a világ 2. legfontosabb olajnövénye), távérzékelés során gyűjtött adatok és terepi mérések alapján. A távérzékelés, és a kutatás alapja a növényi reflektancián alapszik, miszerint a növények a különböző hullámhosszon érkező sugarakat állapotuktól függően máshogyan nyelik el (hasznosítják) és a számukra felesleges sugarakat máshogyan verik vissza (reflektálják), akkor ebből következik, hogy ezt a folyamatot lehetséges egy multispektrális érzékelővel érzékelni és mérni (Pénzes et al., 2011). Más szóval, képesek vagyunk többek között egy adott terület fotoszintetikus aktivitását is mérni, és olyan összehasonlításokat végezni, melyből a növényállomány működési állapotát, esetleges stresszeltségét becsülhetjük még az előtt, hogy annak tünetei szemmel láthatóak lennének (Nomura és Mitchard, 2018).

Ezzel a munkával szeretnék rávilágítani, hogy mennyire hasznos információkhoz juthatunk hozzá a távérzékelés lehetőségével, hiszen ezek az információk segítenek megismerni saját tábláinkat: megfigyelhetjük, hogy hol vannak stresszelt területek, esetleg fertőzési gócpontok, (mely egy konkrét foltkezelés lehetőségét is felveti, ezáltal is minimálisra csökkentve a környezetterhelést) és egy átlátható képet kapunk arról, hogy az éppen termesztett növénykultúra fejlődése és állapota mennyire egységes, homogén. Továbbá hozzájárulhat egy pontos tápanyag kijuttatási terv elkészítésében, illetve egy kezelés vagy valamilyen beavatkozás után is megállapíthatjuk, hogy valóban hatékony volt-e a beavatkozás. A kutatásnak különösen nagy szerepe van a mostani kihívó klíma viszonyok gyakorlati hatásának megfigyelésében és az alkalmazkodásban, főleg egy 2022-es extrém súlyos aszályt követően, amikor a napraforgó országos átlag hektárhozama a 2 tonna/hektárt sem érte el.

A vizsgálat során, utána járok, hogy konkrétan milyen mértékben függhetnek össze a műholdas távérzékeléssel nyert adatok, és a felszínen mért növényélettani változók, lehet-e ezeket az összefüggéseket valamilyen módon ábrázolni, és hogy amennyiben van, kimutatható-e ilyen módon a napraforgók stresszeltsége.

3 IRODALMI ÁTTEKINTÉS

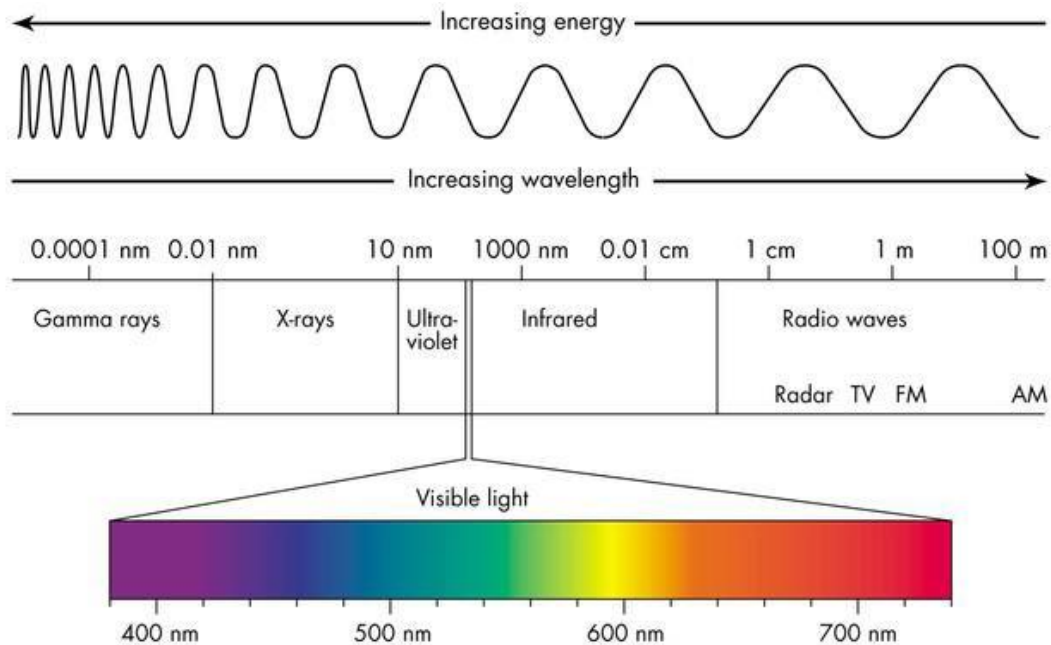
3.1 Mit is jelent a távérzékelés?

Távérzékelés alatt azt a folyamatot értjük, mely során értelmezhető adatokat nyerünk úgy, hogy a vizsgált terület vagy objektum, és a mérőeszköz között semmilyen fizikai kontaktus nem jön létre. Pontosan úgy kell elképzelni, mint az olvasást, mely során a szemünk segítségével érintkezés nélkül olvashatjuk a betűket, mintákat, illetve képeket formálunk a különböző hullámhosszokon érkező és visszaverődő fénysugárzásokból miután értelmeztük azokat. Jelen esetben a szemünk helyét, valamilyen érzékelő szenzor veszi át, ami az elektromágneses hullámoknak a különböző tárgyakról történő visszaverődéseit érzékelve formál pontos képet, adatokat. Az érzékelő szenzorok közül sok, pusztán a felszínről visszaverődő napsugárzást elemzi, de van, ami maga is képes különböző tartományokban sugárzást kibocsátani, és annak visszaverődését méri, ezáltal lehet a szenzorokat passzív és aktív csoportokba sorolni (Tamás és Zoltán, 2019). Ezeket a felvételeket vagy méréseket készíthetik a felszínhez közel, vagy a felszín felett, eltérő magasságokból, akár az ESA (European Space Agency) Sentinel műholdjain keresztül, melyekkel a korábbi műholdakhoz képest nagyobb felbontásban lehet térképeket készíteni (Nomura és Mitchard, 2018). A távérzékelés valamilyen módját, akár elektromágneses sugárzás vagy a hanghullámok érzékeléséről beszélünk, számos szakterületen használják, nagyon fontos szerepet játszik például a nemzetvédelemben és hadiiparban, illetve különböző kutatások során akár a víz alatt szonárok segítségével, ahol a hanghullámok terjedését és visszaverődését érzékelve készítenek pl. óceánfenéki térképeket, de manapság talán egyik legjelentősebb szerepe a precíziós mezőgazdaságban van és lesz.

3.2 A reflektancia spektroszkópia alapjai

A spektroszkópia tárgyalása során, az elsők között érdemes megemlíteni a fotonokat, melyek az elektromágneses sugárzás legkisebb részecskéi. A fotonok különböző, kisebb vagy nagyobb energiájúak lehetnek. Ezen energiaterjedelmek alapján különböztetünk meg hullámhossz tartományokat, melyekben, ahogy a hullámhossz nm-ben csökken, úgy a fotonok frekvenciája és energiája is növekszik, ahogyan azt az 1. ábrán is láthatjuk. Az utóbbi két érték egyenes arányosságára Planck állandója mutat rá, mely az elektromágneses hullámok egy

fotonjának energiáját kapcsolja össze annak a hullámnak frekvenciájával. Ez egy állandó érték, melyet általában h -val jelölnek.



1. ábra: Az elektromágneses spektrum felosztása (forrás: Cyberphysics)

A hullámhossztartományokban, az ultraibolya és az infravörös közötti tartományt az, melyet szemünk érzékelni képes, köznyelven „fény” -nek hívjuk, mely a többi hullámhossz régióval együtt alkotja az elektromágneses spektrumot. Ahogy említésre került, a hullámhossz csökkenésével növekszik a fotonok energiája (Hajdú, 2009.). Élettani példát alkalmazva, egy adott anyagra vagy élőlényre nézve rendkívül káros lehet a nagyenergiájú sugárzás, például a röntgensugarak. Ezek az ultraibolya alatti hullámhossz tartományba eső sugarak rendkívül kicsik, de annál nagyobb fotonenergiával rendelkeznek. Ez az energiaszint (körülbelül 0,1 KeV-1 MeV) már ionizáló sugárzás, ami élettanilag veszélyes lehet, ugyanis a fotonok megszakíthatják a kémiai kötések, kiűthetik az elektronokat az atomokból amennyiben az energiájuk nagyobb az elektronénál, ezzel ionizálva azt. Azonban ne feledkezzünk meg a NIR-ről sem, vagyis a közeli infravörös (800-2500 nm) szakaszcól mely a látható tartományon belüli vörös színt követi az elektromágneses spektrumban. Tudjuk, hogy ezeknek a sugaraknak a hullámhossza nagyobb, ezért a foton energiája kisebb. Ebből adódóan nincsen ionizáló vagy egyéb káros hatása. A különböző anyagok, a feljük érkező, jelen esetben NIR sugaraknak egy

részét elnyelik, másik részét visszaverik, vagyis reflektálják azokat. Mindenképp érdemes megemlíteni, hogy ez a tartomány amellet, hogy nincs károsító hatása, egy rendkívül széles tartomány, vagyis a reflektanciája vagy abszorpciója nagyon változatos módon történhet a különböző felszínekről, mely könnyen érzékelhető spektrométerrel vagy spektrofotométerrel. Ezek alapján, mivel nem rongálja a környezetünket és jelentős mennyiség érkezik a Napból, a mérése költséghatékony, és pontos, így elsősorban ezeket a sugarakat próbáljuk érzékelni és mérni a távérzékelés során. Az említett visszaverődéseket vizsgáló méréseket hívjuk „reflektancia spektroszkópiai” méréseknek, melyek szerves részét képezik a precíziós mezőgazdaságnak is.

3.3 Távérzékelés a mezőgazdaságban

Már a 20. században megjósolható volt, hogy a technika fejlődése és egyben megfizethetősége lehet a kulcsa egy következő mezőgazdasági reformnak. Ahogy teltek az évek, a mindennapi ember számára is elérhető lett a világháló felfoghatatlan mennyiségű és jelen idejű információinak halmaza, mely különféle alkalmazásokon keresztül, már észrevétlenül is szerepet játszik az életünkben. Legyen szó akár a GPS-nyomkövető használatáról a telefonunkon, vagy annak használatáról mezőgazdasági gépekben, mint alapfunkció, legyen szó traktorokról, permetezőkről vagy kombájnokról. Azonban a távérzékelés útján kapott digitális képek feldolgozása, és számunkra hasznos információvá alakításának témája még nagyban kiaknázatlan terület (Nomura és Mitchard, 2018). A téma kihasználatlanul maradásának lehetséges oka, hogy Magyarországon a KSH adatai alapján az agráriumban dolgozók alig 3-4% rendelkezik felsőfokú, illetve mindössze 7-8% rendelkezik valamilyen középfokú végzettséggel, a fennmaradók gyakorlati tapasztalatra hagyatkoznak. Emellet nem maradhat megemlítetlenül, hogy a gazdáknak alig 6%-a nem múlt még el 35 éves. A képfeldolgozás viszont mindenképp hozzáértést, és a téma felé való nyitottságot igényel. Ma már, egy jó felbontású letölthető műholdkép vagy légifotó alapján is feltérképezhető egy adott terület, illetve a növénykultúrák is könnyen elkülöníthetőek rajtuk, mely adatok ráadásul nélkülözhetetlenek az EU-s területalapú támogatások elnyerésében is.

Általánosságban, a távérzékelést a mezőgazdaságban egy adott földfelszínnek (táblának) a megfigyelésére használják, ahol valamilyen haszonnövény termesztése zajlik, így nyerve számos fontos adatot a növények jóllétéről. A precíziós mezőgazdaság alapköve a precíz adatgyűjtés. Ilyen adatot szolgáltathat még parcellánk talajvizsgálati eredménye, vagy a

területen különböző idő intervallumokban készült drón (nagyobb felbontás), vagy műhold általi (kisebb felbontás) multispektrális felvételek (Gyulai, 2009). A növényeink terebélyességéből is jelentős információkat vonhatunk le, vagyis azt figyelve, hogy mennyire takarják a felszínt. Ennek a borítottságnak a mértéke a növény növekedésével, következő fenológiai fázisába lépésével, változni fog, így ez mérhető. Precízebb mérőeszközök segítségével helyi felszíni mérésekkel párosítva ehhez a borítottsághoz pontos számszerűsített adatot kaphatunk, ilyen lehet pl. a levélfelület index (LAI vagy Leaf Area Index), amely kifejezi, hogy egy négyzetméterre mennyi négyzetméter levélfelület jut. A LAI nagy előnye, hogy nem bonyolult, könnyű vele számolni, és jól jellemzi a növényállomány sűrűségét (Süß et al., 2015).

3.4 A vegetációs indexek (NDVI, EVI) fogalma

A LAI-hoz közel álló másik szintén a precíziós mezőgazdaságban fontos szerepet játszó változó az NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) vagy Normalizált Vegetációs Index. Ez talán a legismertebb eljárás, amit a növényzet jellemzésére használnak. Itt érdemes megemlíteni az NDVI-nak egy továbbfejlesztett, érzékenyebb mutatóját is, az EVI (Enhanced Vegetation Index) -t. Az EVI index az NDVI-hoz képest kicsit jobban tudja szűrni a talaj és a légköri szennyeződések hatásait (Shammi és Meng, 2021). Általában az EVI értékét vagy grafikonját az NDVI indexel együtt használják, majd összehasonlítják, ahogyan azt 2021-ben Mississippiben is csináltak egy kutatás során, ahol 70 nappal a szója vetését követően, 95% pontossággal tudták megbecsülni a termés mennyiségét (Shammi és Meng, 2021).

Ezek az indexek, a látható vörös (RED) és a közeli infravörös (NIR) hullámhosszú fény visszaverődését veszik figyelembe, és pontosabban ezen intenzitások különbségének és összegének hányadosát számolják ki, ahogyan azt majd az erre vonatkozó egyenlet is mutatja (1. egyenlet). Fontosságuknak miéértje azonban abban rejlik, hogy az NDVI és egy adott területet borító növényzet fajlagos klorofill tartalma között korreláció van. A növények leveleiben található klorofill, a fotoszintézis során elnyeli a látható fényenergia nagy részét (400-700 nm) viszont visszaveri a közeli infravörös fényt (700-1100 nm) lényegében egy infravörös tükröt képezve (Eredics A, 2007).

(1.)

$$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$$

Ahol:

NDVI = vegetációs index;

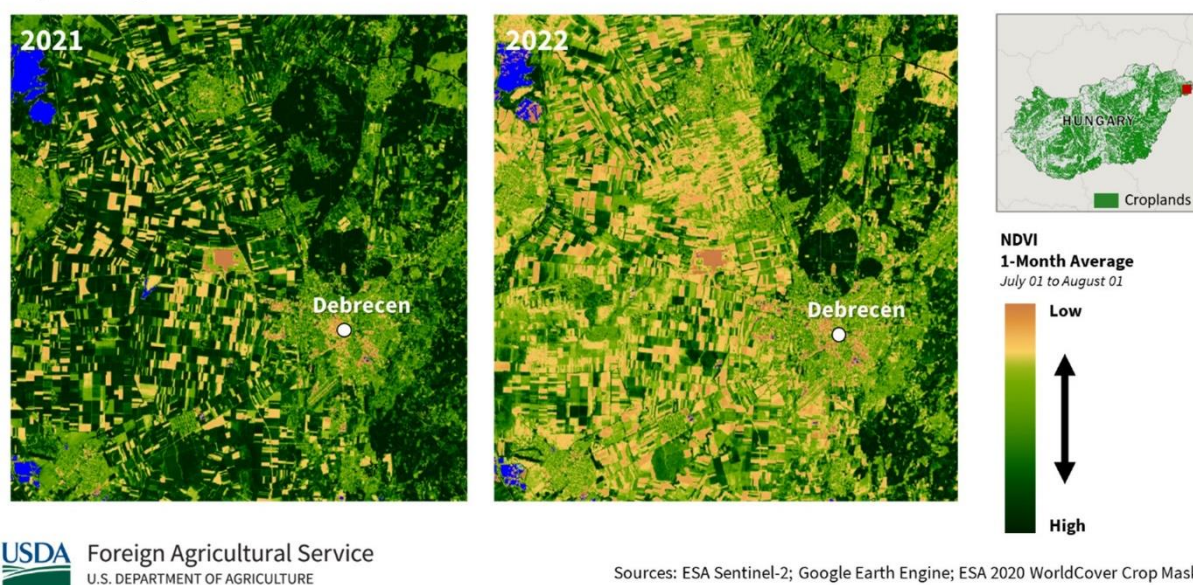
NIR = a visszavert fény intenzitása a közeli infravörös tartományban;

RED = a visszavert fény intenzitása a látható vörös tartományban.

Az említett (1.) egyenlettel leírt vegetációs index végeredménye mindig egy -1 illetve +1 közötti érték, ahol a nullához közelítő értékek mindig a vegetáció hiányára utalnak, a 0,2-0,3 körüli értékek füves, bokros területekre, a 0,7-0,9 értékek pedig sűrű zöld növényzetet jelentenek, mint például trópusi erdők (Eredics, 2007). Ha a mérésekhez műholdon elhelyezett multispektrális szenzorokat használunk, akkor egy megadott mérés alatt álló területről visszaverődő látható vörös, illetve közeli infravörös fény mennyiségét alapul véve, az NDVI egész térképet készíthet a növényzetről, illetve annak fotoszintetikus kapacitásáról.

Hajdú-Bihar, Hungary: NDVI

Summer Crops: Corn and Sunflower production fields
July 01 to August 01, 2021 vs. 2022



2. ábra: Hajdú-Bihar NDVI térképe 2021 és 2022 nyarán (forrás: USDA)

A 2. ábrán a két képet összehasonlítva, egyértelmű, hogy mekkora különbséget és egyúttal mekkora károkat okozott a 2022-es aszály.

A különböző időközönként készített térképek összehasonlításából tehát következtethetünk eltérésekre, változásokra (Shi et al., 2023). Általában, ha a terület reflektanciája lényegesen nagyobb a közeli infravörös tartományban, mint a látható vörösben, akkor a terület növényzete feltételezhetően dúsabb. Ha ez a különbség viszont kisebb, akkor ott valószínűleg ritkább a növényzet. Nem véletlen, hogy a precíziós mezőgazdaságban is kulcsszerepe van ennek a

technológiának, hiszen a növények egészségének folyamatos figyelésével elejét vehetjük bármilyen kártevő vagy stressz okozta komolyabb károknak.

3.5 Műholdak és a felszín feletti képalkotás

A műholdak olyan mesterséges eszközök, melyek egy adott Föld körüli pályára lettek állítva, és ott keringenek. Leginkább információszerezésre, illetve távközlésre szolgálnak akár tudományos, vagy katonai célból. Ezek a földmegfigyelő műholdak (pl. SHIYAN-5, IPEX, Sentinel-1-2) óriási szerepet játszanak a távérzékelésben a felszínről készített felvételeiknek köszönhetően.

Mezőgazdasági célokra tökéletesen alkalmasak az Európai Kopernikusz program Sentinel-2 műholdjának nagyfelbontású multispektrális űrfelvételei, melyek ingyenesen elérhetőek, 2-3 naponta frissülnek az egész Föld területére vetítve (Papp, 2019), és éppen az a céljuk, hogy az európai országok folyamatos hiteles adatokhoz jussanak a földfelszín változásairól, tengerekről, légkörről és az egyre aktuálisabb éghajlatváltozás hatásairól. A Sentinel-2 multispektrális felvételeket készít. Ez azt jelenti, hogy a műhold több kamerával, különböző hullámhossz-tartományokban készít felvételeket, nem csupán az emberi szem számára látható tartományokban, mint az RGB (red, green, blue) hanem a látható tartományon kívül eső közeli infravörös (NIR) és hosszabb hullámhosszok elektromágneses hullámait is rögzíti. A Sentinel-2 Multispektrális szenzora (MSI) 13 spektrumsávban képes képeket készíteni. Az 1. táblázatban látható, hogy a legrészletesebb képeket a kék (B2), a zöld (B3), a piros (B4), a NIR (B8) sávokban készítik. Ennek a négy régióknak a felbontása 10 méter, vagyis a képen 1 pixel, a talajfelszínen 100 négyzetméter (Nomura és Mitchard, 2018).

Name	Resolution	Wavelength	Description
B1	60 m	443.9 nm (S2A)/442.3 nm (S2B)	Aerosols
B2	10 m	496.6 nm (S2A)/492.1 nm (S2B)	Blue
B3	10 m	560 nm (S2A)/559 nm (S2B)	Green
B4	10 m	664.5 nm (S2A)/665 nm (S2B)	Red
B5	20 m	703.9 nm (S2A)/703.8 nm (S2B)	Red Edge 1
B6	20 m	740.2 nm (S2A)/739.1 nm (S2B)	Red Edge 2
B7	20 m	782.5 nm (S2A)/779.7 nm (S2B)	Red Edge 3
B8	10 m	835.1 nm (S2A)/833 nm (S2B)	NIR
B8a	20 m	864.8 nm (S2A)/864 nm (S2B)	Red Edge 4
B9	60 m	945 nm (S2A)/943.2 nm (S2B)	Water vapor

B10	60 m	1373.5 nm (S2A)/1376.9 nm (S2B)	Cirrus
B11	20 m	1613.7 nm (S2A)/1610.4 nm (S2B)	SWIR 1
B12	20 m	2202.4 nm (S2A)/2185.7 nm (S2B)	SWIR 2

1. táblázat: A Sentinel-2 spektrumsávjai. (Nomura és Mitchard, 2018)

A gyakorlatban, a Sentinel-2 képek elemzése során így számos információt kaphatunk növényeinkről, növekedésükről, fotoszintézisük működéséről. Legjelentősebb szerepe többek között a feleslegesen kijuttatott tápanyag csökkentésében, a táblákon belüli különbségek csökkentésében, valamint a növényvédelemben van, hiszen ezáltal már akkor észlelhetők a tápanyaghiány/növénybetegségek jelei, mielőtt azt szemünk észlelni tudná, ugyanis a felvételeken, a kevésbé egészséges növényi részek, azok reflexiójának lecsökkenése miatt, halványabb színűek lesznek. Sajnos a károsodás oka még nem feltétlen derül ki egy képről, ennek felfedezését általában egy terepi vizsgálat követi.

Azonban jogosan gondolhatunk bele, hogy tényleg elég-e nekünk, használható-e egy olyan felbontású térkép, ami hogyha ráközelítünk a saját kijelölt parcellánkra, pixele 100 négyzetméternyi területet fed le. A válasz, igen! Hiszen még így is egy jó betekintést kapunk saját növényállományaink térbeli jellemzőiről, mivel a pixelek színárnyalatai jól elkülönülnek egymástól (sötétebb/világosabb), és pontosan tükrözik a valóságot. Azonban ne felejtsük el, hogy ezek a képek egészen az űrből készülnek és bárki számára ingyenesen elérhetőek.

Amennyiben viszont nem elégszünk meg az ingyenes gyengébb felbontású adatokkal, érdemes lehet drónban (vagyis pilóta nélküli légi jármű), dróntechnológiában gondolkodni, mely ágazat 2019 óta rendkívüli iramban fejlődik Magyarországon, az ekkor megszületett egységes uniós „drón szabályozásnak” köszönhetően. Egyre több szolgáltatás érhető el akár felszíni multispektrális térképezésre, ahol centiméteres pontossággal készítenek nem csak felszíni, de a domborzat lekövetésével pontos, 3D-s térképeket is a drónokra szerelt különböző kamerák segítségével, legyen a terület szántóföld, szőlő, gyümölcsös vagy bármi egyéb. Ezáltal lehetőség van egész termőképeségi térképek, illetve tápanyagkijuttatási tervek készítésére is bármilyen taposási kár elkerülésével (Dr. habil. Vértessy, 2023). Tudni érdemes, hogy maga a mezőgazdasági drónhasználat egy rohamosan fejlődő, de szigorú feltételek mellett működő ágazat, melyhez évről évre jönnek ki új jogszabályok, változások, engedélyezések.

3.6 A napraforgó származása, jelentősége

A napraforgó Észak-Amerika nyugati részéről, illetve Mexikó és Peru területekről származik, ahol már az őslakosok is termesztették, bár ekkor még nem kifejezetten az olajtartalma miatt. DNS-szekvencia vizsgálatok alapján feltételezhető, hogy már a Krisztus előtti évezredekben is termesztették. Fő termesztő országok: Ukrajna, Argentína, India, Oroszország, Kína. Európában legjelentősebb termesztők: Franciaország, Románia, Spanyolország, illetve Magyarország (Varga, 2019). A növényt, eleinte csak dísnövényként tartották, és csak a 18. században kezdték el olaja miatt termesztetni. Mára pedig a legfontosabb, és legnagyobb területen termesztett olajnövényünk, ezért rendkívül fontos szerepe van a hazai növényolaj előállításban. A KSH adatai alapján 2022-ben mintegy 700 ezer hektáron termesztették, legnagyobb részét, mintegy 14%-át Jász-Nagykun-Szolnok vármegyében. Elsősorban a jó minőségű napraforgóétoaj miatt (Adeleke és Babalola, 2020) termesztik, mely nagy energiatartalmú, telítetlen zsírsavakban gazdag. Termésének olajtartalma 35-54% de olajáért nemesített hibrideknél ez a szám magasabb, akár 65% is lehet. Nemesítése során azonban nem csak az olajtartalom növelése az egyetlen célkitűzés, nagy hangsúlyt kap többek között a kórokozókkal szembeni rezisztencia, illetve a stressztűrés is. A napraforgó, az olajon kívül fontos alapanyaga még különböző szappanoknak, illetve a margarinnak, arról nem is beszélve, hogy magas fehérjetartalma miatt kaszat termését (ha épp nem olajat készítenek belőle) és a visszamaradó zöldtömegét állati takarmánnyként is hasznosítják. Népszerű növény, korábban kifejezetten az igénytelen növényekhez sorolták. A különböző fajtahibridek elterjedése és a gépek elterjedésével, ahogy azt már írtam, jelenleg a napraforgó az egyik legfontosabb termesztett növényünk.

3.6.1 A napraforgó rendszertana

A napraforgó (*Helianthus annuus*) jelenlegi hivatalos rendszertani besorolását alapul véve, a zárvatermők (Angiospermatophyta) törzs kétszikű (Dicotyledonopsida) osztályának fészkesvirágzatúak (Asterales) rendjéhez tartozik, és még ezen belül az Asteraceae család Asteroideae alcsaládján belüli *Helianthus* nemzetség tagjaként tartják számon. Több faj tartozik még ide, de mind közül a legfontosabb a *Helianthus annuus* L., vagyis a napraforgó (Varga, 2019)

3.6.2 A napraforgó morfológiája

A napraforgót egyéves növényként tartjuk számon. Lágyszárú növény, természetesen szempontjából, az el nem ágazó hajtású, nagy fészkesvirágzatú fajták előnyösek. Gyökérzete főgyökér rendszer, mely viszonylag mélyen, 2-3 méter mélyre is lehatolhat a talajban, de emellett dúsan elágazó oldalgyökér rendszerét sem kell féltetni, mely szabályosan átszövi a talaj felső részét, és a növény élete során folyamatosan terebélyesedik. Kevesebb csapadék esetén gyökere a megszokottnál is mélyebben ágazik el, így kibírja a szárazabb időszakokat is. Szára szőrözött, elfásodó dudvaszár, melynek hossza fajtafüggő, általában a tenyészidő hosszával arányos. Termesztésben általában a közepes magasságú, könnyen elérhető másfél méter körüli fajták az elterjedtek (Varga, 2019). Levelei végig a száron megtalálhatók, általában hosszú nyelűek, szív alakúak és csúcsban végződőek. Az első 3 levélpár átellenesen helyezkedik el, a többi rendszertelenül szórtnan, de természetesen a levelek alakulása az emberi, illetve környezeti ráhatástól, betegségtől (pl: plasmopara halstedii okozta törpeség) valamint a fajtától is függhet. A napraforgó virágzata egy tányérhoz hasonló összetett fészkes virágzat, mely a tányér belseje felé haladva akár ezernél is több egyszerű virágból áll, melyek kétfélék lehetnek: Nyelvesek, melyek a tányér szélén helyezkednek el, illetve csövesek melyek a tányér belsőbb részében találhatóak (Varga, 2019). A virágzás folyamata a tányér külső részeitől halad folyamatosan befelé. Elsősorban rovarbeporzású növényről beszélünk (idegentermékenyülő), ezért fontos lehet a mézelő méhek bevonása. Termése a fészkesvirágzatúakra jellemző kaszattermés, de termesztési szempontból 2 nagyobb csoportot különítettünk el, melyeknél a további fajtanemesítések is más-más szempontot tartanak előtérben (például olajnapraforgónál magasabb olajtartalom). Ezek a közvetlenül fogyasztható, lényegesen nagyobb méretű és vastag fehér csíkozottságukról is felismerhető csemege napraforgó szemek, valamint a magas (félig száradó) olaj, olajsav/linolsav tartalmú, kisebb, feketén és sötétszürkén csíkozott, ipari célokra tökéletes magvak.

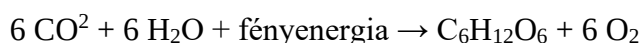
3.7 A fotoszintézis

A kutatás során több mérés hivatkozik rá, így mindenképpen érdemes foglalkozni néhányval a növény lényeges élettani funkciói közül, mint a fényabszorpció, fotoszintézis, illetve növényi pigmentek szerepe. Kezdve a fotoszintézissel, mely alatt olyan folyamatok összességét értjük, mely során a látható (400-700 nanométer hullámhossz tartomány közötti) tartományon belüli fényenergia kémiai energiává alakul át, és ezt az energiát, szén-dioxidot, vizet és ásványi

anyagokat felhasználva, a növény előállítja saját szerves anyagait. Ezért hívjuk a növényeket, autotróf szervezeteknek. Így erre visszavezethetően a földi világ összes élőlényének ez a folyamat állítja elő az életben maradás feltételeit (Tuba és Csintalan 2009). Összefoglalva, a fotoszintetizáló növények, a Nap sugárzását felhasználva szervetlen anyagokból szénhidrátot állítanak elő, a folyamat melléktermékeként pedig oxigén szabadul fel (Dr. Bratek et al., 2013).

Egyenlete:

(2.)



3.7.1 A kloroplasztisz

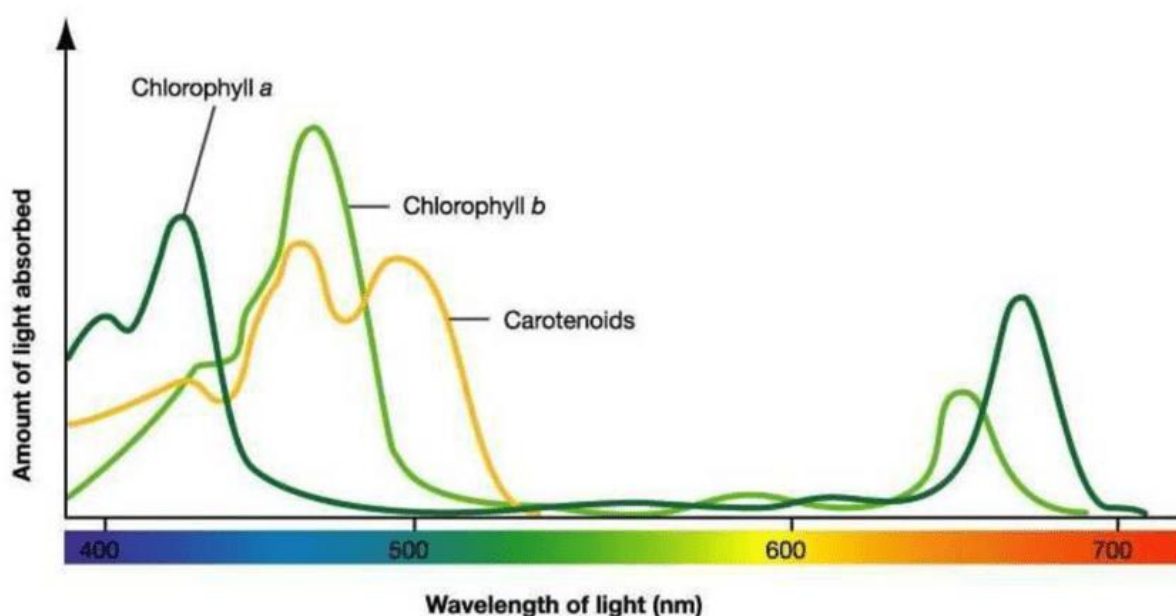
A magasabb rendű növényekben a fotoszintézis elsősorban a mezofillumban vagyis a levélszíni, illetve annak fonáki része közötti tartományban a legaktívabb, mivel itt található a legtöbb kloroplasztisz, melyeken belül az összes folyamat végbemegy. Kloroplasztisznak, a növényi sejtekben található lapított, kettős membrán-rendszerrel ellátott cianobaktérium eredetű (endoszimbiogenezis) sejt szervecskéket nevezzük (Varga, 2019). Ha megnézzük egy ilyen sejtecskének a keresztmetszetét, a belső membránon belül, egyfajta membránrendszert, ún. tilakoid membránokat találunk, melyekben elsősorban a fénymegkötésre és annak kémiai energiává alakítására alkalmas komplexek találhatók. Alkotórésze, más fotoszintetikus pigmentek mellett a növények ikonikus zöld színét is adó klorofill pigment. A belső membrán és a tilakoid közötti teret, vagyis a kloroplasztisz alapállományát, egyfajta folyadék tölti ki, melyet sztrómának nevezünk. Itt játszódik le a fotoszintézis sötét szakasza, vagyis a Calvin-ciklus, mely során már szerves anyag képződik a fényszakaszban eltárolt energia segítségével.

3.7.2 A fotoszintézis színanyagai

Ahogy már említésre került, a fotoszintézis legalapvetőbb folyamata, a fény elnyelődése, melyben a főszerep a fotoszintetikus pigmenteké. Ezek a különböző színanyagok, a kloroplasztisz tilakoidmembránjaiban helyezkednek el, bonyolult szerkezetű proteinekhez kapcsolódva. Magasabb rendű növényekben ezeket a molekulákat két nagy csoportra osztják, klorofilokra (zöld) és karotinoidokra (sárga) (Tuba és Csintalan 2009). A klorofilok szerkezete lényegében négy pirrolgyűrűből álló Mg-dihidroporfirin alapváz, és az azt észterező fitollánc-

ból áll. A magasabb rendű zöld növények kloroplasztiszaiból két nagyobb klorofill-frakció vonható ki. Ezek, a klorofill-a és klorofill-b. A kettő között a fő különbség, hogy a II. pirrolgyűrűjének 3. szénatomjához aldehidcsoport kötődik, és nem metil-csoport. Ebből adódóan van egy kisebb különbség a fény-abszorpciós maximumuk között is, erre a 3. ábra is rámutat. A sárgás színt jelképező karotinoidok, a klorofillokkal szemben lipid molekulák, melyek szintén a legtöbb fotoszintézisre képes szervezetben (nem csak növényben) megtalálhatók. Ezeket a színyanyagokat is két csoportra oszthatjuk, melyek az oxigént nem tartalmazó (szénhidrogén) karotinoidok, illetve az oxigént tartalmazó xantofillok (epoxi- és hidroxi-karotinok). Ezekbe a csoportokba persze több molekula sorolható, fontosabb karotinoidok például a béta, alfa és omega karotinok, illetve a likopin.

Az alábbi 3. ábra x-tengelyén a látható fény tartomány hullámhossz skáláját látjuk. Megfigyelhetjük, hogy a különböző pigment anyagok milyen hullámhosszon, és mekkora hatásfokkal képesek hasznosítani a fényt. Látszik, hogy a klorofillok, nagyon magas hatásfokon képesek megkötni a 400-500 nanométeres (kék) tartományban, (itt el is érik fény-abszorpciós maximumukat) illetve a narancs és vörös tartományokban érkező fényt.



3. ábra. A klorofill-a, klorofill-b és karotinoid pigmentek abszorpciós mutatója
(forrás: Süß et al., 2015)

3.7.3 A fény abszorpciója, és a fotoszintézis fényszakasza

Fényelnyeléskor a folyamatban résztvevő molekula alaphelyzetből gerjesztett helyzetbe kerül, más szóval kisebb energiaszintről egy nagyobb energiaszintű állapotba kerül. Maga a folyamat, különböző komplexekhez kötött klorofill-a alkotta reakcióközpontokban megy végbe, mivel csak ez a molekula tudja végül, a pigmentrendszerekben (PSI, PSII) gerjesztett elektront leadni. A foton abszorpciója során, a pigment molekulának egy elektronja áthelyeződik a megszokott kötőpályájáról egy ún. lazítópályára. A Pauli-féle tilalmi elv szerint, ellentétes spinnel két elektron tartózkodhat minden pályán. Ekkor van a molekula S (szingulett) állapotban. Ez a klorofill-a molekula alapállapota. A foton elnyelést követően, az egyik elektron átkerül egy másik pályára. Ekkor viszont, amennyiben a visszamaradt elektron spinje ugyanúgy ellentétes (antiparalell) a molekula S gerjesztett helyzetbe kerül. Ha viszont azonos spinűvé válik a két elektron, akkor T (triplett) helyzetről beszélünk (Bartha és Lovas, 2004.). A foton által gerjesztett elektron többféle, különböző energiaszintű lazító pályára kerülhet (S1, S2, S3, T1...). A molekula a magasabb és instabilabb gerjesztettségi állapotból (S2, S3), folyamatosan igyekszik egy kisebb és stabilabb állapotba kerülni (S1, S0). Ezt az energia többletet, többek között fénykissugárzással (fluoreszcencia), illetve hőtermeléssel (belső konverzió) adja le. Azonban fontos, hogy az így leadott energia mennyiség, a növény fotoszintézise során csak elenyésző mennyiségben hasznosul (Sipka és Maróti, 2017). A fotoszintézis során a gerjesztett energia csak akkor hasznosul, ha a fotoszintetikus pigmentek kémiai reakcióba lépnek. Ez a fotokémiai reakció az S1 és T1 helyzetekből történhet. A fotoszintézis során az cél, hogy a lazítópályára juttatott elektront, a reakciócentrum klorofill-a molekulája átadja egy, szomszéd környezetben lévő elektronakceptoroknak. Ezt követően, oxidáció során az átadott nagy energiájú elektron helyett, egy szintén szomszédos környezetben lévő elektron donortól, a klorofill-a visszakup egy energiaszegény elektront. Vagyis egyfajta energia befektetés történik.

A fotoszintézist, mint élettani folyamatot 3 különböző szakaszra bontjuk. Fényszakaszra, szénredukciós vagy sötét szakaszra, valamint diffúziós folyamatok szakaszára. A fényszakaszban (mely a nevét is arról kapta, hogy csak fény jelenlétében megy végbe), történik a tilakoid membránon belül, a már részletezett fény abszorpciója. A fényszakasz során, a fotonok által gerjesztett energiadús elektron, a különböző molekulakomplexek (pl: citokróm) alkotta elektrontranszportlánc segítségével fog eljutni az egyik fotorendszerből (PSII) a másik fotorendszeren (PSI) keresztül, a membránban lévő végső elektron akceptorhoz, mely majd a NADPH-t is képezni fogja. A folyamat közben, a PSII pigmentrendszer reakciócentrumában kialakult elektronhiányt, a PSII vízbontással, pontosabban a hidrogéneken lévő elektronok

elcsatolásával fogja pótolni, míg a pozitív töltésű hidrogén ionok a tilakoid lumenébe (belsejébe) kerülnek. $2\text{H}_2\text{O}$ -ból marad vissza egy O_2 mint melléktermék (Varga et al., 2007). Azonban, a lumenben felhalmozott hidrogén ionok miatt, töltéskülönbség jön létre a membrán két oldala között, melyet elektrokémiai potenciálnak hívunk. Ez a feszültség teszi lehetővé az ATP-szintáz enzimnek, hogy „csatornaként” megnyíljon, és kiegyenlítse a két oldal töltését. Ez a kiegyenlítődés járul hozzá, hogy az ATP-szintáz enzim ADP-t és foszforsavat kapcsoljon össze, vagyis ATP (Adenozin-trifoszfát) -t hozzon létre. Ezt hívjuk fotofoszforiláció-nak. Az említett „végső” elektron akceptor, pedig a megkapott elektronokból, a sztrómában lévő NADP^+ molekulákból, valamint a visszaáramló hidrogén ionokból $\text{NADPH} + \text{H}^+$ -t képez (Varga et al., 2007). Ezzel a folyamattal válik a napból érkező fotonok energiája, a növények számára is hasznosítható kémiai energiává ([https1](https://1)).

A fényszakaszon belül termelődő anyagok közül, csak az ATP, és a $\text{NADPH} + \text{H}^+$ -fog tovább szállítódni és energiát, valamint az utóbbi hidrogént szolgáltatni a következő szakaszban, vagyis a CO_2 beépítésével járó szervesanyag szintézisben, míg a molekuláris oxigént a növények leadják a légkörbe (Tuba és Csintalan 2009).

3.7.4 A fotoszintézis szénredukciós (sötét) szakasza

A fotoszintézis második szakasza, a hiedelemmel ellentétben nem éjszaka megy végbe, viszont a fényszakasszal ellentétben az említett szakaszban lévő folyamatok fénytől függetlenül játszódnak le a sztrómában (nem membránhoz kötött folyamat). A folyamatot hívjuk még Calvin ciklusnak is. A körfolyamat kiinduló vegyülete a Ribulóz-1,5-difoszfát, amely egy 5 szénatomos cukor, melynek az 1. és az 5. szénatomjához egy-egy foszforsav kapcsolódik. A ciklus során a kiinduló vegyület CO_2 beépülésével glicerinsav-foszfáttá (Fixációs szakasz) alakul. Fontos, hogy a légköri szén-dioxid megkötése, a RuBisCO enzim segítségével történik. A következő lépésnél a glicerinsav-foszfát ATP és $\text{NADPH} + \text{H}^+$ felhasználásával glicerinaldehid-foszfáttá redukálódik (redukciós szakasz), ami egyben a szénredukciós szakasz végterméke is, ebből hozza létre a növényi sejt a glükózt, melyet a növény ATP-termelésre, keményítő, illetve cellulóz előállítására használhat (Tuba és Csintalan 2009). Ezt követően, mivel körfolyamatról van szó, a következő cél a kiinduló vegyület (Ribulóz-1,5-difoszfát) kialakítása, mely további ATP felhasználással teljesül (Regenerációs szakasz) ([https1](https://1)). Mivel a Calvin-ciklus végterméke a 3 szénatomos glicerinaldehid-foszfát, ezt a fajta fotoszintézist C_3 -

fotoszintézisnek hívjuk (https2). Összességében 1 molekula glükóz előállításához az alábbi mennyiségekre van szükség:

(3.)

$6 \text{ CO}_2 + 18 \text{ ATP} + 12 \text{ NADPH} + \text{H}^+$ (https3)

3.8 A növényi stressz

Ahogy nekünk embereknek, úgy a növényeknek is van olyan egymástól elkülönülő optimális komfortzónájuk, amelyben hatékonyan tudnak növekedni, termést hozni. Ezt nevezzük ökológiai niche-nek. Azonban a természetben ilyen, a növények számára tökéletes környezeti állapot nagyon ritkán fordul elő és akkor is általában csak rövid ideig. A gyakorlatban, sokkal elterjedtebb, hogy növényeink folyamatosan egy vagy több, a környezetükből adódó kedvezőtlen vagy limitáló tényezővel néznek szembe, melyeket stressztényezőknek hívunk. Ezekre a negatív környezeti tényezőkre reagálva pedig, a növények fejlődése lelassul vagy le is áll.

Stressztényező lényegében bármilyen a növény számára nélkülözhetetlen környezeti tényező hiánya vagy többlete lehet, de megkülönböztetünk abiotikus és biotikus stressztényezőket. Abiotikus stressztényezőkről beszélünk amikor a stresszhatást, a biológiai értelemben nem élő tényezők váltják ki. Ilyen lehet a vízhiány (szárazság), vagy éppen a túl sok víz jelenléte, a növény számára nem ideális túl magas vagy túl alacsony hőmérséklet, a túlzottan napsütötte vagy éppen túl árnyékos területen való elhelyezkedés, oxigén és tápelemek hiánya, vagy éppen a talajból fakadó hátrányos tényezők, mint például a sófelhalmozódás. Biotikus tényezők közé pedig a más élő szervezetek okozta negatív hatásokat soroljuk, mint például, amikor több azonos ökológiai igényű (niche-ű) növény verseng ugyanazokért a körülményekért (napfény, víz, tápelemek stb.), illetve ide soroljuk a növényi kártevőket és kórokozókat is (Tuba és Csintalan 2009).

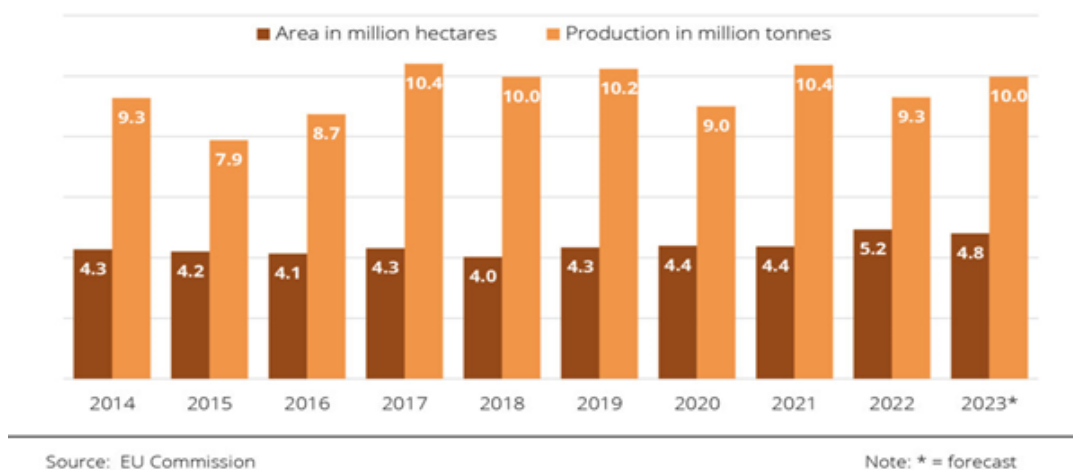
Napjainkban a legjelentősebb stressztényező, ami a legnagyobb problémát is okozza szerte a világban, az a szárazságstressz. Ennek a stressztényezőnek a jelenléte már a csírázástól kezdve elősegíti a nem megfelelően homogén állomány kialakítását. Napraforgó esetében is elmondhatjuk, hogy ez a folyamat több szinten történik, mivel a növényben a génexpressziótól kezdve a fiziológiai és biokémiai mutatókig különböző változásokat idéz elő (Shi et al., 2023). Ahogy a szárazságstressz kialakul, a levelek gázcserenyílásai (sztómák) a gyors vízvesztés

elkerülése érdekében hamar bezáródnak, ellehetetlenítve a fotoszintézishez szükséges CO₂ beáramlását (Tuba és Csintalan 2009). Ha ez az állapot huzamosabb ideig fennáll, akkor a növény megjelenésére, fenotípusára is hatással lesz, megkezdődik a leépülés. Nem meglepő, hogy új szántóföldi kultúrnövény fajták nemesítése során - a napraforgóval az élen már elsődleges fontosságú a szárazsággal szembeni tolerancia, ellenállóság, illetve a hatékonyabb tápanyagfelvétel fejlesztése, hiszen ez minden évben nagy mértékben csökkenti a betakarítható termésmennyiséget, még úgy is, hogy a napraforgó alapvetően egy közepesen jó szárazságtűrő növény (Shi et al., 2023). Ez utóbbi állítás szemléltetésére tökéletes példát nyújtanak a 2022-es kifejezetten száraz év statisztikái, melyekből láthatjuk, hogy a szárazság, mint fő tényező mekkora befolyással bír a terméshozamainkra.

Év	Búza	Kukorica	Árpa összesen	Rozs	Zab	Szójabab	Napraforgómag
2021	5 930	6 130	6 370	3 310	3 060	2 520	2 680
2022	4 450	3 410	4 810	2 940	2 270	2 030	1 890
2023	5 630	8 170	5 460	3 340	2 850	..	2 900

4. ábra. A napraforgó termésmennyisége (forrás: KSH)

A fenti ábrán jól látható, hogy 2022-ben, az azt megelőző évhez képest 29%-kal, csaknem harmadával csökkent a betakarított összes termésmennyiség a nagy aszálynak köszönhetően, 1,8 tonnát alig elérő hozamok mellett. Mindezt annak ellenére, hogy az előző évhez képest, 2022-ben 27 ezer hektárral nagyobb területen termesztettek napraforgót. A helyzet hasonlóan alakult szerte Európában, hiszen ahhoz képest, hogy lényegesen nagyobb területen termesztették a növényt, mint az azt megelőző évben, mégis egy erős 1,1 millió tonnás hozamcsökkenés volt megfigyelhető az extrém hőség miatt, amely a felvásárlási árakat is feltornázta.



5. ábra. A napraforgó termesztése Európában (forrás: EU Commission)

A különböző stresszhatások megnyilvánulását már a korábban említett reflektancia spektroszkópia témakörben leírtak szerint követni lehet, hiszen ilyen stresszhatásoknak lehet a következménye a lecsökkent hatékonyságú fotoszintézis, vagy az ezzel együtt járó alacsonyabb fotoszintetikus pigment mennyiség, mely pedig alacsony reflektancia értékhez vezet. Számos kísérletet végeztek már különböző stresszelt növényállományokban, többek között a nemesítők ilyen elkülönített vonalakat hasonlítanak össze az eredmények alapján, és figyelik, hogy az adott stresszfaktorhoz a növény, miképpen próbál alkalmazkodni. Egy tápanyaghiánystresszelt napraforgó a teljes kifejtett méretének csökkenésével és a talajfelszínhez közeli gyökérzetének szélesítésével, illetve meredek oldalirányú gyökerek növesztésével reagál, de a stressz a magasságra, a szár átmérőjére, a biomasszára, klorofill mennyiségre, virágzás idejére, a gyökértömegre és annak területére mind hatással van (Croshaw, 2018). A stresszhatás súlyossága a növény növekedési fázisától, a növény genotípusától, a stressz intenzitásától, és annak hosszától függ(Hazrati et al., 2017) (Laxa et al., 2019).

A műholdak vagy akár drónok által készített képek, ahogyan az a távérzékelésről szóló fejezetben is ki lett fejtve, a stresszhatások detektálásában is nagy segítséget nyújthatnak. Ezt támasztja alá egy erre irányuló kutatás is, melyet 2022-ben végeztek Szerbiában, ahol a szárazságstressz hatásainak és következményeinek számszerűsítését tűzték ki célul, egy új index, a CMS (Crop Moisture Stress) bevezetésével, többek között kukoricában és napraforgóban. A kutatás során, mivel az a szárazságstressz becslésének kulcstényezője, a nyári hónapokban folyamatos megfigyelés alatt tartották a növények nedvességtartalmát, Sentinel-2 től származó adatok és indexek pl: NDMI (normalized difference moisture index) alapján (mely a CMS alapjául szolgál). Az NDMI a közeli infravörös (NIR) és a rövidhullámú infravörös (SWIR) spektrális sávok kombinációjával érzékeli a növényzet nedvességszintjét. A CMS-t 2022-ben sikerrel tesztelték is, egyfajta korai figyelmeztető rendszerként, ami előre jelzi a szárazságstressz hatását és az ezzel járó termés kiesést, esélyt adva arra, hogy ezekre fel lehessen készülni (Filipović et al., 2022).

4 ANYAGOK ÉS MÓDSZEREK

4.1 Szántóföldi mérések

A kutatás során elsősorban szántóföldi mérések kerültek lebonyolításra, melyet 2023 június 29-én Pest vármegyében, Iklad környékén végeztünk egy egybefüggő, az Ikladi Mezőgazdasági Szövetkezet által művelt 18 hektáros napraforgó táblában. A területen egy korábban végzett talajmintavétel alapján elmondhatjuk, hogy a talaj felső 0-15 cm-re a textúra diagram szerint iszapos agyagos vályog, pH-ja pedig 7,5 körüli. A méréseket nem az egész területen, hanem ahogyan az a 6. ábrán is látszik, annak egy sarkában egy 210 x 270 m-es mintaterületen (5 ha) végeztük összesen 78 meghatározott ponton (ezeknek pontos koordinátái az R program segítségével a 6. ábrán jól láthatóak), melyekkel körülbelül a tábla egynegyedét fedtük le.



**6. ábra. A vizsgálati pontok koordinátái (forrás: Copernicus browser, Sentinel-2),
képfelbontás 10 x 10 m, RGB műholdkép**

A pontokat egy cm-pontosságú Stone X GPS segítségével mértük ki, helyüket pedig kis zászlókkal jelöltük. A zászlók többségét egymástól 30 méterre helyeztük ki 7 sort alkotva, és soronként 9 db pozíción, ezzel egy rácsot alkotva. A maradék 15 db pontot pedig véletlenszerű helyeken jelöltük ki a sorok között. A mintavételi elrendezés korábbi térbeli ökofiziológiai vizsgálatokon alapult, ahol a klímaváltozás miatt felborult vagy eltolódott csapadékeloszlást, és annak hatásait vizsgálták többek között talajnedvesség mérésekkel (Fóti et al., 2016). A terepi mérések során (szükséges eszközöket a MATE - Növényélettan és Növényökológia Tanszék biztosította). Minden pozícióban többször ismételt méréseket végeztünk, melynek eredményeit először füzetbe lejegyezve, vagy a mérőeszközből közvetlenül Excel-be konvertáltunk.

4.1.1 Klorofill-tartalom („Zöldesség”) mérése

A levelek klorofill-tartalmának méréséhez egy SPAD-502 (Soil Plant Analysis Development) -nevű klorofill-mérőt használtunk, ahogyan az a 7. ábrán is látható. Maga az eszköz rendkívül egyszerű, mindössze 200 g-os, kompakt és roncsolásmentes mérést tesz lehetővé. A SPAD-502 egy levél klorofill tartalmát a mérőfejből kibocsátott és a levélen keresztül hatoló vörös és infravörös fény erősségéből és abszorpciójából számolja ki (Dobos, 2013). Az eszközzel a kihelyezett 78 ponton növényenként 3 levél klorofill tartalmát mértük meg, majd a 3 adatot lejegyeztük és átlagoltuk. Összesen 78x3 mérést végeztünk.



7. ábra. Klorofill mérése napraforgó táblában SPAD-502-vel

4.1.2 Fotoszintézis és transzspiráció mérése

A fotoszintézis CO_2 felvételének méréséhez egy hordozható infravörös LI-6400-as gázanalizátort (LICOR, USA) és a hozzá tartozó levél kamrát használtunk. A mérés során, a napsugárzás mellett más kiegészítő fényforrást nem használtunk (8. ábra). A terepi mérés során a mérések többsége magas besugárzás mellett ($>1200 \mu\text{mol foton m}^{-2} \text{s}^{-1}$) történt, de az eredmények összehasonlíthatósága érdekében a mért fotoszintézis és transzspiráció értéket a maximum értékre normáltuk.



8. ábra. Fotoszintézis és transzspiráció mérése napraforgó táblában Li-6400-zal

4.1.3 A LAI-mérése

A LAI mint levélfelület index a legelterjedtebb vegetációs indexek közé tartozik, ami megmutatja, hogy mekkora az egységnyi területre vetített levélfelület, vagyis, hogy mekkora felületen képes a növény fotoszintetizálni. Ez az érték világít rá arra, hogy a növényállomány a gyakorlatban mennyire sűrű, egészséges. Méréséhez fényre, lombozatra és a mérő eszközre van szükség, mely ebben az esetben egy Accupar LP-80 ceptométer. Ez egy könnyen hordozható, fotoszintetikusan aktív (vagyis a növény számára hasznosítható 400-700 nm hullámhossz tartományban) sugárzást mérő eszköz, vagyis PAR szenzor. Az eszköz egy külső, állványra rögzített és vízszintesen elhelyezett szenzorral méri a bejövő PAR-t a növényállomány fölött, vagy legalábbis a napfény kitakarása nélkül, illetve egy szenzor-sorozattal a lombozaton átszűrődő PAR-t. Minden mérési pontnál 3 mérést csináltunk, melyeket az eszközön belül átlagoltunk és rögzítettünk későbbi feldolgozásra, így itt is 78 adatunk született.



9. ábra. LAI mérése napraforgó táblában Accupar LP-80 ceptométerrel

4.2 A mérések során használt indexek (NDVI, EVI)

A szántóföldi méréseink nem merültek ki a terepen végzett mérésekben, hanem ezek az adatok összevetésre kerültek a közzé tett Sentinel-2 műhold képeivel. A Copernicus Browser (<https://browser.dataspace.copernicus.eu/>) weboldalán ezek a képek ingyenesen elérhetőek, ugyanarról a területről, a műhold 5 napos visszatérési idővel készít képeket, azonban a felhők jelenléte erősen ronthatja az adott kép használhatóságát. Mivel a műhold képei különböző hullámhosszú sávokban (csatornákon) is megjeleníthetők, így lehetőségünk van azokat vegyíteni, illetve programozó nyelv használatával, az „custom script” fül alatt, komplex indexek képleteit beírni. Egy index használata során, annak képlete alapján, a program maga keveri ki a 12 csatorna közül (1.táblázat) a megfelelő réteget, melyet meg is jelenítve, készít egy a mi esetünkben NDVI vagy EVI képet az adott területről. Mivel ez a két index már számszerűsíti a növények „zöldességét” egy 0 és 1 közötti skálán, ezért ebből már látványos adatok, akár grafikonok is születhetnek az adott állomány jóllétéről egészen a vetéstől az aratásig.

A mérésekhez használt NDVI és EVI alapján hasonlóak, távérzékelésre a legelterjedtebben használt indexek. Míg az NDVI inkább a vörös (660 nm) és közeli infravörös

(860 nm) tartományokban történő pigment elnyelésre épít, az EVI a vörös és infravörös régiók mellett, a kék (450 nm) -et is alapul veszi, így kevésbé lesz érzékeny a talajreflektancia és a légköri szennyeződések torzítására, mely különösen jól jöhet ritkább növényzetnél. Továbbá az NDVI esetében jelentkezhet nagyon dús zöld növényzet figyelésénél úgynevezett „telítődés”, vagyis egy bizonyos ponton túl már az index értéke nem növekszik jelentősen. Ezt a telítődést az EVI index képes minimalizálni, ezzel egy érzékenyebb, pontosabb, felerősített indexként ismerjük(Shammi és Meng, 2021).

4.3 Adatfeldolgozás

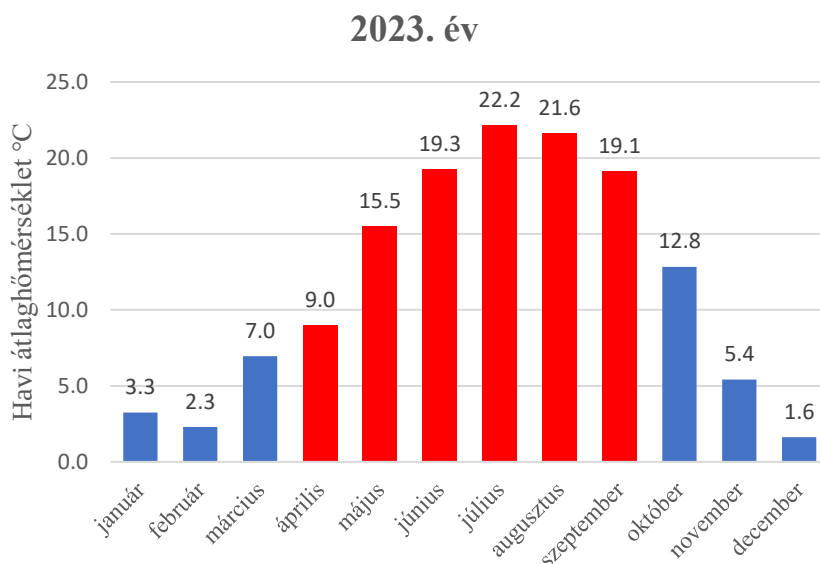
A szántóföldi mérések során rögzített adatokat, és az azokhoz tartozó koordinátákat a későbbiekben történő kiértékelés és feldolgozás érdekében a jegyzetekből és mérőeszközök memóriájából átkonvertáltuk egy összesítő Excel táblázatba. A terepen megvalósult direkt méréseken kívül, a területről készült Sentinel-2 műholdfotókra és a napraforgó különböző fenológiai fázisaiban készített NDVI térképekre is támaszkodunk. Fontos, hogy a képek szépen kivehetőek legyenek, a tábla fölött nem lehet felhős, ezt a fotók letöltése során végzett ellenőrzéssel állapítjuk meg. A képeket a Copernicus Browser weboldáról töltöttük le, és az R programban lettek feldolgozva. Az R program segítségével továbbá különböző növényélettani (LAI, SPAD, PN és háttérváltozói (SWC, ALT) paramétereket ábrázoló stressztérképek készültek, melyek alapján becsülni lehet az állomány egészségére, esetleges stresszeltségére, illetve annak súlyosságára. Az R-en belül, a stressz térképek létrehozásához, illetve magához az adatfeldolgozáshoz, a következő „package” -ekre volt szükség: Raster, rgdal, terra. Az adatokat, koordinátákat illetve az adatok összehasonlításából készült grafikonokat tartalmazó Excel táblázat másik előnye, hogy annak xls formátuma miatt, könnyen hivatkozhat rá is az R program, így valamilyen szinten ezeknek az adatoknak a feldolgozására is ez utóbbi programban lesz lehetőség.

5 EREDMÉNYEK ÉS ÉRTÉKELÉSÜK

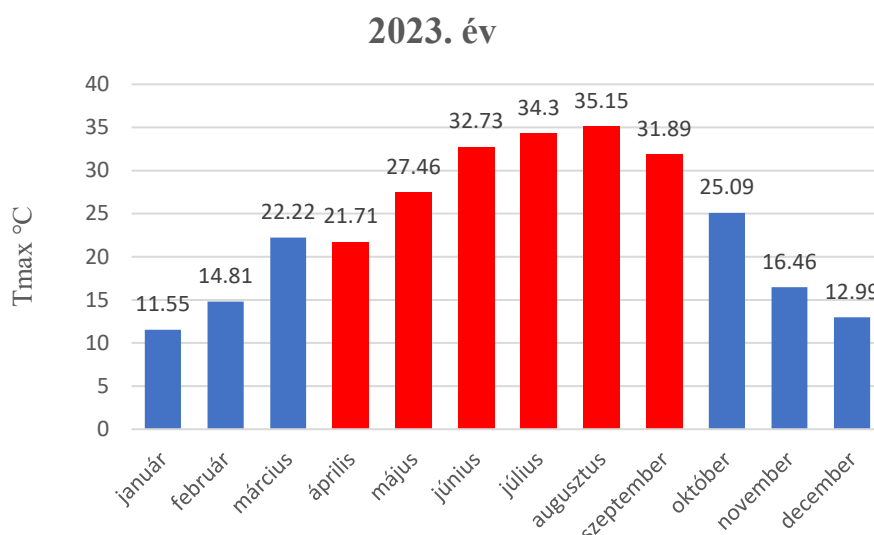
5.1 Meteorológiai adatok elemzése

A terepi méréseink eredményeit, (éppúgy, ahogyan a műholdképeket és az azokból kivehető információkat) meghatározta az adott tenyészidő alatt lejátszódó időjárás. Természetesen a napraforgó, a számára megfelelő időjárási körülmények mellett, például egy tenyészidő alatt 1900-3000 °C hőösszeg (vegetatív stádium elején 15 °C, később a virágzás során pedig 22°C körüli hőmérséklet az ideális), illetve kb 300-500+ mm megfelelő eloszlású csapadékmennyiség megléte mellett fejlődik a legideálisabban (Szántó, 2019). Azonban az időjárás nem mindig alakul ilyen ideálisan, sőt, a klímaváltozás fokozódásával egyre gyakoribbak az időjárási szélsőségek és más hátráltató tényezők jelenléte (kártevők, tápanyaghiány, egyéb talajdegradációs folyamat), melyek jelei nem csak észrevehetőek, de számszerűsíthetőek is.

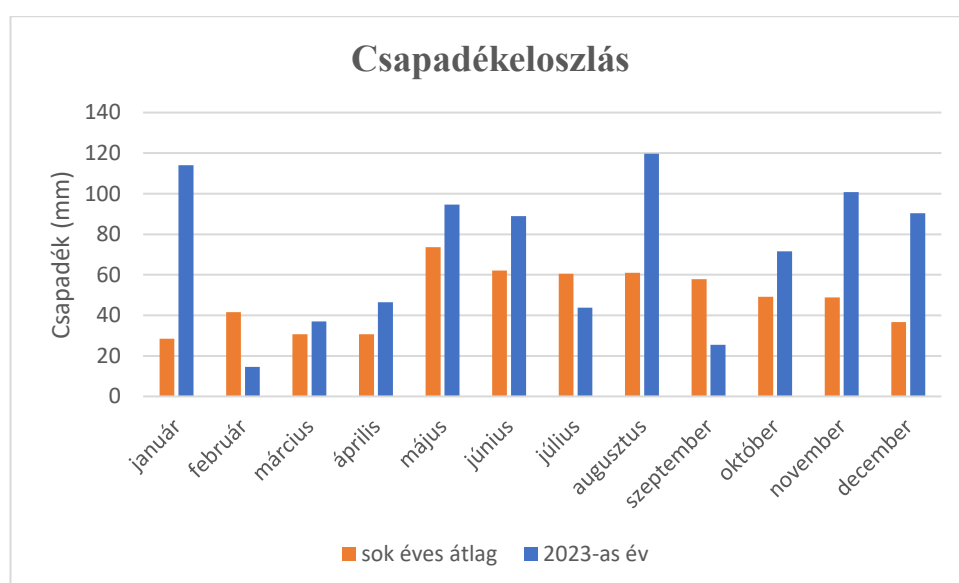
A 10, 11 és 12. ábrákban, a 2023-as év hónapokra bontott átlaghőmérséklete (°C), az adott hónapban mért legmagasabb hőmérséklet (°C), illetve a 2023-as év átlagos csapadékeloszlása (mm) látható, a hónapok közül a pirossal jelöltek fedik le a napraforgó tenyészidejét.



10. ábra. A 2023-as év országos átlaghőmérséklete hónapos leosztásban (forrás: HungaroMet Adattár)



11. ábra. A 2023-as év maximum hőmérsékletei hónapos leosztásban (forrás: HungaroMet Adattár)



12. ábra. Az elmúlt évek (2013-2022) átlagos havi csapadékmennyisége összehasonlítva a 2023-as évvel (forrás: HungaroMet Adattár)

Ahogy az a diagramokon is látszik, a 2023-as év az időjárás alakulása terén egy fellélegzésként hatott a növénytermesztés számára a 2022-es aszályt követően. Bár ebben az évben is volt 35 °C-fok augusztusban, de általánosságban elenyésző volt a 30 °C-fokot jelentősen meghaladó napi maximum hőmérsékletek száma az év során. A meghatározó nyári időszakban, az éjszakai lehűlések mindössze 21 °C körül tartották a havi átlaghőmérsékletet, ami ideális a napraforgó számára, ráadásul az év során, az éves csapadékmennyiség átlagosan 733 mm volt, ami több mint 200 mm különbség a 2022-es év 497 milliméteréhez képest.

Azonban ami a csapadékeloszlást illeti, a júliusban esett csapadékmennyiség így is elmarad a korábbi évektől, pedig ebben az időszakban kiemelt jelentőségű az ideális csapadékmennyiség megléte. Ebbe a júliusi hónapba nyúlik bele a termelés szempontjából meghatározó „tányérkialakítás” időszaka, amikor a növények, a teljes vízigényüknek a 40-45 %-át veszik fel (Borb, 2002). Bár itt fontos megemlíteni, hogy a napraforgó mélyre lenyúló karógyökerének köszönhetően szépen ellenáll a szárazságnak, nem megfelelő csapadékelátottság mellett, a termés hozam mindenképp korlátozódik. A HungaroMet Adattár által közzé tett adatok alapján, augusztus első hetében volt még egy jelentősebb csapadékos időszak mely a grafikonon is feltornázta az augusztusi mutatót, de azt követően újra megindult egy szárazabb időszak, de a növény azon stádiumában, ez már hozzájárult a megfelelő éréshez, szárításhoz és betegségek elkerüléséhez.

Bár ez a 2023-as év az előző évekhez képest egy előnyösebb év volt az időjárás szempontjából, de javuló tendenciával nem párosult. Sajnos továbbra is tény, hogy az időjárási szélsőségek évről évre egyre gyakoribbak (ahogyan azt a 2024-es szárazság is alátámasztja), beleértve az extrém hőmérsékleteket, és az éves csapadékeloszlást, melyek gyors és radikális adaptációt követelnek meg a mezőgazdaságban tevékenykedőktől, beleértve a nyitást újabb kultúrnövények felé.

5.2 A területről készült műholdfotók elemzése

A 13. ábrán, egy NDVI képsorozat látható az adott területről, melyeket a Copernicus Browser weboldalról töltöttünk le. 1 képkocka 10 x 10 m² területet fed le. A képsorozat végig követi a napraforgó állomány fenológiai fázisait, és annak homogenitását egészen 2023 április 22-től szeptember 11-ig, vagyis egészen a vetéstől az aratásig. Az NDVI képek pontosabb rálátást biztosítanak a napraforgók egészségi állapotára, mivel a képek által visszaadott zöldesség, szorosan összefügg a növények klorofilltartalmával, amiből a fotoszintetikus aktivitás hatékonyságára becsülhetünk (Pénzes et al., 2011).



13. ábra. Ikladi napraforgó tábla fejlődése NDVI műholdfelvételeken (forrás: Sentinel-2 műholdfotók, Copernicus Browser)

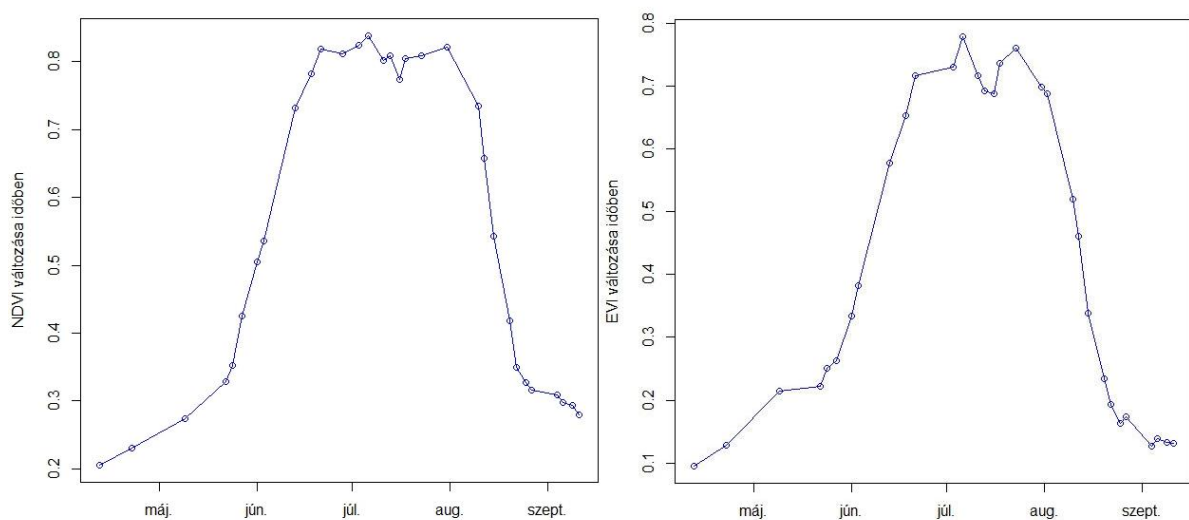
A 13. ábra NDVI felvételein elsősorban a napraforgó állomány fejlődése figyelhető meg, vagyis, hogy az áprilisi 0,2-0,3-as NDVI értékektől hogyan éri el július elejéig a 0,7-0,8-as csúcst, majd augusztusban hogyan zuhan le egészen hirtelen (2 hét alatt) 0,1-0,2-es minimumig. Továbbá megfigyelhető, hogy a májusi és júniusi 95-98 és 90 mm csapadék mennyire indította meg a napraforgó állomány fejlődését.

A 13. ábrán a piros körrel jelölt részen végeztük a terepi méréseket 2023.06.29-én, vagyis a napraforgó állomány akkori állapotához (14.ábra), a képsorozat 5. képe (2023-07-03) áll a legközelebb. Történetesen éppen ekkor volt csúcson a napraforgók NDVI értéke (0,78). A csúcst követően egy rövid szárazság következett, ezt azonban a műholdfelvételeken alig (majd a 15.ábrán, a területről készült részletes NDVI és EVI diagramokon lesz látható) lehet látni. Egy kisebb júliusi esőzésnek köszönhetően a hónap végére újra 0,7-körüli értéket mutatott a műholdfelvétel, ekkor azonban már nem haladta meg a július elején elért csúcst. Az állomány, egészen augusztus első harmadáig tartotta ezt az állapotot, majd egy gyors és erőteljes hanyatlásba indult. A napraforgó állomány a terület deszikálását követően augusztus 27-e után érte el legalacsonyabb NDVI értékét (0,15). A kezelés után, az augusztus végén 1 hét alatt leesett 120 mm csapadék ellenére, a napraforgók homogén módon száradtak ki, felkészülve az aratásra. Az aratás szeptember 10-én történt, így a műholdkép sorozat utolsó két képe között.



14. ábra. Ikladi napraforgó tábla 2023.06.29-én

A megfigyelt területen lévő napraforgóállomány teljes vegetációs időszaka alatt, a Sentinel-2 műhold 31 db használható műholdfotót készített, melyeken a 78 db mérési hely koordinátáinak az értékei lettek alapul véve. A 15. ábrán a 31 átlagolt NDVI és EVI érték elhelyezkedése látható 2 különböző diagramon időrendi sorrendben, április 12-től szeptember 11-ig.

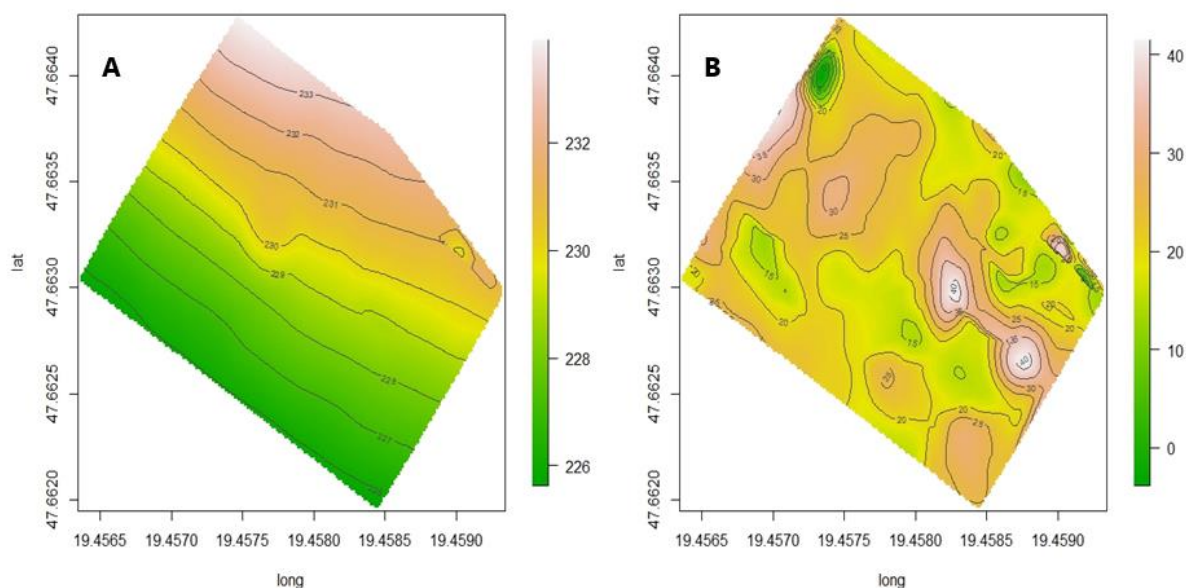


15. ábra. Napraforgó állomány NDVI és EVI változása

A 15. ábrán látható a napraforgó állománynak az NDVI és az EVI indexek segítségével ábrázolt számszerűsített fejlődése. A diagramok segítségével már konkrétan meg lehet mondani, hogy mikor indult hirtelen fejlődésnek az állomány, mikor stagnált, illetve, hogy mikor esett vissza. A két index bár hasonló, megfigyelhető, hogy az EVI jelentősebb kiugrásokat mutat, főleg magasabb értékeknél, mint az NDVI. Ez annak köszönhető, hogy ez utóbbi index, dús növényzetek vizsgálatakor, vagyis magasabb értékeknél ($> 0,7$) már nem érzékel számottevő változásokat, ettől fogva hajlamos „telítődni” (Shammi és Meng, 2021). Ezzel szemben az EVI-t egy továbbfejlesztett, érzékenyebb indexként tartják számon, ami képes megjeleníteni ilyen magas értékeknél is a különbséget. Ilyen eltérés például, a július eleji csúcsot (0,78) követő körülbelül 2 hétig tartó száraz időszak, amit bár a napraforgó jól tűr, mégis feltételezhető, hogy a virágzás mellett ez is hatással lehetett rá, hogy az EVI szerint, ekkor 0,68-ig beesett ez az érték. Továbbá az EVI alacsony értékeknél is nagyobb érzékenységet mutat az NDVI-nál, hiszen a tenyészidőszak kezdetén csírázáskor, majd a végén a deszikálást követően, képes 0,2 alatti értékeket is érzékelni.

5.3 Háttér és élettani változók térbeli heterogenitása

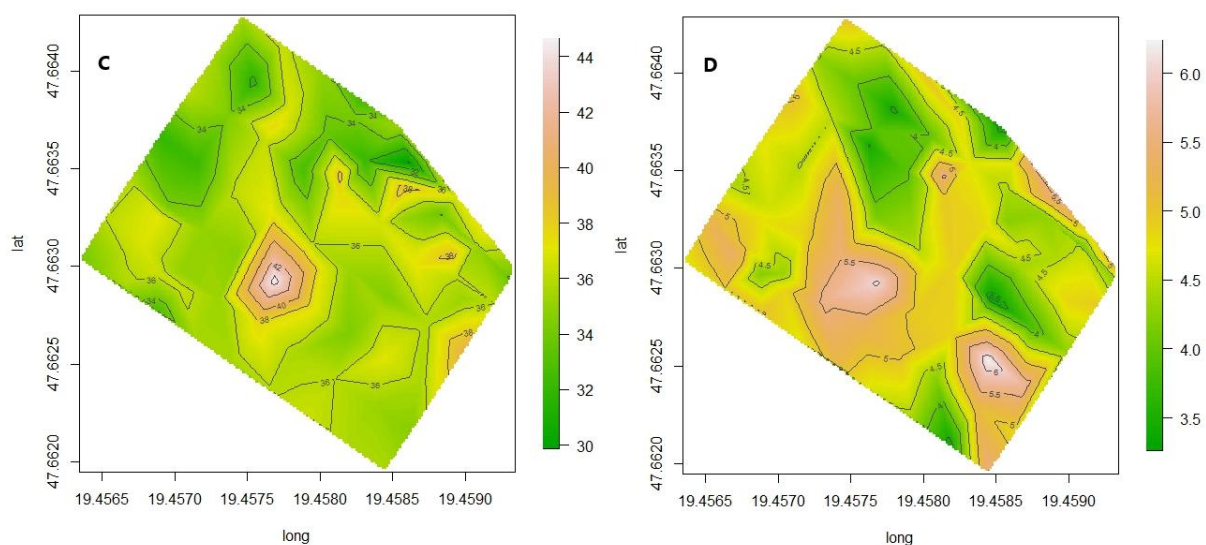
A 2023 június 29-én, terepen mért élettani és környezeti adatokat, valamint a meglévő koordinátákat tartalmazó csv dokumentumot könnyen képes az R-program értelmezni, így ennek segítségével képesek vagyunk környezeti, és élettani változókat megjelenítő térképeket készíteni a tábláról. Ezeken a térképeken, a 78 ponton körülvő hézagokra, a meglévő adatok alapján, az R további adatokat becsül, ezzel letisztult és értelmezhető térképeket előállítva (ahogyan azokat a következő 16. 17. és 19. ábrákon láthatjuk). Ez azt jelenti, hogy a létrehozott térképeken nem 78 mérési pont, hanem lényegesen több, (200×200 x és y koordinátára), becsült érték is generálódik, melyek térképként ábrázolhatók és esetleg robusztusabb összefüggéseket mutathatnak ki a műholdfotók adataival.



16. ábra. Napraforgó tábláról készült domborzati és talajnedvességi viszonyokat ábrázoló ALT (A) és SWC (B) térképek

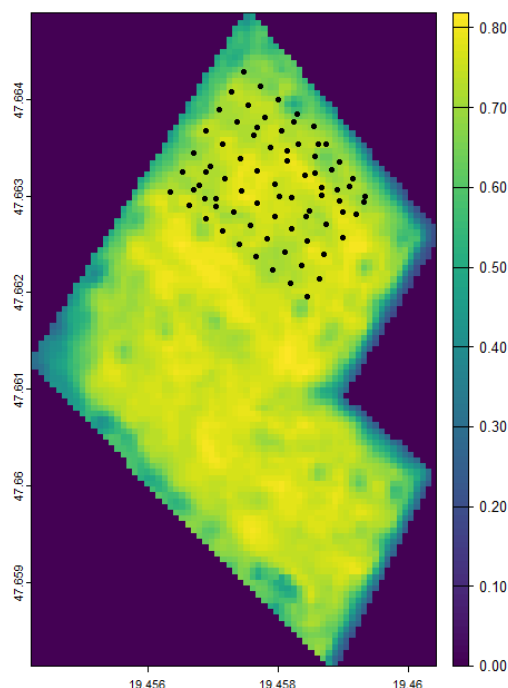
A 16-os ábrán láthatjuk, hogy a mérési terület dél-nyugati irányba leejt, ahol a legmélyebb pont 225 méter, a legmagasabb pedig kicsivel 232 méter felett helyezkedik el. A szintkülönbség összességében 6 méter, ami bizonyos változók (SWC, nettó fotoszintézis stb.) esetében jelentős lehet, mivel, ha megfigyeljük, a talajnedvesség alakulása is függ a leejtés mértékétől, illetve a megfelelően homogénre dolgozott talajfelszíntől (Fóti et al., 2018). Ami a talajfelszín illeti, az SWC (B) térkép szépen ábrázolja a mérési területen található bemélyedéseket, főleg a délkeleti oldalon, melyekben a víz jobban felgyülemlik. Ahogyan az látszik, a terület legnagyobb részén 20-30% körül mozog a talajban található nedvesség térfogatszázaléka, itt érdemes megemlíteni, hogy a mérést megelőzően a területen június 23-án esett jelentősebb (12 mm) mennyiségű csapadék. Azonban vannak olyan foltok, mint az előbb említett is, ahol ez az érték a 40%-ot is eléri, ami feltehetően egy lényegesen tömörödöttebb talajfelszínre utal a tábla többi pontjához képest. Ezzel szemben, a területen található legalacsonyabb talajnedvességi érték a térkép

szerint, az északi sarokban volt, ahol ez az érték 10% alá süllyedt.



17. ábra. Napraforgó tábláról készült SPAD (C) és LAI (D) térképek

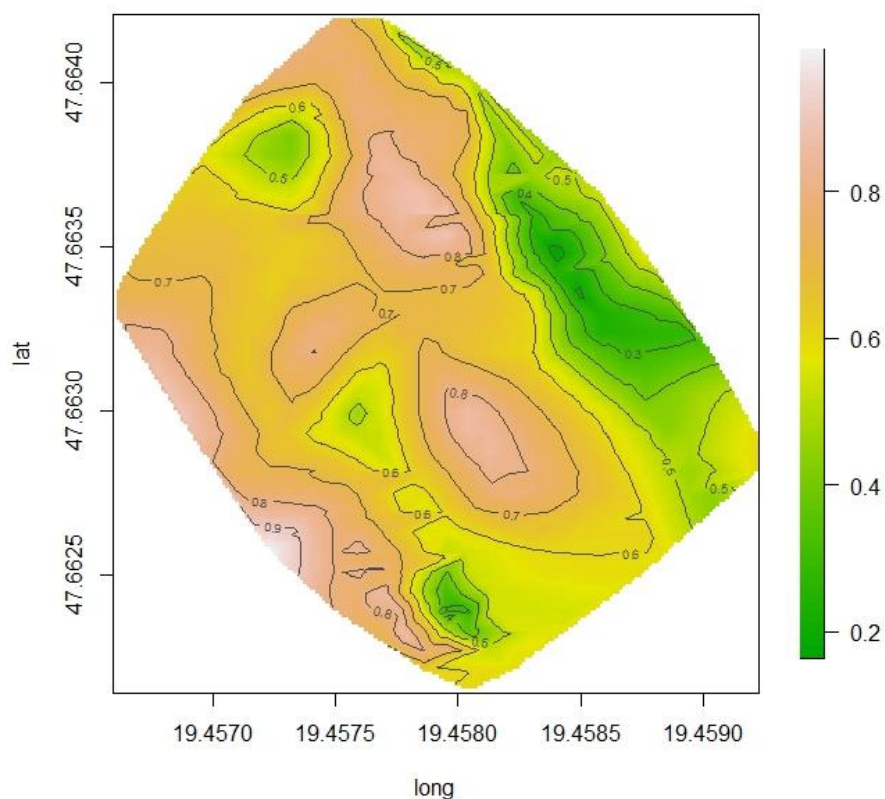
A 17. ábrán a műszerrel mért SPAD és a levélfelület index értékekből készített térképet láthatjuk. A két érték kapcsolata között általában pozitív korreláció van, hiszen a sűrűbb levél állás, a legtöbbször magasabb klorofill tartalommal jár együtt, a két paraméter szorzatából (SPAD*LAI) pedig a m²-re jutó klorofill tartalmat becsülhetünk. Azonban tudatosítani kell, hogy míg a SPAD levélszintű klorofilltartalmat mér, addig a LAI állományszintű levélfelületet, így a két érték közötti összefüggés nem törvényszerű, mégis gyakran hasznos információkkal szolgál különböző növényi stresszkimutatásokhoz (Pepó és Novák, 2016). A 17. ábrán bár nagy különbségeket is látunk, például pontokban előfordulnak a tábla észak-keleti részén magas SPAD (C) értékek (39), míg ugyanazokon a pontokon az átlaghoz képest kicsit alacsonyabb a mért LAI (4,5), a SPAD térkép a LAI térképpel együtt nagyobb egybefüggő értékeket mutat (40-es SPAD és 5-6-os LAI értékek), a tábla alacsonyabban húzódó területein. A magas SPAD érték, egészséges növényzetre utal, míg az alacsony SPAD érték tápanyaghiányra (főleg nitrogén) vagy valamilyen egyéb biotikus vagy abiotikus stresszhelyzetre. Így ez az érték is, egy megbízható indikátora lehet a növény stresszeltségének. Június 29-én a napraforgóban bár voltak foltosabb részek főleg a tábla északi csúcsa körül, de ezeken a kicsit ritkább területeken is voltak kiugróbb SPAD értéket mutató napraforgó egyedek, ami valószínűleg annak köszönhető, hogy a ritkább állományban a növényeknek több lehetősége van terebélyesedni, ráadásul a talajhoz közelebbi levelek is több napfényhez jutnak. A főleg magasabban fekvő, a tábla többi részéhez képest ritkább részeken, amikben a LAI 4 - 4,5-ös értékeket mutatott ki az átlagos 5-höz képest, viszont még mindig dúsnak számít, és a relatív magas SPAD értékek mellett, egy feltehetően stressz mentes növényzetre utal.



18. ábra. A terepi mérések után (2023.07.03) készült EVI térkép a napraforgó tábláról

Még a 13. ábrán volt látható több NDVI felvétel a területről. Ebből a sorozatból, az egyik kép (jobb felső) 2023.07.03-án készült, vagyis 4 nappal a terepi mérést követően. Azonban ekkor, a vegetáció csúcsán lévő dús növényzetnek köszönhetően, ahogyan azt a 15. ábrán is láthatjuk, az index telítődött (0,8-as érték körüli) állapotban volt, ebből adódik, hogy a kisebb különbségeket nem érzékelt elég hatékonyan, és szinte az egész tábla (a sarkokat kivéve) ekkor egy foltmentes, egybefüggő erős zöld színt kapott. A 18. ábrán, az említett időpontban készült műholdképet láthatjuk az EVI megjelenítésben, amin azonban még ilyen állapotban is látszódnak kisebb-nagyobb különbségek a növényállományban. A képen a 78 mérési pont is fel van tüntetve, hogy összevethessük a területről készített térképekkel is. Az EVI térkép szoros kapcsolatot ápol a területről készült LAI adatokkal, így a két térkép hasonlít egymásra, ahol magasabb LAI értéket tapasztaltunk, ott feltehetően a fotoszintézis fényelnyelése is jobb, vagyis az NDVI vagy EVI értékek is magasabbak lesznek (Trépos et al., 2020). Ha ez nem így van, az valószínűleg valamilyen biotikus vagy abiotikus stresszhelyzetre (tápanyaghiány vagy kártevő/kórokozó jelenlétére) utal a növényállományban. Ahogyan a térképeken is látjuk, még egy ilyen homogénnek tűnő állományban is vannak kisebb különbségek. Ebben az esetben az SWC térképből kiindulva láthatjuk, hogy a tábla észak-keleti széléin, illetve a déli részeken lévő foltokért felelős lehet egy lecsökkent talajvíz mennyiség (10% körüli térfogatszázalék). Azonban a tény, hogy a nagyobb levélfelület többet párologtat, megmagyarázza miért csökkent

le a talajvíz mennyisége, de olyan alacsony talajnedvességi érték, ami komolyan korlátozná a növények fejlődését, nem volt.



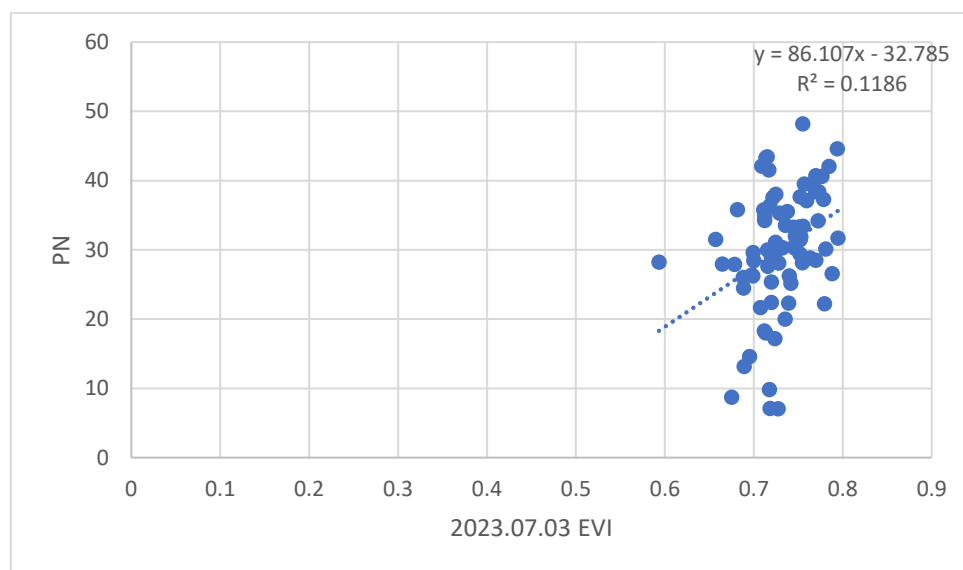
19. ábra. A Napraforgó tábláról készült 0 és 1 közötti skálára normalizált PN * LAI térkép

A 19. ábra, a napraforgó táblának egy adott pontján mért nettó fotoszintézis (vagyis, hogy a növény mennyi szén-dioxidot hasznosít) és a LAI szorzatának értékét (PN * LAI) viszonyítja az összes pont közötti legmagasabb PN * LAI értékhez, így lényegében egy könnyebben értelmezhető térképet kapunk, melyen a PN és a LAI kombináltan jelenik meg egy 0-tól 1-ig terjedő skálán. Ilyen módon a hajtás szintű fotoszintetikus teljesítményt tudtuk megjeleníteni, ahol az 1 a maximum teljesítmény, a 0-hoz közeli értékek pedig jelentősen lecsökkent aktivitást mutatnak. Az ábrán megfigyelhető, hogy főleg azokon a pontokon voltak magas értékek, ahol a talajvíz aránya is magasabb volt a talajban (kivéve azt a lényegesen tömörödöttebb és feltehetően levegőtlenebb csomópontot a tábla keleti oldalán). Ez főleg a mélyebben fekvő területeken volt jellemző (ahol ez az érték $40 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$ -körül mozgott), de 230 méter körül is vannak kiemelkedő értékek, ahol a leejtés mértéke is kisebb volt a táblán. Továbbá hasonlóságok mutatkoznak a 16. ALT (A) és SWC (B) ábrákkal, illetve a 18. ábrán látható EVI képpel, melynek az észak-északkeleti oldalán szintén nagyobb és erősebb foltokat találunk.

Azonban, az észrevétel, hogy a mérések időpontjában a napraforgók fotoszintézise hatékonyabban működött a tábla mélyebben fekvő területein, az NDVI-ban és más növényélettani változók (PN, LAI, Phi PSII, Evap,) értékeiben is megmutatkozik (pl: 21, 22. ábra).

5.4 A mért értékek közötti korrelációk és összefüggések keresése

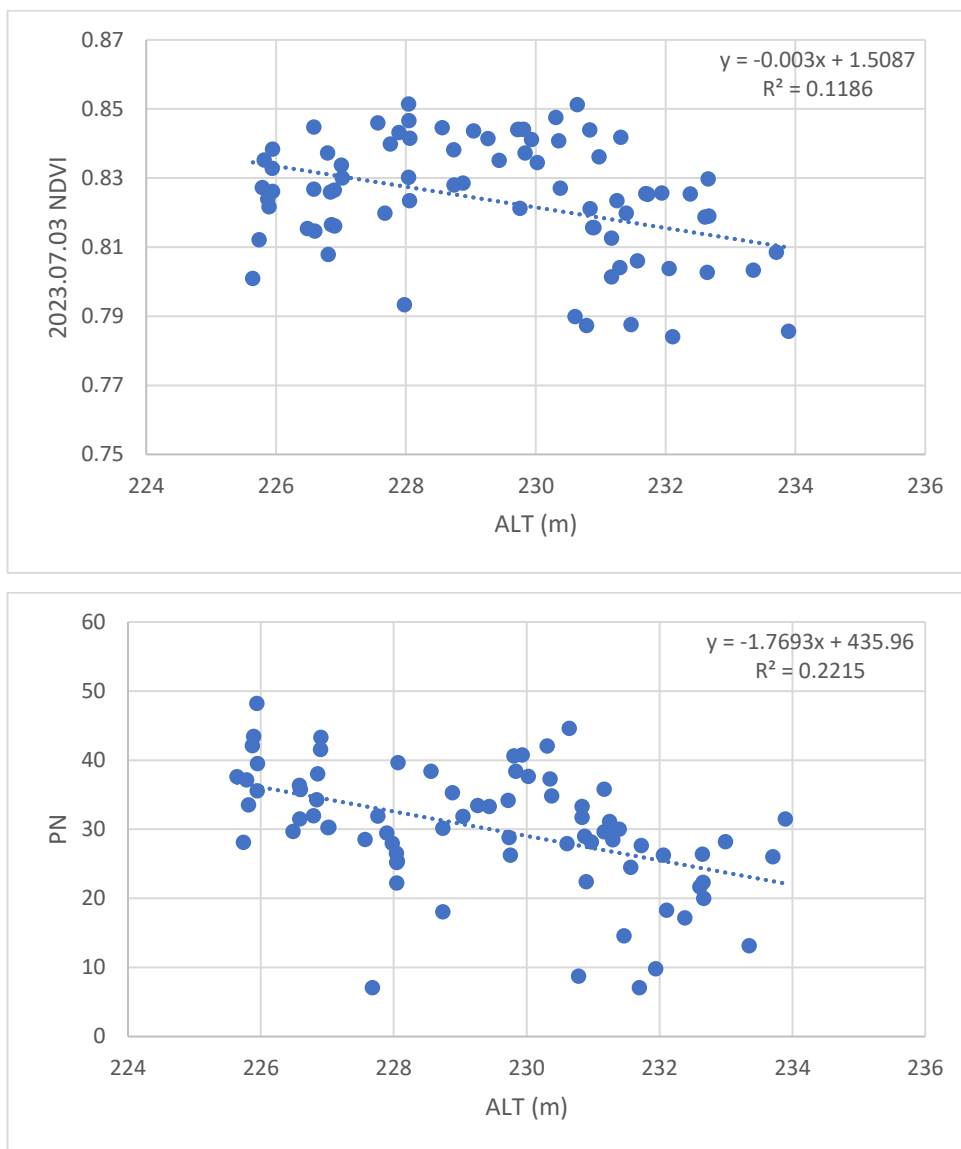
A terepi mérések során kapott növényélettani paramétereket (pl: PN, Evap, SPAD) vagy háttérváltozókat (pl: ALT, SWC) ha összevetjük a műholdas távérzékeléssel nyert adatokkal (pl: NDVI), akkor az értékek között, értékes összefüggéseket figyelhetünk meg. Ezek közül az összefüggések közül, azokat érdemes kiemelni, amelyek determinációs együtthatója (R^2) meghaladja a 0,049729-es értéket, mivel ebben az esetben, 78-as mintaszám mellett, ezek az összefüggések már szignifikánsnak tekinthetők.



20. ábra. Egy műholdas EVI kép értékei és a nettó fotoszintézis közötti kapcsolat

A 20. ábrán, a terepi mérés időpontjához legközelebbi műholdkép (2023.07.03-án készült) EVI értékei és a 2023.06.29-én mért nettó fotoszintézis közötti összefüggés látható. A két tényező között egy kifejezetten jelentős $R^2 = 0.1186$ -os pozitív tendencia áll fent, vagyis, ha az EVI magas értéket vetít egy konkrét mérési pontra, úgy a nettó fotoszintézis hatékonysága is jelentős értéket fog képviselni azon ponton. A két tényező függ egymástól, vagyis, ha a fotoszintézis a terület egy részén magas hatásfokkal működik, feltételezhető, hogy az ott lévő növények egészségesek, a fényelnyelő pigmentjeik száma pedig jelentős, vagyis az NDVI is

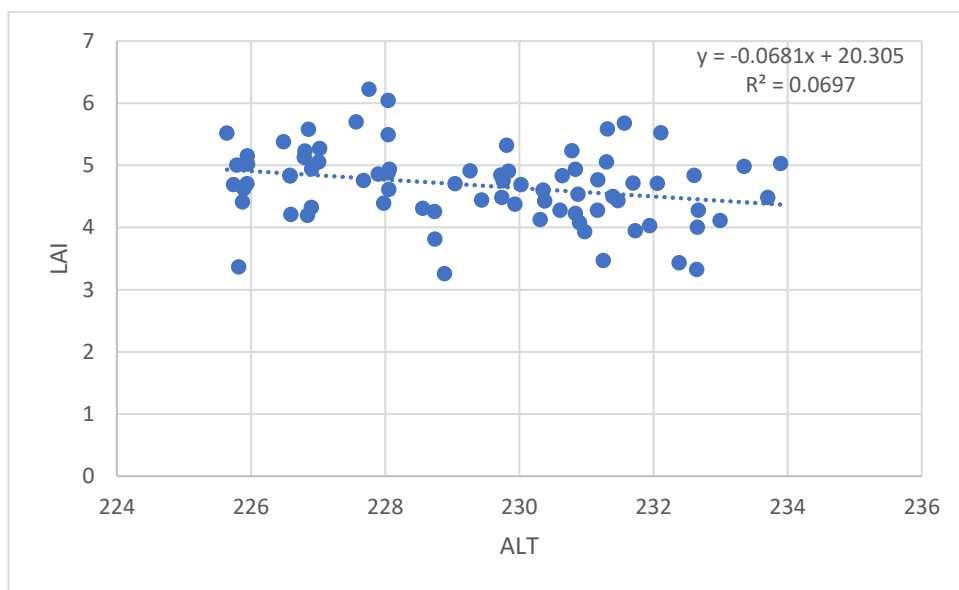
magasabb értéket fog ott mutatni. Egy további, a fotoszintézis működését jellemző növényélettani változó, a Phi PSII. Ez a paraméter szintén a fotoszintézis hatékonyságára utal, pontosabban fogalmazva a nettó fotoszintézis és a Phi PSII között nagyon erős összefüggés van, ami abból ered, hogy ez utóbbi, a pigmentrendszer fénymegkötésének és az elektrontranszportláncnak a hatékonyságát méri (fotoszintézis 1. lépése). A Phi PSII és a 2023.07.03-as NDVI adatok között $R^2 = 0.0853$ -as összefüggést mértünk.



21-22. ábra. Egy műholdas NDVI kép értékei és a nettó fotoszintézis kapcsolata az ALT háttérváltozóval

A 21-22. ábrán a 20. ábrán is ábrázolt NDVI értékek, illetve a nettó fotoszintézis vannak összevetve a terület vízszintfölötti magasságával, és a közöttük található összefüggés van ábrázolva. A mérési területen egy már jelentősnek mondható körülbelül 8 méteres

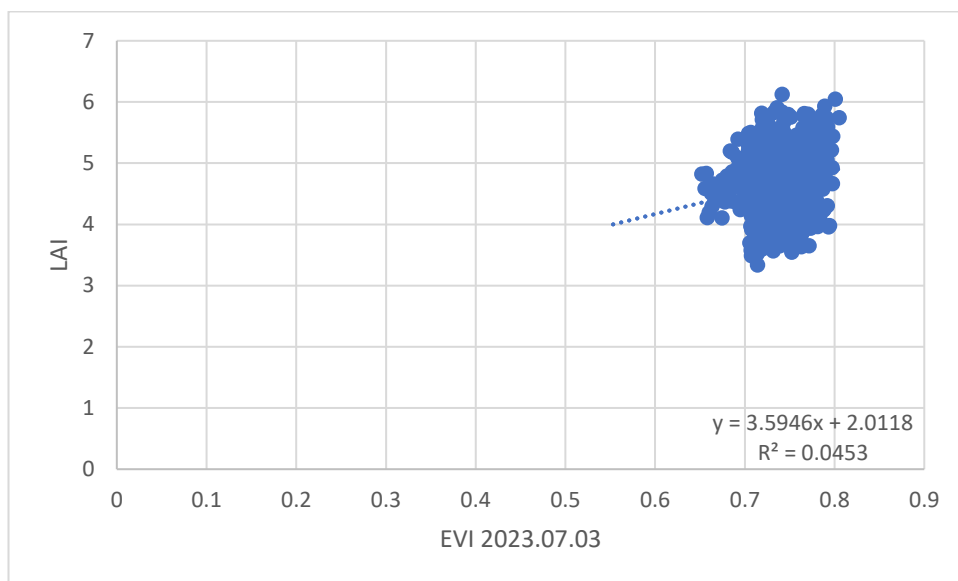
szintkülönbség van jelen, ami, ahogyan az ábrán is látható egyértelműen befolyásolja a növények egymáshoz viszonyuló állapotát. A klorofillok alapvető szerepet játszanak a fotoszintézisben, ezért érdemes megemlíteni, hogy a SPAD x LAI ábrája is hasonlít a nettó fotoszintéziséhez, bár ez utóbbi még egyértelműbb tendenciát ($Y = -1.7693x + 435.96$, $R^2 = 0.2215$) mutat a talajszintkülönbséggel összevetve. A diagramokon egyértelműen megállapítható, hogy a mérési területen elhelyezkedő napraforgók fotoszintetikus aktivitása lényegesen magasabb ($30 - 50 \mu\text{mol CO}_2/\text{m}^2/\text{s}$) az alacsonyabban fekvő (226 méter) pontokon.



23. ábra. A LAI kapcsolata az ALT háttérváltozóval

Arra a kérdésre, hogy a mélyebb pontokon miért van szignifikánsan magasabb fotoszintetikus aktivitás, több lehetséges válasz van, kezdve az eltérő magassággal együtt járó eltérő kitettséggel, ami befolyásolhatja a talaj szervesanyag-tartalmát oly módon, hogy magasabb helyeken alacsonyabb, lefelé pedig nő. De okozhatja a talajban lefelé mozgó víz is, ami hajlamos összegyűlni a mélyebb részekben. Fontos megemlíteni viszont, hogy a korábbi 16. ábrán szemléltetett SWC térképen bár vannak jelentős különbségek a talajnedvesség szintjében, a fotoszintézis hatékonysága és a talajnedvesség (SWC) között a mérés pillanatában azonban nem volt megfigyelhető összefüggés, feltehetően a napraforgó állomány telített, kifogástalan (stresszmentes) állapotának köszönhetően. Azonban a 15. ábrán látható NDVI és EVI diagramnak köszönhetően tudjuk, hogy az ezt követő időszakban (július középső harmada), már hanyatlani kezdett az állomány épsége. A kérdésre egy realisabb válasszal a 23. ábra fog szolgálni, mivel az alacsonyabban fekvő területeken a növényzet is dúsabb (4-6,5 közötti LAI érték), pontosabban a levélfelület index értékek általánosságban nagyobbak ($R^2 = 0.0697$).

Ebből adódik, hogy a négyzetméterre jutó fotoszintetikus aktivitás, a transzspiráció, és az NDVI értékek is nagyobbak lesznek.



24. ábra. Az EVI kapcsolata a LAI-val

A 24. ábrán, a napraforgó tábláról készült EVI kép részletesebb adathalmazát használtuk fel a LAI-val történő korreláció kereséséhez. Bár a korábbi regressziókhoz a mért 78 pont koordinátaíra kerestünk ki 78 értéket, hogy összevethessük azokat, ebben az esetben, az R program segítségével, az adott napra vonatkozó (2023.07.03) műholdas EVI kép minden pixelére vonatkozó értéket kiszedtünk. Ez, a mérési területen 736 különböző EVI értéket jelent, melyet összevetettünk a korábbi 17. (D) ábrán látható LAI térkép egyező koordinátaival. Összegezve tehát, a 24. ábrán, a mérési területen belül 736 EVI és LAI adatot vetettünk össze, így az eredményként kapott 0.0453-as R^2 érték egy még pontosabb és egyértelműbb összefüggést mutat az EVI és a LAI között. Az ábrán jól látszik, hogy az EVI-LAI összefüggésnek csak egy kis szeletét figyelhetjük meg ezekből a mért és becsült adatokból, hiszen szűk a megfigyelt EVI tartomány.

6 ÖSSZEFOGLALÁS

Nem kérdés, hogy a mezőgazdaság jelentősége végig az emberiség történelmében mennyire meghatározó volt. A növekvő populáció mindig növekvő igényeket támaszt az élelmiszerelőállítók felé, azonban manapság, 2024-ben, amikor Földünk népessége már a 8 milliárd embert is meghaladta, már legalább ennyire fontos, hogy ezt a hihetetlen mennyiségű élelmiszert a bolygónk erőforrásaira odafigyelve, azoknak visszapótlása mellett termeljük ki, ráadásul egyre gyakoribb időjárási szélsőségek mellett, ami egy rendkívül nehéz feladat (Dobos, 2013). Manapság már szükség van rá, hogy a mezőgazdasági területekről konkrét információkat gyűjtsünk akár a növényeink, vagy talajaink állapotáról, és hogy ezeket szem előtt tartva folytassuk a gazdálkodást. A távérzékelésen vagy terepi méréseken alapuló precíziós gazdálkodás segítségével, számszerűsített információkhoz juthatunk hozzá növényeinkkel kapcsolatban akár állomány, vagy egyedszinten. Ezek az információk lehetővé teszik, hogy egy esetleges biotikus (pl: kártevők, kórokozók, vadkár) vagy abiotikus (pl: szárazság, tápanyaghiány) stresszhelyzetet még azelőtt tudjunk kezelni, hogy azoknak a szemmel látható tünetei megjelenjenek az állományban. Továbbá, lehetővé teszi akár konkrét foltok és gócpontok kezelését, az egész állomány kezelése helyett, amivel nem csak a vegyszert és az anyagi költségeket csökkenthetjük, de a felesleges környezetterhelést is. Munkám során egy az Ikladi TSZ által művelt napraforgó tábla fejlődését követtem nyomon, egészen a vetéstől az aratásig. 2023 június 29-én terepi mérésre is sor került, ahol a mérési területet 78 pontra osztottuk fel, melyeket egy cm-pontosságú Stone X GPS segítségével mértük ki. A 78 ponton továbbá többek között klorofill-tartalmat, levélfelület indexet, nettó fotoszintézist, talajnedveséget és transzspirációt is mértünk, így koordinátákhoz kötött adatokat tudtunk egymáshoz, illetve a műholdfelvételekből kinyert adatokkal összevetni. A műholdfelvételekhez a Sentinel-2 műhold által készített ingyenesen elérhető, 10 x 10 m²-es pixel felbontású multispektrális képeit vettem alapul, melyekből a napraforgó fejlődésének intervalluma (április 12 - szeptember 11.) során, 31 db volt használható. A műholdfelvételek elemzése során 2 vegetációs index, az NDVI és az EVI lett összehasonlítva, melyek közül az EVI érzékenyebbnek bizonyult, mivel apróbb különbségeket is jobban kimutatott az NDVI-hoz képest (Shammi és Meng, 2021). A mérés évében az időjárás kedvezőbben alakult a napraforgó számára, így kevés állomány szintű stressz volt kimutatható, az is július második dekádjában, amikor az EVI index minimális csökkenésbe kezdett, a sok éves csapadékatlagot nem teljesítő, vagyis az átlagnál kicsit szárazabb júliusi hónapnak köszönhetően. Viszont egyedszinten, a műholdas EVI index és a készített stressztérképek alapján már voltak nagyobb különbségek a

táblán, melyek elsősorban a táblán belüli szintkülönbségekhez és a nem megfelelően vagy nem egyenletesen előkészített talajfelszínhez volt visszavezethető.

7 IRODALOMJEGYZÉK

- Adeleke, B. S., & Babalola, O. O. (2020). Oilseed crop sunflower (*Helianthus annuus*) as a source of food: Nutritional and health benefits. In *Food Science and Nutrition* (Vol. 8, Issue 9, pp. 4666–4684). Wiley-Blackwell. <https://doi.org/10.1002/fsn3.1783>
- Birkás. M. (n.d.). A Klímaváltozás Hatása A Növénytermesztési Gyakorlatra.
- Croshaw, C. (2018). Characterizing Low Nutrient Stress Resistance in Crop Sunflowers
Characterizing Low Nutrient Stress Resistance in Crop Sunflowers (*Helianthus annus*)
(*Helianthus annus*). <https://digitalcommons.cwu.edu/etd/885>
- Dobos, 2013. (2013). Precíziós Növénytermesztés.
- Dr. Bratek Z, Dr. Fodor F, Dr. Király I, Dr. Nyitrai P, Dr. Parádi I, Dr. Rác I, Dr. Rudnóy S, Dr. Sárvári É, Dr. Solti Á, Dr. Szigeti Z, & Dr. Tamás L. (2013). A növényi anyagcsere élettana. <http://www.renderx.com/>
- Eredics A. (2007). Nyugat-Magyarországi Egyetem Erdmérnöki Kar Geomatikai, Erdfeltárási És Vízgazdálkodási Intézet Földmérési És Távérzékelési Tanszék Vegetációs Indexméter (Ndvi) Tervezése És Fejlesztése Lleida, Sopron 2007.
- Filipović, N., Brdar, S., Mimić, G., Marko, O., & Crnojević, V. (2022). Regional soil moisture prediction system based on Long Short-Term Memory network. *Biosystems Engineering*, 213, 30–38. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2021.11.019>
- Fóti, S., Balogh, J., Herbst, M., Papp, M., Koncz, P., Bartha, S., Zimmermann, Z., Komoly, C., Szabó, G., Margóczy, K., Acosta, M., & Nagy, Z. (2016). Meta-analysis of field scale spatial variability of grassland soil CO₂ efflux: Interaction of biotic and abiotic drivers. *Catena*, 143, 78–89. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2016.03.034>
- Fóti, S., Balogh, J., Papp, M., Koncz, P., & Nagy, Z. (2018). Scale of soil horizontal heterogeneity and its effects on the spatial patterns of ecosystem processes in grasslands and crops. In *Geophysical Research Abstracts* (Vol. 20).
- Györgyné Papp Katalin, P. (n.d.). Szegedi Tudományegyetem Természettudományi és Informatikai Kar Kísérleti Fizika Tanszék fizika szak SZAKDOLGOZAT Modern fizikai kísérletek a középiskolában.
- Gyulai István. (2009). The Precision Agriculture Aided By Remotely Sensed Data. (n.d.).

Hazrati, S., Tahmasebi-Sarvestani, Z., Mokhtassi-Bidgoli, A., Modarres-Sanavy, S. A. M., Mohammadi, H., & Nicola, S. (2017). Effects of zeolite and water stress on growth, yield and chemical compositions of Aloe vera L. *Agricultural Water Management*, 181, 66–72.
<https://doi.org/10.1016/j.agwat.2016.11.026>

HungaroMet Meteorológiai Adattár

(Index of /climate/homogenized_data/gridded_data_series/daily_data_series)

https://www.youtube.com/watch?v=3bW8WN5JbIk&ab_channel=Biol%C3%B3gia%C3%89rthet%C5%91en (https1) (2019)

https://www.youtube.com/watch?v=huO0VY3tSU0&ab_channel=Biol%C3%B3gia%C3%89rthet%C5%91en (https2) (2019)

<https://www.khanacademy.org/science/ap-biology/cellular-energetics/photosynthesis/a/calvin-cycle> (https3) (2019)

Laxa, M., Liebthal, M., Telman, W., Chibani, K., & Dietz, K. J. (2019). The role of the plant antioxidant system in drought tolerance. In *Antioxidants* (Vol. 8, Issue 4). MDPI.
<https://doi.org/10.3390/antiox8040094>

Lovas I és Bartha Cs. (2005). Energiaátalakulási folyamatok a növényekben.

Mir, M. S., Naikoo, N. B., Kanth, R., & Bhat, M. A. (2022). Vertical farming: The future of agriculture: A review. <http://www.thepharmajournal.com>

Molnár, T. és Dr. Somogyi, Z. (2019). A távérzékelés alkalmazása az erdészetben és a precíziós gazdálkodásban.

Nomura, K., & Mitchard, E. T. A. (2018). More than meets the eye: Using Sentinel-2 to map small plantations in complex forest landscapes. *Remote Sensing*, 10(11).
<https://doi.org/10.3390/rs10111693>

Papp G., Ádám J, Biró P, Bozó L, Márton P. (2019) Geomatikai közlemények.
www.geomatika.ggki.hu

Pénzes-Kónya, E., Utasi, Z., & Biró, C. (2011). Műholdakról távérzékelte adatok feldolgozása és hasznosítása. <https://www.researchgate.net/publication/274256169>

- Pépó, P., & Novák, A. (2016). Correlation between photosynthetic traits and yield in sunflower. *Plant, Soil and Environment*, 62(7), 335–340.
<https://doi.org/10.17221/202/2016-PSE>
- R Core Team (2023). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <<https://www.R-project.org/>>.
- Shammi, S. A., & Meng, Q. (2021). Use time series NDVI and EVI to develop dynamic crop growth metrics for yield modeling. *Ecological Indicators*, 121.
<https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107124>
- Shi, H., Wu, Y., Yi, L., Hu, H., Su, F., Wang, Y., Li, D., & Hou, J. (2023a). Analysis of QTL mapping for germination and seedling response to drought stress in sunflower (*Helianthus annuus* L.). *PeerJ*, 11. <https://doi.org/10.7717/peerj.15275>
- Sipka Gábor Témavezető, értekezés, & Péter Fizika Doktori Iskola, M. (2017). Bakterioklorofill fluoreszcencia, mint a fotoszintetikus baktériumok fiziológiai állapotának jelzőrendszere.
- Süß, A., Danner, M., Obster, C., Locherer, M., Hank, T., & Richter, K. (2015). Measuring Leaf Chlorophyll Content with the Konica Minolta SPAD-502Plus EnMAP Field Guides Technical Report. <https://doi.org/10.2312/enmap.2015.010>
- Trépos, R., Champolivier, L., Dejoux, J. F., Al Bitar, A., Casadebaig, P., & Debaeke, P. (2020). Forecasting sunflower grain yield by assimilating leaf area index into a crop model. *Remote Sensing*, 12(22), 1–23. <https://doi.org/10.3390/rs12223816>
- Tuba és Csintalan. (2009). Szent István Egyetem Mezőgazdaság-és Környezettudományi Kar Növényteni És Növényélettani Tanszék. (n.d.).
- Varga, M., Egyetem, K., & Kar, Á. (2007). A mitokondrium és a kloroplaszt modellezésének összehasonlító elemzése és tanulságai (Vol. 11, Issue 2). <http://www.sigmaaldrich.com/>
- Varga, és Szántó. (2019). A Napraforgó Gyomírtása.
- Vértessy L. (2023). Precíziós mezőgazdaság: helyzetkép és gazdasági megfontolások Körforgásos Gazdaság Elemző Központ Körforgásos gazdaság.

8 KÖSZÖNETNYILVÁNÍTÁS

Ezennel szeretnék köszönetet mondani támogatóimnak, akik végig kísérték munkámat. Elsősorban köszönöm a témavezetőmnek Dr. Balogh Jánosnak, hogy állandóan elérhető volt számomra, biztosította számomra a kellő labor és mérőeszközöket és folyamatosan segítette és felügyelte munkámat szakmai hozzáértésével. Nélküle nem készült volna el ez a munka. Továbbá szeretnék még köszönetet mondani Dr. Fóti Szilviának, aki sokat segített nekem a mérések és azoknak feldolgozása során is. Hozzájuk, és a Növényélettan és Növényökológiai Tanszék munkatársaihoz (akiknek szintén sokat köszönhetek) mindig öröm volt fordulni és sosem volt teher egy konzultáció vagy labormunka miatt bejárni az egyetemre, hiszen egészen barátokként tekintettem rájuk. A tanszéken lévő családi légkört, aminek részesének érezhettem magam szerintem számos másik tanszék megirigyelhetné. Továbbá szeretnék köszönetet mondani jegyesemnek Hőnyi Juliannának, aki az első oldaltól egészen az utolsóig motiváltan tartott engem és akire szintén mindig számíthattam a családom mellett.