



MAGYAR AGRÁR- ÉS
ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM

Növénytermesztési-
tudományok Intézet

**A KUKORICA PRODUKCIÓJÁNAK ÉS FOTOSZINTÉZIS-
PARAMÉTEREINEK TÉRBELI VÁLTOZATOSSÁGA ÉS AZ AZT
MEGHATÁROZÓ TÉNYEZŐK**

**Spatial variations of maize production and photosynthetic parameters and
its drivers**

TDK DOLGOZAT

Készítette: **Mónos Gréta**

C6VYFH

Agrármérnök, osztatlan képzés

Nappali tagozat

Szent István Campus

Témavezető: Dr. Balogh János, egyetemi tanár

Növényélettan és Növényökológia Tanszék

Növénytermesztési-tudományok Intézet, MATE

GÖDÖLLŐ

2022.

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés és célkitűzés	4
2	Szakirodalmi áttekintés	6
2.1	A kukorica jelentősége	6
2.2	A növények fotoszintézise	9
2.2.1	A kloroplasztisz	10
2.2.2	Fotoszintetikus pigmentek	10
2.2.3	Fotokémiai reakció	12
2.2.4	A fotoszintetikus elektrontranszport	12
2.2.5	Szénredukciós szakasz	13
2.2.6	Diffúziós szakasz	13
2.3	Transzspiráció	14
2.4	Precíziós gazdálkodás	14
2.5	Növényzet távérzékelése	16
2.5.1	Növényi stressz kapcsolata a fluoreszcenciával és reflektanciával	20
3	Anyag és módszer	23
3.1	Laboratóriumi mérések	23
3.2	Szántóföldi mérések	26
3.3	Vizsgált élettani paraméterek, ökofiziológiai változók	26
3.3.1	Fotoszintézis mérés	26
3.3.2	LAI mérése	27
3.3.3	Fluoreszcencia mérés	27
3.3.4	Klorofill-tartalom mérés	28
3.3.5	Vegetációs indexek	29
3.4	Adatfeldolgozás	30
4	Eredmények és értékelésük	31
4.1	Labormérések	31

4.1.1	Fotoszintézis és transzspiráció értékek	31
4.1.2	Fluoreszcencia paraméterek	32
4.1.3	SPAD mérések	33
4.2	Szántóföldi mérések	34
4.2.1	Műholdfotó feldolgozás	34
4.2.2	Főkomponens analízis	40
4.3	Az eredmények összegzése	42
5	Összefoglalás	44
6	Irodalomjegyzék	46

1 Bevezetés és célkitűzés

Napjainkban a mezőgazdaságra egyre nagyobb elvárások nehezednek. A növekvő népesség és a klímaváltozás következtében a növekvő igények kielégítése (mind az élelmiszer, ipari nyersanyagok és energia terén) egyre nehezebb feladatnak bizonyul (Horváth & Komarek, 2016). Egyes becslések szerint Földünk jelenlegi 7,7 milliárdos népessége 2050-re elérheti a majdnem 10 milliárdot, ami jelentősen megnöveli az élelmezés területén támasztott igényeket is. (Erenstein et al., 2022). A mezőgazdaság a klímaváltozás által egyik legközvetlenebbül érintett gazdasági szektor, termelésének ezért alkalmazkodnia kell a megváltozott és folyamatosan változó környezeti feltételekhez. Az éghajlatváltozás következtében, csökken az időjárás rendszerének stabilitása, a maximum és minimum hőmérsékleti értékek, a hóhullámok száma és gyakorisága megnövekszik, a csapadékos és csapadék nélküli időszakok pedig szélsőségesebbé válnak. Becslések alapján 2-4 °C-os hőmérséklet növekedéssel és az extrém események megnövekedett előfordulásával kell számolnunk a jövőben, melyek megváltoztatják világviszonylatban is, és hazánkban is az agroökológiai feltételeket, és közvetlenül befolyásolják a növénytermesztést (Kemény et al., 2019). A klímaváltozás következményeként, az egyre szélsőségesebb időjárás különböző abiotikus stressztényezőket jelent a növények számára, mely évről-évre problémákat vet fel a növénytermesztésben (Bellard et al., 2012). Ezek az abiotikus tényezők lehetnek: szélsőséges fényviszonyok, sugárzás (UV-A, UV-B), túl magas és túl alacsony hőmérséklet, víz (aszály és elárasztás), tápanyag hiány/többlet, környezetszennyező gázok/anyagok. Mivel ezek a tényezők eltérő élőhelyeken, eltérő kombinációkban fordulnak elő, így eltérő élettani hatásokat okoznak a növényekben (Suzuki et al., 2014). Ezek a tényezők korlátozzák a növényeket a fejlődésükben, ezáltal csökkentik a termésbiztonságot - kukorica esetén az abiotikus tényezők akár több mint 60%-os, búza esetén több mint 80%-os veszteséget generálhatnak. A biotikus tényezők (rovarok, kórokozók, gyomok) okozta károk pedig a 30-40%-ot is elérhetik (Szigeti, 2018).

Azonban, ha jobban megismerjük a növényi életfolyamatok és a stresszfaktorok kapcsolatát, akkor közelebb kerülünk számos probléma kiküszöböléséhez, megoldásához. A kiszámíthatatlan környezeti tényezőkből származó gondokat súlyosbíthatja még a környezetszennyezés, és a gyakran előforduló, nem megfelelő tápanyag- és vízgazdálkodás is. Ezek azonban megfelelő agrotechnikai módszerekkel elkerülhetőek, ha ismerjük a növény igényeit. A biztonságos takarmány és élelmiszer-alapanyag előállításához, és a környezetterhelés minimálisra csökkentéséhez a mezőgazdaságot át kell alakítani, tovább kell fejleszteni. Napjainkban már a precíziós/helyspecifikus gazdálkodáson keresztül korszerű technikai

eszközöket tudunk alkalmazni a mezőgazdaságban is. A precíziós gazdálkodás lehetővé teszi a növények mennyiségi (pl. növénymagasság, levélfelület) és minőségi paramétereinek feltérképezését (pl. klorofill-, nitrogéntartalom), ezáltal a gazdálkodás optimalizálását, fenntarthatóságát (Dobos, 2013). A precíziós gazdálkodás egyik legfontosabb része a távérzékeléssel nyert adatok feldolgozása. A növényi működés jól nyomon követhető a reflektancia és a fotoszintézis (fluoreszcencia) mérésével, melyeket műholdakon alapuló távérzékeléses technikával tudunk vizsgálni. A fluoreszcencia mérést már távérzékeléses vizsgálatokban is alkalmazzák, erre példa a GOSAT, vagy a 2025-ben induló ESA Flex mission, mely a közeljövőben lehetővé teszi a mezőgazdaság számára is a műholdadatok elérhetőségét, és információt szolgáltat a növények állapotáról, produktivitásáról, stresszeltségéről.

Kutatásom célja a kukorica vizsgálata volt, hiszen a klímaváltozás különösen nagy jelentőséggel bírhat e növény esetében, az egyre melegedő hőmérséklet és csapadékhány jelentős csökkenést okozhat a termés hozamban. Mivel a kukorica a világon a legfontosabb haszonnövények közé tartozik, így élelmiszerbiztonsági szempontból kiemelkedő fontossága van. A kutatás különböző vizsgálati eljárásokkal, laboratóriumi és szabadföldi/terepi mérések összekapcsolásával zajlott. A szabadföldi mérések a saját gazdaságunk területén (Somogy megye – Nagycsepely), a laboratóriumi mérések pedig a MATE növényélettani laboratóriumában (Gödöllő) kerültek kivitelezésre. A kutatás központi kérdése, hogy a növények (jelen esetben a kukorica) élettani folyamatai, milyen összefüggésben vannak a növényeket ért stresszhatásokkal, és hogy ez a megváltozott működés megjelenik-e a távérzékeléssel mérhető paraméterekben. Céлом, hogy a kutatás során minél átfogóbb képet kapjak a növényélettani folyamatokra ható stressztényezőkről és azok kimutathatóságáról a kukorica esetében, mely információk a mindennapi gazdálkodás során is alkalmazhatók lennének. Ezek az eredmények a növény-környezet kapcsolat jobb megértéséhez járulhatnak hozzá, ezáltal átgondoltabb agrotechnikai beavatkozásokat, így eredményesebb gazdálkodást tehetnek lehetővé, valamint a precíziós gazdálkodás hatékonyságát is elősegíthetik. A kutatás így hozzájárulhat a termésbiztonság növeléséhez, és a környezetkímélőbb gazdálkodáshoz, valamint jelen dolgozattal céлом a klímaváltozás hatásaihoz és ehhez való alkalmazkodás vizsgálataihoz kapcsolódó kutatásokat is elősegíteni.

2 Szakirodalmi áttekintés

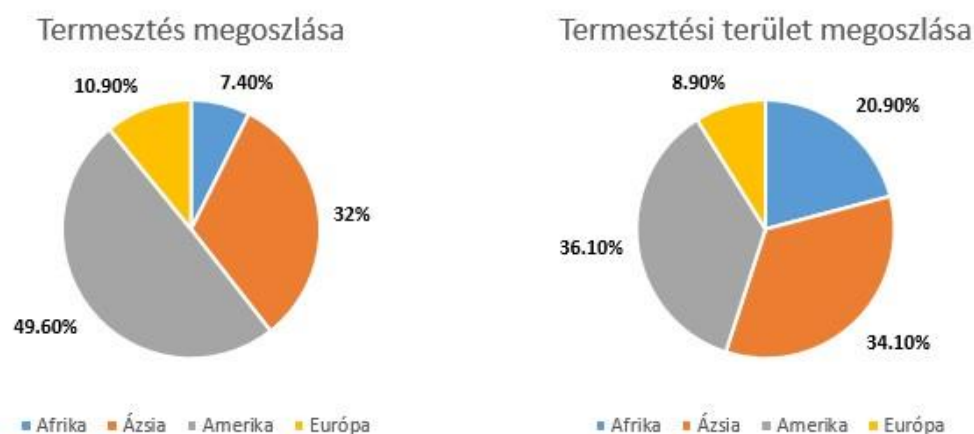
2.1 A kukorica jelentősége

A kukorica (*Zea mays*) 9000 évvel ezelőttre visszanyúló Dél-Mexikóban történő domesztikációja óta, egyre növekvő és szerteágazó szerepet játszik az élelmezésben. C4-es mivoltának köszönhetően kiváló fotoszintetikus hatékonysággal rendelkezik, ezáltal képes a környezeti tényezők széles skálájához alkalmazkodni, így például a trópusi, szubtrópusi és mérsékeltövi területeken is megfelelően termeszthető. Vízigényét tekintve körülbelül 1222 l vizet igényel termés kg-onként, ami kedvezőbb a többi gabonaféléhez képest. A búza, és a rizs mellett a kukorica a világon a vezető alapvető élelmiszerek közé tartozik, melyet körülbelül 200 millió hektáron termesztenek, így a búza után a 2. legnagyobb területen termesztett növény világviszonylatban. Fogyasztását tekintve is a búza és a rizs után a 3. legnagyobb mennyiségben fogyasztott növény, évente 18,5 kg/fő világviszonylatban a fogyasztása, ami 11%-a a 175 kg-os éves gabonafogyasztásnak. A globális kukoricatermelés az elmúlt néhány évtized során jelentősen megugrott, ami a növekvő keresletnek, a technológia nagymértékű fejlődésének, a termésnövekedésnek és a vetésterület bővítésének is köszönhető (Erenstein et al., 2022). A termelési volumen tekintetében már jelenleg is a vezető gabonafélék közé tartozik, azonban a következő évtizedekben a legszélesebb körben termesztett és legkeresettebb növény a kukorica lesz, sokoldalúsága és többcélú hasznosíthatósága miatt. Az éves kukoricatermelés globálisan 1137 millió tonna, melynek 12,8 %-a élelmiszer, 56,3% takarmány, 0,7%-a vetőmag, 19,6%-a pedig egyéb felhasználásra kerül. A világ népessége a jelenlegi kilátások szerint 7,7 milliárd főről 9,7 milliárdra fog növekedni 2050-re, így ekkorra az élelmiszerként felhasznált kukorica potenciális növekedése, a jelenlegi 145,536 millió tonnát akár 56 millió tonnával is növelheti, de takarmánycént, ipari és energianövényként történő felhasználása is növekszik. Kína és India a világ két legnépesebb országa, népességük 36%-át (2,8 milliárd fő) adja a világ népességének. Mivel ezekben az országokban jelentős mértékben megnövekedett, és továbbra is növekszik a húsfogyasztás (főleg baromfi és sertés), így a kukorica takarmány célú felhasználására is folyamatosan növekvő keresletet biztosítanak. A kukorica növekvő jelentőségét az 1995-től 2019-ig való területbeli, termésbeli és hozambeli változásai is mutatják (1. táblázat).

1. táblázat: A kukorica globális termelési változásai 1995-től 2019-ig (Erenstein et al., 2022)

Kukorica			
	1995	2019	Relatív változás (%)
Terület (millió ha)	135	197	46%
Termés (millió t)	521	1137	118%
Hozam (t/ha)	3,9	5,8	30%

Élelmiszer célú felhasználása főként Afrika Szaharától délre eső részein (Szubszaharai-Afrika területein) és Latin-Amerika területein jelentős. A búza, rizs és kukorica globális jelentőségét az is mutatja, hogy egyes becslések szerint a világon 42%-át teszik ki a kalóriabevitelnek és 37%-át a fehérjebevitelnek. Világviszonylatban Amerika 49,6%-kal a kukoricatermesztés felét adja, ezt Ázsia követi 32%-kal, míg Európa 10,9%-át, Afrika 7,4%-át teszi ki a termésnek (1. ábra).



1. ábra: A kukorica termelésének (bal) és termesztési területének (jobb) megoszlása kontinensenként (Erenstein et al., 2022)

Területi megoszlását tekintve is Amerika rendelkezik a legtöbb területtel 36,1%-kal, Ázsiában 34,1%-a, Afrikában 20,9%-a, Európában 8,9%-a található a kukorica termesztési területének (1. ábra) (Erenstein et al. 2022).

A kukorica termesztése változatos környezeti körülmények között zajlik (pl. szárazabb-nedvesebb területek, síkságok-dombságok), ami különböző fajták nemesítéséhez vezetett, ezek pedig tenyésztésük, valamint a terület maximális hőmérséklete és csapadékmennyisége, tehát klímazóna-határok szerint különböző csoportokba oszthatók. Adott területen a klímazóna-határnak megfelelő fajtákat termesztik (pl. mérsékeltövi, trópusi, hosszú és rövid tenyésztési fajták), és különböző tulajdonságaik is ennek fényében alakulnak (pl. szárazságtűrés), ezek a csoportok segítenek kategorizálni az adott kontinensen és országban termesztett fajtákat. A klímaváltozásnak köszönhetően azonban ezek a klímazóna-határok áthelyeződni látszanak, így például az északi és déli szélességi köröknél és a magasabb tengerszint feletti területeken a termesztési kilátások növekednek, míg a szubtrópusi, trópusi térségekben az abiotikus (extrém hőség, szárazság) és a biotikus (betegségek, kártevők) stressztényezők gyakoribb előfordulására lehet számítani (Erenstein et al. 2022). A klímaváltozás hatásaként új virulens kártevők és betegségek jelentek meg, melyek már a korábban nem érintett területeken is

felütötték a fejüket, így újabb kihívásokkal kell szembenézni a termesztőknek. Jó példa erre, hogy az elmúlt évtizedben Afrikában megjelent a kukorica letális nekrozisa (MLN), 2016 óta pedig Afrika több mint 40 országát jelentős mértékben érintette az őszi sereghernyó (*Spodoptera frugiperda*) inváziója, mely 2018 óta már Ázsiára is áttért (Erenstein et al. 2022).

A termésingadozás az utóbbi évtizedekben már az 50-60%-ot is elérte a klímaváltozáshoz kapcsolódó szélsőséges időjárás és a helytelen agrotechnika miatt, így a jövőben a jó alkalmazkodóképességű, adaptív hibridek szerepe erőteljesen fel fog értékelődni, valamint a GMO (genetikailag módosított) kukorica is számos lehetőséget rejt magában. Globálisan a termesztett kukorica több, mint 2/3-a hagyományos, nem genetikailag módosított kukorica. Az 1990-es évek közepe óta azonban megnőtt a különböző biotechnológiai tulajdonságokkal (pl. rovarrezisztencia, herbicid tolerancia) rendelkező kukorica vetőmag használata, ami a hozamnövekedésben és a különböző stressztényezőkkel szembeni ellenállóság kialakításában is szerepet játszott. Erre jó példa az Amerikában megjelent BT (*Bacillus thuringiensis* alapú) kukorica, ami toleráns a kukoricamollyal szemben, de a glifozát tolerancián alapuló herbicid toleráns kukorica is nagy szereppel bír. A kukorica jelenleg globálisan a második legszélesebb körben termesztett GM növény, a GM területek 32%-át (kb. 61 millió ha) teszi ki, melyet csak a szója előz meg 48%-al (Erenstein et al. 2022). A GMO kukorica azonban Európában még korlátozottan elterjedt, hiszen az emberi szervezetre való hatását még vizsgálják. GMO fajták tekintetében a világon kiemelt jelentőségű termelők az USA, Kanada, Argentína, Kína, India és Dél-Afrikai Köztársaság (Pepó & Sárvári, 2011).

Magyarországon a szántóterület 2021-ben 4 145 300 ha nagyságú (KSH). A kukorica Magyarországon is nagy jelentőséggel bíró növény, 2021-ben a betakarított termőterülete 1 043 000 ha (a szántóterület kb. 25%-a), termésmennyisége 6 301 374 t és termésátlaga 6040 kg/ha volt (KSH). Magyarországon főként energiadús állati takarmányként hasznosítják, hiszen keményítőtartalma 65-70%, keményítőértéke 700-800 g/kg, energiaértéke 8,5-9,5 MJ/kg szárazanyag (Pepó, Sárvári 2011). A legjelentősebb kukorica termelő régióknak a Dél-Dunántúli régió, ezen a területen a legmagasabbak a termésátlagok, ezt jól mutatja az is, hogy 2004-ben 11%-kal többet takarítottak be az Észak-Alföldi régió termelésénél és hétszer többet a Közép-Magyarországi régió termésénél, mely a legalacsonyabb terméseredményű régió (Hingyi, 2005). 2004-ben nagyon kedvezőek voltak a környezeti és időjárási viszonyok a növénytermesztéshez, Európa-szerte rekordmennyiségű termést tudtak betakarítani, hazánkban

ekkor több, mint 8 millió t kukorica került betakarításra, a világon pedig 721 millió t kukorica termett ebben az évben, ami 12%-kal több volt a 2003-as adatokhoz képest.

Hazánk területi és környezeti adottságai kiváló feltételeket nyújtanának a gabonatermesztés számára, de a klímaváltozásból fakadó szélsőséges időjárási viszonyok, és a termelők tőkeszegénysége miatt a fajlagos hozamok ingadoznak és hozamunk elmarad az EU legnagyobb gabonatermesztő országaihoz képest (Hingyi 2005). A globális és regionális klímaforatókönyvek alapján további romlásra számíthatunk a termelés környezeti feltételeit illetően, melyek szerint a klímaváltozás a világtágnál jelentősebben fogja érinteni Magyarországot. Ezt az is szemlélteti, hogy 1981 és 2016 között hazánkban az átlaghőmérséklet növekedése elérte az 1,62 °C-ot, míg a világtálag hőmérséklet-növekedése 0,94 °C, Európában 0,89-0,93 °C volt. A klímaforatókönyvek alapján további melegedés (akár 3,5-4 °C), szárazság várható, valamint az extrém környezeti események gyakorisága megnövekszik, így a hőhullámok, forró napok, aszályos időszakok, heves esőzések, villámárvizek előfordulása is megnövekszik, ezek pedig jelentősen átalakítják hazánk agroökológiai potenciálját (Keményné et al. 2019). Feltételezve a klímaváltozáshoz való folyamatos alkalmazkodást és optimális vetési és betakarítási időpontok keresését, a kukorica esetében a következő változások várhatóak. 2050-re több, mint 9 nappal tolódhat korábbra a vetésidő, 2100-ra ez már 14 nap lehet, a betakarítási idő pedig 2050-ig 17 nappal hamarabb következhet be, 2100-ra már 31 nappal korábban kerülhet betakarításra, mint jelenleg. Ami a kukorica hozamát illeti, 2050-re 18%-kal, 2100-ra 28%-kal csökkenhet a termés. Azonban a műtrágyatöbblet és az öntözés drasztikusan javíthatja a növény adaptációját. Így a megnövelt plusz műtrágya kijuttatással (legalább 120 kg/ha N-hatóanyag), 2050-ig még a jelenlegihez képest +10%-os hozamnövekedés is elképzelhető, 2100-ig pedig csak 7%-os csökkenés várható, öntözés mellett (100-120 mm víz pótlólagos öntözése, ha a csapadék nem éri el a szükséges szintet) (Keményné et al. 2019).

2.2 A növények fotoszintézise

A következő fejezetben röviden áttekintésre kerülnek a kutatás szempontjából lényeges növényélettani folyamatok, így a fotoszintézis (kiemelten a fényabszorpció folyamata), a tápanyagfelvétel és a transzspiráció. Ezen élettani folyamatok ismerete, a távérzékelés módszerén alapuló elemzések megértéséhez szükséges.

Földünkön az élet a Napból származó energiától függ, mely a biológiai folyamatok közül egyedül fotoszintézis révén képes hasznosulni, így kijelenthetjük, hogy a fotoszintézis a földi

élet energetikai alapja. A fotoszintézis teszi lehetővé az életfolyamatok tápanyagellátását, ez a folyamat alakította ki az oxigéndús légkört, az ózonpajzsot, de ennek köszönhetjük a jelenlegi fosszilis energiahordozóinkat is, melyek a ma felhasznált energia 4/5-öd részét adják (Garab, 2018). A növények autotróf szervezetek, anyagcseréjüket tekintve fotoautotróf metabolizmus jellemző rájuk. Ezáltal képesek a Nap sugárzását felhasználva szervetlen anyagokból, - szén-dioxidból, vízből és ásványi anyagokból-, saját szerves anyagaikat előállítani fényenergia felhasználásával (Bratek et al., 2013). A fotoszintézis folyamata során tehát, a fotoszintetizáló organizmus a Nap energiáját felhasználva állít elő szénvegyületeket, pontosabban a fényenergia segítségével, szén-dioxidból és vízből szénhidrátot szintetizál, oxigén keletkezése mellett. Egyenletbe foglalva a folyamat alapvetően a következő: $6 \text{ CO}_2 + 6 \text{ H}_2\text{O} + \text{fényenergia} \rightarrow \text{C}_6\text{H}_{12}\text{O}_6 + 6 \text{ O}_2$ (Taiz et al., 2014). A folyamat fényszakaszra, szénredukciós szakaszra és diffúziós folyamatok szakaszára különíthető el, melyekről a későbbiekben lesz szó.

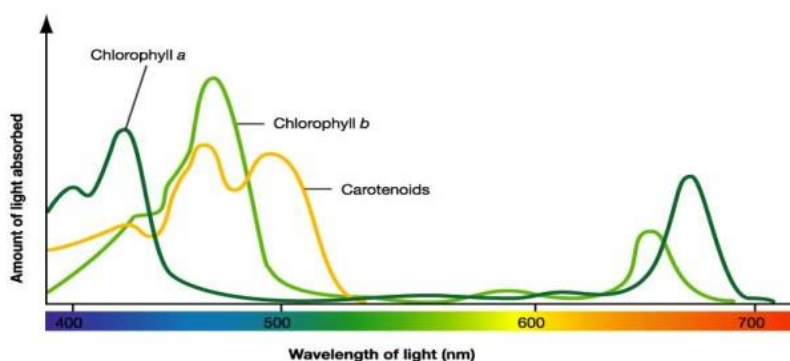
2.2.1 A kloroplasztisz

A fotoszintézis legaktívabban a mezofillum sejtekben zajlik, mert ezek a sejtek számos kloroplasztiszt tartalmaznak. A kloroplasztiszok a növényi sejtben található, lencse alakú, félig önálló, kettős membrán-rendszerrel rendelkező cianobaktérium eredetű sejtszervecskék. A fotoszintézis folyamatának megértéséhez fontos tisztában lenni a kloroplasztisz szerkezeti felépítésével, ami ún. tilakoid membránokat tartalmaz. Külső membránrendszerén kívül, belső tilakoid membránrendszert is tartalmaz, mely akkor alakul ki a proplasztiszban, ha fény éri, mivel ilyenkor a belső membrán betüremkedés hozza létre a tilakoidokat, melyek zsákszerű képződmények, ezek kétféleképpen lehetnek. Az egyszerű kettősmembránból állók a sztrómatilakoidok, ha pedig ezek önmaguk körül feltekerednek és egymásra halmozott zsetonokhoz hasonló szorosan kapcsolt régiókat képeznek, akkor gránumtilakoidokról beszélünk. A gránumtilakoidokat kapcsolják össze a sztrómatilakoidok. A tilakoidot körülvevő folyadék, vagyis a plasztisz alapállománya a sztróma, melyben enzimek, keményítőszemcsék, riboszómák és maga a kloroplasztisz genom is megtalálható (Bratek et al., 2013, Taiz et al., 2014, Tuba, Csintalan 2009). A tilakoidmembránon fotoszintetikus egységekben találhatóak a fotoszintetikus pigmentek, melyeken a fényenergia kémiai energiává alakítása történik.

2.2.2 Fotoszintetikus pigmentek

A fotoszintetikus pigmenteken történik a fotoszintézis első lépése, a fény abszorpciója, vagyis a látható tartományú elektromágneses sugárzás elnyelése. A fényenergiát 400-700 nanométer hullámhossz között képesek abszorbeálni. A fotoszintetikus pigmentek aggregátumokat képeznek, a kloroplasztisz fehérjéihez, lipoidjaihoz kötődnek, így abszorpciós sávjuk szélesebb

hullámhosszon található, mint az egyes pigmentmolekuláké. A fotoszintetikus pigmentek két nagy csoportja jelentős magasabbrendű növények esetében: a klorofilloké és a karotinoidoké. A zöldszínű klorofillok porfirin-vázás vegyületek, melyeknél a közepén elhelyezkedő Mg^{2+} -iont négy pirrolgyűrű fogja közre, valamint delokalizált elektronrendszerrel rendelkeznek, ez teszi lehetővé a fényelnyelést (Bratek et al., 2013). Hat-féle klorofillforma fordul elő a növényekben, baktériumokban azonban további öt speciális bakterioklorofill található, a különbségek a négy pirrolgyűrűhöz kapcsolódó oldalláncokból adódnak. A magasabbrendű növényeknél a klorofill-a és a klorofill-b jelentős, melyek szerkezeti különbségükből adódóan eltérő fény-abszorpciós maximummal bírnak (2. ábra), egymáshoz viszonyított arányuk átlagosan 3:1 (Tuba, Csintalan 2009, Bratek et al., 2013). A klorofill-a maximális abszorpciója 429 és 659 nanométernél található, míg a klorofill-b esetében ez 455 és 642 nanométernél jelenik meg. Mivel a klorofill esetében a vörös és kék tartományban nem történik abszorpció, ezért a növények leveleit zöldnek látjuk (Süß et al., 2015). A klorofillok klorofill-protein komplexek formájában fordulnak elő.



2. ábra: A klorofill-a, klorofill-b és karotinoidok eltérő abszorpciós maximuma (Süß et al., 2015)

A sárga színanyagú karotinoidok erősen telített 40 szénatomos poliizoprén származékok, olyan lipid jellegű tetraterpének, melyek konjugált kettőskötés-rendszerrel rendelkeznek. Funkciójuk sokrétű, stabilizálják a tilakoid membránt, klorofillra energiát visznek át, valamint védőpigmentként is funkcionálnak. Két fő csoportra bonthatók, karotinokra és xantofillokra. A karotinok közül legjelentősebbek a β -karotin és a likopin, melyek szénhidrogénláncai nem tartalmaznak oxigén atomot. A xantofillok azonban tartalmaznak oxigént, ide tartoznak például a lutein és a violaxantin. Mindkét csoport a delokalizált elektronfelhő jelenlétéből adódóan jól abszorbeálja a látható fényt, klorofill esetében kék és vörös tartományban, karotinoidoknál kék tartományban (Tuba, Csintalan 2009).

2.2.3 Fotokémiai reakció

A kloroplasztisban tehát a tilakoidok lehetnek egyszerűek, nem kapcsoltak – (sztrómatilakoid)-, és lehetnek kapcsoltak, vagyis gránumtilakoidok. A nem kapcsolt régiókban található az I. fotokémiai rendszer (PSI), az ATP-szintetáz és citokróm b_6/f komplexek. A kapcsolt régiókban, tehát a gránumokban a II. fotokémiai rendszer (PSII) található a citokróm b_6/f komplexek mellett. A látható fény energiája 147-587 kJ/mol, ami pont akkora, hogy képes gerjesztett állapotba hozni a pigmentek delokalizált elektronjait (Tuba, Csintalan 2009). A fotoszintézis fényszakasza során a pigmentek felveszik a foton teljes energiáját fényabszorpciókor (mely gyors folyamat, 10^{-15} s alatt lezajlik), és emiatt állapotváltozáson mennek keresztül, hiszen a legalacsonyabb szintű alapállapotból S_0 (szinglet) energiagazdag gerjesztett állapotba kerülnek (S_1 , S_2 és S_3 szint vagy T – metastabilis triplet állapot). Fényabszorpciókor elektronátmenet történik melyet energiaváltozás kísér. A magasabb gerjesztett állapotból vibrációs és rotációs energiavesztéssel kerül a molekula alacsonyabb állapotba. Alapállapotba ($S_1 \rightarrow S_0$) a molekula fénykisugárzással, belső konverzióval vagy hőkisugárzással kerülhet. A fénykisugárzás által történő energialeadást fluoreszcenciának nevezzük, ilyenkor a gerjesztett energia fotonként kibocsátva kerül leadásra, és ebben az esetben abszorbeált fényenergia nem hasznosul a fotoszintézisben. Fényenergia csak akkor hasznosul a fotoszintézisben, ha a magasabb energiaszintre jutott klorofillmolekula kémiai reakcióba lép (Bratek et al., 2013).

2.2.4 A fotoszintetikus elektrontranszport

A pigmentrendszer (fotoszisztémák) tehát egy reakciócentrumból és antennarendszerekből állnak. Az I. pigmentrendszer (PSI) több klorofill-a-t és kevesebb klorofill-b-t tartalmaz, karotinoidok közül főleg β -karotin fordul elő, reakciócentruma P_{700} klorofill-a (abszorpciós maximum hullámhossza 700 nanométer), ez a pigmentrendszer nem fluoreszkál. A II. pigmentrendszer (PSII) több klorofill-b-t és kevesebb klorofill-a-t tartalmaz, karotinoidok közül xantofill található benne, reakciócentruma P_{680} klorofill-a, ez a pigmentrendszer erős fluoreszcenciát mutat. Reakciócentrumaikhoz a fotoszintetikus elektrontranszportlánc kapcsolódik, ez köti össze a két centrumot és teremt kapcsolatot az elektrondonor (víz), és elektronakceptor között ($NADP^+$) (Tuba, Csintalan 2009). A fotofoszforiláció az (nem ciklikus) elektrontranszportláncához kapcsolódva NADPH mellett ATP-t is termel, amely a CO_2 -redukcióhoz szükséges. Az ATP-szintetáz enzim, mely az ATP-t szintézist katalizálja, a tilakoidmembrán nem kapcsolt részeiben helyezkedik el (Tuba, Csintalan 2009).

2.2.5 Szénredukciós szakasz

A fényszakaszban meggy végbe a korábban már említett fényabszorpció, a vízbontás, NADPH képződés, és a fotofoszfóriláció során az ATP keletkezése, ezek a folyamatok a fényintenzitástól függenek. A szénredukciós szakasz a NADPH-t és ATP-t használja fel a CO₂ fixáció során, melyek a fényszakaszban képződnek, így ez a szakasz is függ a fénytől, valamint ez az oka annak, hogy a szénhidrát képződés mindig nappal történik (Tuba, Csintalan 2009). A szénredukciós szakasz a kloroplasztisz sztrómájában történik. Első lépésként a CO₂ megkötése történik, ez háromféle módon történhet növénytől függően: lehet C₃-as, C₄-es, CAM típusú. C₃-as esetén a CO₂ megkötés a Calvin-Benson-ciklusban (más néven pentózfoszfát-út) történik, primer termékként pedig a 3 C-atomos glicerinsav-3-foszfát keletkezik. C₄-es típusnál a Calvin-Benson-ciklust kiegészíti a Hatch-Slack-Kortschak-ciklus is, mely a CO₂ elsődleges fixációjáért felelős, itt a primer termék a 4 C-atomos oxálecetsav, ami a C₃-as ciklushoz, biztosítja a CO₂-t, a két folyamat térben elkülönítve meggy végbe. A kísérleti növényként használt kukorica is ebbe a csoportba tartozik. Az ebbe a típusba tartozó növényfajok számos eltéréssel rendelkeznek a C₃-as típushoz képest. Ilyen különbség, hogy edénynyalábjaikat 2 klorenchima-sejtréteg veszi körbe (Kranz-anatómia), egy külső mezofillum és egy belső hüvelyparenchima. Ezeknek a sejteknek a kloroplasztiszai eltérő felépítésűek, hiszen a mezofillumban találhatóak gránumot tartalmaznak, a hüvelyparenchima kloroplasztiszai pedig gránum nélküliek (kiszélesedő sztrómatilakoidjaik vannak), nagyobb keményítőszemcsék megtalálhatóak bennük, tehát szénhidrátfelépítést folytatnak, de csak I.fotokémiai rendszert tartalmaznak, ezért vízbontás és foszfóriláció itt nem zajlik. Ezt a C₄-es növényeknél előforduló jelenséget kloroplasztisz dimorfizmusnak nevezzük. Ezek a növények a kettős karboxilációs út miatt a C₃-asoknál optimálisabban hasznosítják a CO₂-t, kedvezőtlen körülmények esetén (szűk sztómarés-nyitottsággal) is képesek hatékonyan fotoszintetizálni, ezáltal a magas hőmérsékletű és fényintenzitású, kedvezőtlen vízellátottságú körülményekhez kitűnően alkalmazkodnak (Tuba, Csintalan 2009).

2.2.6 Diffúziós szakasz

Ez a fotoszintézis 3. szakasza, ami kloroplasztisz és a környezet légtére között a fotoszintetizáláshoz szükséges CO₂ felvételt, és a fényszakaszban létrejött O₂ leadást biztosítja, valamint a légzéshez szükséges O₂ felvételét és a légzésből származó CO₂ leadását biztosítja, melyek egyszerre zajlanak (Tuba, Csintalan 2009) a folyamat szabályozása a sztómákon keresztül biztosított, emiatt a CO₂ és a vízgőz cseréje szorosan kapcsolt folyamatok.

2.3 Transzspiráció

A víz nélkülözhetetlen az élőlények, így a növények számára is, ezt az is szemlélteti, hogy a növényi sejtekben a vakuólum 98%-a, a citoplazma 95%-a és a sejtfal 50%-a vízből áll. Funkcióját tekintve a víz oldószer, közeg és reagens szerepet tölt be. A víz a növény energiaháztartásának kialakításában is jelentős szereppel bír, valamint az ionok és molekulák szállítása is a víz által valósul meg. A víz felelős a szövetek szilárdságáért, belső nyomásáért, más néven a turgor fenntartásáért, valamint a fotoszintézishez is kiindulási anyag. A (szárazföldi) növények a vizet a talajból a gyökéren keresztül veszik fel, majd a száron keresztül a levelekbe szállítják, ahonnan végül párologtatás révén távozik. A vízfelvétel és párologtatás egymástól elválaszthatatlan folyamat, a föld feletti hajtásrendszer folyamatos vízleadását a talajból pótolja a növény. A párologtatás a sztóman (gázcserenyíláson) keresztül növény által szabályozottan történik. Transzspiráció nyitott sztómaánál zajlik, a folyamat reggeltől délig növekszik, az esti órák fele csökken, megszűnik, a sztóma nyitásának és zárásának napi ritmusához igazodva.

Látható tehát, hogy a transzspiráció nélkülözhetetlen a növények megfelelő működéséhez, hiányában a növény vízforgalma megszűnik, vele együtt pedig az élettani folyamatok is leállnak. A transzspirációnak kiemelt szerepe van még a turgeszcencia-viszonyok kialakításában, és az ásványi anyagok szállításában is (Tuba, Csintalan 2009). A Goudriaan-féle (1977) mikroklíma-szimulációs kutatás (mely a vízgőznyomást, sztómaellenállást-párologtató is vizsgálta) is azt a tényt erősítette, hogy a növények számára a víz lesz a szűk keresztmetszet a jövőben, ez azóta sok szempontból megerősítést nyert. A jövőben fel kell készülni az öntözéses növénytermesztésre, és a talaj vízkészletének megőrzését segítő agrotechnikai módszerekre, hiszen a sztómaellenállás és a légtér hőmérséklet változásaiból arra lehet következtetni, hogy a klímaváltozás fokozódásával nem fogja fedezni a természetes vízellátás a növény vízigényét, ez pedig kiemelten fontos a kukorica termesztése esetében (Keményné et al. 2019).

2.4 Precíziós gazdálkodás

Földünkön a rendelkezésre álló művelésbe vonható terület 51 milliárd hektár, melynek 18%-a, vagyis körülbelül 9 milliárd ha termékeny szárazföld. Ebből a 9 milliárd termékeny területből 1,4 milliárd ha szántó és 0,2 milliárd ha ültetvény. Érdekes megemlíteni, hogy az 1,4 milliárd ha-os szántó 50%-án (700 millió ha-on) folyik gabonatermesztés (Horváth & Komarek, 2016). Napjainkban a mezőgazdaság számtalan problémával és kihívással néz szembe. Ezen problémák közé tartozik az is, hogy a világ népessége folyamatos növekedést mutat. Egyes becslések alapján évente 75 millió fővel nő a népesség, és 2025-re már elérheti a 8 milliárdot

is Földünk népessége (Dobos, 2013). Ebből is látható, hogy az egyik legfontosabb kihívás a mezőgazdasággal szemben, hogy ezt az egyre növekvő népességet képes legyen elegendő élelmiszerrel ellátni. A népesség növekedésével csökken az egy főre jutó erőforrások nagysága, ezt tükrözi az is, hogy 1960-2010 között az 1 főre jutó szántóterület 0,41 ha-ról 0,23 ha-ra esett vissza és minden előrejelzés arra mutat, hogy ez tovább fog csökkenni és 2050-re akár már a 0,2 ha-t sem fogja elérni. Tehát egyre kisebb területre korlátozódik 1 fő élelmiszerigényének előállítási lehetősége. A népesség növekedésével a mezőgazdasági termékekre is növekszik az igény, mely kiemelt jelentőségű a hústermékek, tejtermékek és zöldségek esetében. Becslések szerint a világon a fontosabb növényi termékek felhasználása az alábbiak szerint fog növekedni: búza + 16,2%, egyéb gabona + 20,4% rizs + 18%, cukor + 23,4%, növényolaj + 43,7%, olajosmagdara + 24,8% (Horváth, Komarek 2016). Elmondható, hogy a világon körülbelül egymilliárd ember éhezik folyamatosan és szinte ugyanennyi alultáplált. Ahhoz tehát, hogy élelmiszerbiztonságot és energiabiztonságot tudjunk elérni, mindezt fenntartható módon, jelentős mértékben át kell alakítani a mezőgazdaságot. A hagyományos technológiával zajló élelmiszer-termelés nem tud lépést tartani a népességnövekedéssel, mi több, a nem fenntartható vízgazdálkodás és az alacsony hatékonyságú, elavult technológiák csökkentik a talaj termékenységet, vízkészletét és szennyezik a környezetet. Fontos kiemelni, hogy az élelmiszerhiány mellett a vízkészlet kimerülése is jelentős veszélyként áll fenn, amit az elavult technológiával történő gazdálkodás felgyorsít, valamint a növekvő húsfogyasztás is hozzájárul a vízfelhasználás növeléséhez (Horváth, Komarek 2016). A mezőgazdaság felelős a legnagyobb mértékben a vízfelhasználásáért, fejlődő országokban ez a vízfelhasználás 90%-a is lehet. Jó példa erre, hogy a világ legnagyobb gabonatermelő országai (India, Kína, USA, Arab-félsziget országai) a felszín alatti vizek mennyiségét évente 160 milliárd köbméter felett csökkentik, kiemelendő példa Szaúd-Arábia, ahol a vízigény 75%-a talajvízből származik, mely következtében a vízkészletek hamarabb kimerülhetnek, mint az olajmezők (akár 40 éven belül) (Dobos, 2013).

Olyan változásokra van szükség, melyek változatos termelési minták felé mozdítják a gazdálkodást, tükrözik a mezőgazdaság többfunkciós szerepét, képesek zárt tápanyagkörforgást fenntartani és a környezet védelmére is kiemelt hangsúlyt helyeznek (Horváth, Komarek 2016). Ezeket a célokat korszerű technológiával lehet elérni, mely a precíziós gazdálkodás által valósul meg. A precíziós vagyis helyspecifikus, a tábla heterogenitásához illeszkedő módszerek során, lehetőség nyílik olyan fenntartható gazdálkodás folytatására, mely minimálisra csökkenti a környezetterhelést ugyanakkor az ökológiai potenciált megfelelően képes kihasználni. Ezzel a

technológiával lehetővé válik, hogy optimalizáljuk a táblán végzett kezeléseket, pontos tápanyagvisszapótlást és növényvédőszer kiadagolást valósítsunk meg, ami a környezetterhelés csökkentése mellett költséghatékony is (Dobos, 2013). A precíziós gazdálkodás alapja a GPS (Global Position System), vagy az európai GALILEO rendszer, amelyek globális helymeghatározó rendszerek, ahol a helymeghatározást a Föld körül pontosan ismert pályákon keringő műholdak rendszere teszi lehetővé.

2.5 Növényzet távérzékelése

A távérzékelés az egyik legdinamikusabban fejlődő tudományterület, mellyel képesek vagyunk nyomon követni a Földön zajló változásokat. Ezeket a földfelszínen történő változásokat (pl. növényzet növekedése, termés hozama, felszínborítás) különböző érzékelőkkel, radiométerekkel, radarokkal, lézerszkennerrel (LIDAR) felszerelt műhold, repülő, helikopter, drón, UAV (pilóta nélküli légi jármű – unmanned aerial vehicle) segítségével tudjuk monitorozni. Vannak passzív érzékelők, melyek csak a felszínről visszavert napsugárzást mérik, és vannak aktív érzékelők, melyek a maguk által kibocsátott jelek visszaverődését érzékelik (Molnár & Somogyi, 2020). Az ilyen módszerek előnye, hogy nemzetközileg is elfogadott pontos eredményeket kaphatunk az élő rendszerek állapotáról, mindezt rövid idő alatt, viszonylag alacsony költséggel. A változatos földfelszín anyagi sajátosságai miatt eltérő reflektancia értékeket kapunk, melyek különböző hullámhossz-tartományokban is eltérnek, ezeket spektrális görbén tudjuk rögzíteni. Spektrális görbe által meghatározható, hogy melyik hullámhossz-tartományban a legoptimálisabb az adott tulajdonság vizsgálata. A multispektrális kamerák többnyire a látható fény elektromágneses tartományában, valamint a közeli és távoli infravörös tartományban üzemelnek. A nagyobb spektrális lefedettséggel és finomabb spektrális felbontással rendelkező eszközök a hiperspektrális szenzorok. Műholdas rendszereknél 3-10 vagy maximum 15 csatorna van, minden csatorna eltérő alkalmazási területen használható fel, melyet a 2. táblázat is szemléltet (Dobos, 2013).

2. táblázat: Csatorna hullámhosszok alkalmazási területei (Dobos, 2013)

Csatorna és hullámhossz (mikrométer)		Alkalmazási terület
1.	0,45-0,515	Tengerparti vizek térképezése, víztestek felszíni részének vizsgálata, talaj és vegetáció-térképezés.
2.	0,525-0,605	A vegetáció reflektancia görbájén jelentkező két klorofill (klorofill-a, klorofill-b) elnyelési pont közötti csúcs megfigyelése
3.	0,63-0,69	Klorofill abszorpciós csatorna vegetáció elkülönítésére.

4.	0,75-0,90	Vegetációtérképezés, biomassza-mennyiség meghatározás, víztestek lehatárolása.
----	-----------	--

A növények távérzékelése esetén a növények fényelnyelési és visszaverési arányának változatossága teszi lehetővé a távérzékeléses képalkotást. Műholdas módszerekkel a növényt ért stresszhatások, ezáltal a növény egészségi állapota is vizsgálható, de ilyen módszerekkel képesek vagyunk a produkciót és az időbeli változásokat is nyomon követni. Stresszhatásokra megváltozik a növény anyagcseréje ezáltal a levél fényelnyelési, spektrális tulajdonságai is átalakulnak. Ezek a változások a vegetációs index értékekben is detektálhatók. A szakirodalomban több, mint 150 vegetációs indexet tartanak számon, melyek a különböző hullámhosszokon (főleg 400 és 2500 nm közötti spektrum) mért reflektancia-értékek kombinációjával számíthatók ki. A normalizált különbség vegetációs index, vagy NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) egy olyan dimenziómentes mérőszám, amelyet széles körben alkalmaznak a térinformatikában és a mezőgazdaságban is. Használatával képesek vagyunk egy adott terület vegetációs aktivitását (fotoszintetikus aktivitását) kifejezni, mivel az index értéke korrelál a növényzet fajlagos klorofill tartalmával és a biomasszával. Az NDVI értékét a növényzet által közeli infravörös (NIR) tartományban és a látható vörös (RED) sugárzási tartományban visszavert értékek különbségét és összegét elosztva kapjuk meg.

$$NDVI = (R_{NIR} - R_{RED}) / (R_{NIR} + R_{RED})$$

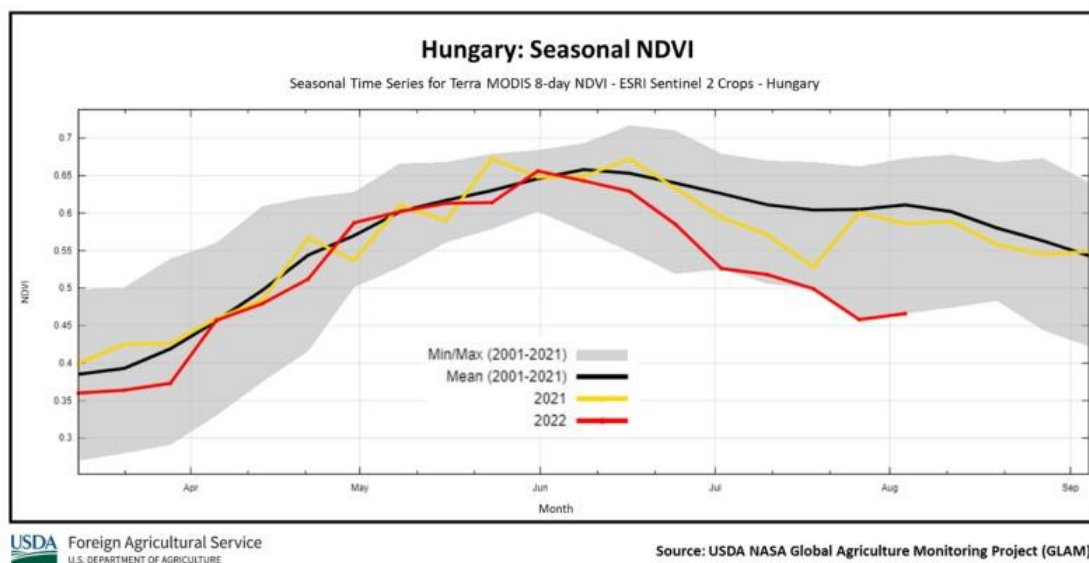
Az NDVI értékek a levélszíneződés (szenszcencia) és levélvesztés detektálására is alkalmasak. Az egészséges növényzet a látható (vörös) tartomány nagy részét elnyeli, a közeli infravörös tartományban azonban visszaveri a sugárzást, tehát minél több a látható tartományban az elnyelődés, és a közeli infravörös tartományban a visszaverődés, annál fejlettebb a vegetáció. Károsodott vegetáció esetén nagyobb a látható tartományban a visszaverődés és az infravörös tartományban az elnyelődés (Diriczi, 2017). Az NDVI-ből egy standardizált NDVI értéket képeznek, és utána már automatikusan egy színskála segítségével jelennek meg az értékek a térképen. A normális állapottól negatív eltérések (károsodás) sárgától vörös színig, a pozitív eltérések (átlagnál jobb növekedésű, regenerálódott növény) zöld színnel kerülnek jelölésre a térképen. Károsodást okozhat számos tényező így gombafertőzés, vírus, baktérium, hő stressz, vízhiány stb., melyek a térképről nem derülnek ki, így a valódi okok feltárásához meteorológiai információkat kell gyűjteni és terepi vizsgálatokat kell végezni (Molnár, Somogyi 2020). A fejlettebb műholdas technológiának köszönhetően (pl. Sentinel műholdak) mára már a nagy felbontás lehetővé teszi, hogy egyre pontosabban határozzuk meg

a növényzet egészségi állapotát. Erre jó példa az 3. ábra, melyen a Bükk-hegység erdejének 2017 tavaszán történt jégkár okozta változásai láthatók (Molnár, Somogyi 2020).



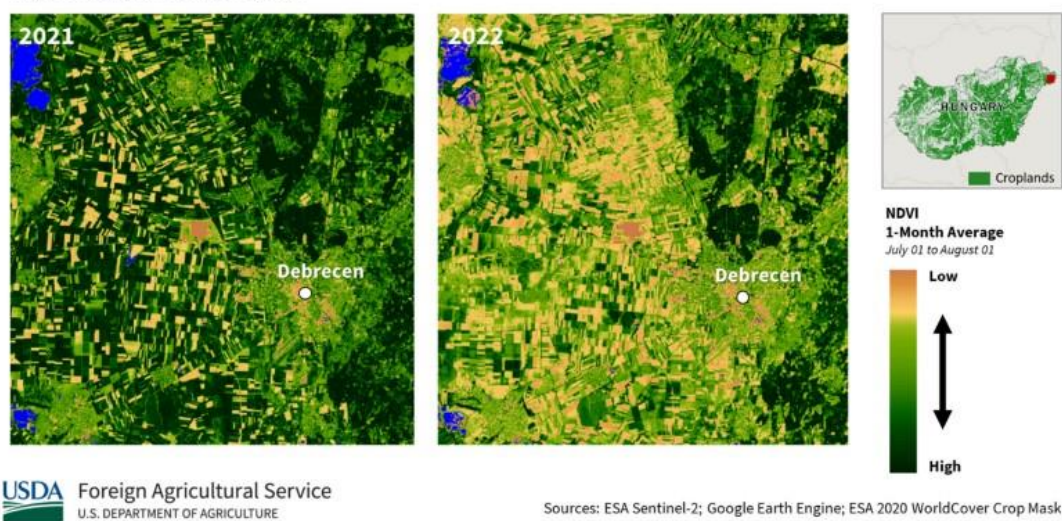
3. ábra: Jégkár a Bükk-hegységben 2017 tavaszán (Molnár, Somogyi 2020)

Szántóföldi kultúrák esetén is alkalmazható az NDVI, mely 0-1-ig terjedő skálán szemlélteti a vizsgált terület állapotát. Értékei a következőképpen alakulnak: 0-0,3-ig növényzetmentességet jelöl, 0,3-0,4 között csíranövény/betakarítás utáni gyomok előfordulását jelzi, 0,4-0,6 között alacsony és átlagos vegetációs fejlődésre utal, a 0,6-nál magasabb érték pedig ideális, egészséges, sűrű növényzetet jelez (Molnár, Somogyi 2020). Szemléletes példaként szolgálhatnak az NDVI hasznosításának szempontjából a NASA műholdas felvételei, melyek a termésátlagok alakulásának összehasonlítását is lehetővé teszik (4. ábra). A 2022-es nyár során fellépő szárazság és szélsőségesen magas hőmérséklet következményeként, az Európai Unió 2022/23-as kukoricatermését 60 millió tonnára becsülik, ami 15%-kal kevesebb a tavalyi értékhez képest. Magyarországon is jelentős károkat okozott a nagymértékű szárazság, 1,5 millió tonnával csökkent a kukoricatermés, várhatóan pedig 6,2 millió t lehet az össztermés. A NASA felvételei alapján látható, hogy Kelet- Magyarországon a 2021-es évhez képest, sokkal kedvezőtlenebb körülmények alakultak 2022-ben, melyet a csökkenő vegetációs index is jól szemléltet (5. ábra) (Dukhnytskyi, 2019).



4. ábra: Magyarország szezonális NDVI értékei (Forrás: USDA)

Hajdú-Bihar, Hungary: NDVI
Summer Crops: Corn and sunflower production fields
July 01 to August 01, 2021 vs. 2022



5. ábra: Hajdú-Bihar NDVI értékei 2021 és 2022 nyarán (Forrás: USDA)

A levélmorfológia is hatással van a visszaverődésre és kibocsátásra, a közepső infravörös tartományban ezt a levélen belüli víz elnyelése határozza meg. A távoli infravörös tartományban pedig az elnyelt sugárzást kibocsátják, feketetestként működnek. A mezőgazdaságban is számos területen alkalmazzák a vegetációs indexeket, például: növények műtrágya igényének meghatározására, kijuttatott hatóanyagok hatásának felvételezésére, vízigény felmérésére. Kiemelt jelentőségű a mezőgazdaság szempontjából, hogy

távérzékeléssel megoldható akár a termésbecslés, gyomosodás, növénykárosodás, talajterképezés, erdőgazdálkodás és biomassza-produkció vizsgálata is (Mika et al., 2011).

2.5.1 Növényi stressz kapcsolata a fluoreszcenciával és reflektanciával

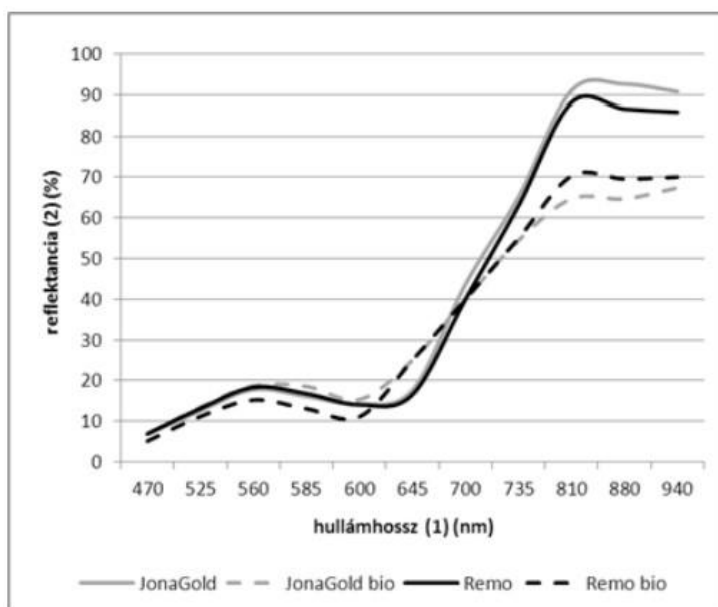
A növények számára a megfelelő fejlődésükhöz és növekedésükhöz csak ritkán, esetleg rövid időszakokban áll rendelkezésre a környezeti tényezők optimális kombinációja. Mivel helyváltoztatásra nem képesek, ezért a kedvezőtlenül ható környezeti tényezőknek teljes mértékben ki vannak téve (Tuba, Csintalan 2009). A környezeti terhelések korlátozhatják a növények teljesítményét, fejlődését, szaporodását, melyekhez egy bizonyos szintig képesek alkalmazkodni, így képesek a kedvezőtlen körülmények között is növekedésre, felfenntartásra (Tamás et al., 2013). A szervezet számára megterheléssel járó, normálistól eltérő változásokat kialakító helyzetek megnevezésére a stressz szót alkalmazzuk. Általánosan megfogalmazva a stressz a környezeti állapotváltozás hatására bekövetkező olyan változás a szervezetben, amely már az életre veszélyes (Szigeti, 2018). A környezeti tényező akkor lesz stressztényező, ha korlátozott vagy éppen túlzott formában jelenik meg. A stressztényezőket csoportosíthatjuk eredetük szerint természetes tényezőkre (pl. hirtelen hőhatások) és antropogén tényezőkre (pl. légszennyezés). Feloszthatjuk még abiotikus, vagyis élettelen tényezőkre (pl. korlátozott vízellátás), és biotikus tényezőkre, melyekbe a növényt körülvevő élő szervezetek (pl. mikroorganizmusok, kártevők) tartoznak. Mindegyik stresszor élettani alkalmazkodásra készíti a növényt, mely termésvesztéshez vezethet. Az alkalmazkodás folyamatát akklimatizációnak nevezzük. Molekuláris szinten elmondható, hogy minden növény hasonlóan reagál az abiotikus stressztényezőkre, ilyen stresszválaszok például a membrándegradáció, ozmotikumok felhalmozása, speciális fehérjék indukálása és oxigén szabadgyökök keletkezése, melyek a növény védekezését segítik. Membrándegradáció nehézfémek, légszennyező anyagok hatására következhet be, melynek jelei a plazmolízis és a levelek elhalása, nekروزisa. Az oxigénszabadgyökök is a membránokat károsítják, oxidálják a membrán zsírsavait, megbontják a bennük lévő glicerol és zsírsav közötti kötéseket. Szárazság és sóstressz hatására ozmotikumok halmozódnak fel, ilyen ozmotikum például a prolin, mely a növény ozmotikus egyensúlyát segíti. Magas és alacsony hőmérsékleti stressz esetén speciális fehérjék indukálása következik be, így például hősokkfehérjék keletkeznek, melyek a növény védelmében játszanak szerepet. A legfontosabb abiotikus stressz hatására keletkező változás azonban a reaktív oxigén szabadgyökök keletkezése, ilyen például: szinglett oxigén, szuperoxid anion (O_2^-), hidroxil gyök ($OH^\cdot$), fitotoxikus hidrogén-peroxid (H_2O_2), melyek az élő szervezetet károsítják

membránoxidáló vagy fehérje, nukleinsav degradáló hatásukon keresztül (Bratek et al., 2013, Tuba, Csintalan 2009).

A stresszorok a fotoszintetikus apparátus megváltozását és akár károsodását is okozhatják, így a fotoszintetikus pigmentek (klorofill-a) fluoreszcencia sajátosságait is megváltoztathatják, valamint hatásukra metabolitok is keletkezhetnek a növényekben, melyek sajátos fluoreszcencia jellemzőkkel bírnak (Tamás et al., 2013). A kék és zöld spektrális régióban kibocsátott fluoreszcencia vörös és távoli vörös fluoreszcenciához viszonyított aránya számos információval szolgálhat a stresszélettan vizsgálatához, melyhez multispektrális leképező rendszerek állnak rendelkezésre (Tamás et al., 2013). A fluoreszcencia a gerjesztett energia egyetlen kvantum, elektromágneses formában (fotonként) fénykisugárzásként történő energialeadása (Bratek et al., 2013). Ma már rendelkezésre állnak olyan klorofill fluoreszcencián alapuló légi módszerek, amelyekkel képesek vagyunk a növényzet állapotát és termelését felmérni. A klorofill-fluoreszcencia mérések a növény egészségi állapotát és a fotoszintetikus apparátus állapotát is képesek jelezni. A módszer azon az elven alapul, hogy klorofill-fluoreszcencia csak a fotoszintetikusan aktív zöld részekből érkezik, a károsodott, stresszkörülményekkel terhelt növények fluoreszcencia értékei eltérőek lesznek (Tuba, Csintalan 2009). A stressz típusától és a növény válaszreakciójától függően nőnek vagy csökkennek a különböző fluoreszcencia arányok. Olyan stresszorok hatására, mint például a N-hiány, túlzott megvilágítás, lecsökken a klorofill-a vörös fluoreszcenciája, és az F440/F690 fluoreszcencia arány megnövekszik, azonban ezek a stresszorok a klorofill destrukciójához és a bioszintézis lassulásához is vezethetnek, ami pedig az F690/F740 arány növekedését okozza. A különböző fluoreszcencia arányok tehát jól jelzik a fiziológiai állapotváltozásokat, főleg az F440/F690 és F440/F740 arányok reagálnak érzékenyen a különböző stresszhelyzetekre, ezért kitűnő korai stresszindikátorokként alkalmazhatók. A levélben a fluoreszcencia eloszlásának leképezésére is van lehetőség, mellyel akár egy patogén levélen belüli terjedését is nyomon lehet követni (Tamás et al., 2013). 2025-re az ESA FLEX (Fluorescence Explorer) innovatív program keretében, lehetővé válik a növényzet fluoreszcenciájának globális feltérképezése, így a fotoszintetikus aktivitás nyomonkövetése, mely egy nagyfelbontású fluoreszcencia képalkotó spektrométer (FLORIS) segítségével valósul meg. A program nagy jelentőséggel bírhat az élelmiszerbiztonság tekintetében is.

Hasonlóan a fluoreszcenciához, távérzékeléssel módszerekkel a növények reflektanciáját is tudjuk mérni, ami szintén a növényzet állapotáról ad tájékoztatást, így például a különböző károkról és a növényzet stresszeltségéről. Ennek hátterét az adja, hogy az egészséges növények

állandó reflektancia spektrummal bírnak a látható 400-tól 700 nm-ig és a közeli infravörös, tehát 700-900 nm-ig terjedő tartományban, azonban ha a növény károsodik, akkor az alacsonyabb fotoszintetikus pigmenttartalma miatt, az 500 és 650 nm között megnövekszik a reflektancia, a közeli infravörös tartomány (800 nm) pedig csökken. Ezeket a változásokat tudjuk mérni reflektancia mérésekkel (Tuba, Csintalan 2009). Ezt jól szemlélteti az 6. ábra is. Az ábrán a JonaGold és a Remo almafajta integrált és bio termesztéséből következő eltéréseket láthatjuk a spektrális értékek összehasonlításával. Az ábrából látható, hogy az azonos termesztéstechnológiájú almafajták reflektancia értékei között nincs nagy eltérés, azonban az egyes fajtákon belül az integrált és bio egyedek között már jelentős különbséget tapasztalunk. Ez abból adódik, hogy a bio termesztésű egyedek levelén különböző baktériumok és gombák találhatók, - 75-90%-ban a lisztharmat (*Podosphaera leucotricha*) gombás megbetegedés a kórkép kiváltója (Nagy et al., 1997).



6. ábra: A JonaGold és a Remo fajtán belüli spektrális eltérések (Nagy et al., 1997)

3 Anyag és módszer

3.1 Laboratóriumi mérések

A kísérlet laboratóriumi része a MATE, Szent István Campus, Növénytermesztési-tudományok Intézet, Növényélettan és Növényökológia Tanszékhez tartozó laborban, Gödöllőn zajlott. A kísérlet 2 ismétlésben történt, melyhez ugyanabból a fajtából való vetőmagvak kerültek használatra, mint a szántóföldi méréseknél. A kukorica magvak csíráztató tálcára kerültek (7. ábra), majd 10 nap után, 24 db kicsírázott kukorica, tápoldatokat tartalmazó 1 literes üvegedényekbe került (8. ábra). 3 féle különböző tápanyag összetétellel beállított tápoldatban neveltük a növényeket, egy sorozatban tápoldatonként 8 növény vizsgálata valósult meg. A tápoldat egy módosított Hoagland-féle tápoldat volt (Taiz et al., 2014), amelyben a nitrogén mennyiségét módosítottuk (3. táblázat). A különböző tápoldatokban történő neveléskor az volt az elsődleges szempont, hogy különböző állapotú növényeink legyenek, ehhez a nitrogén koncentrációjának változtatását választottuk eszközül, hiszen szántóföldi viszonylatban is ez egy meghatározó elem.

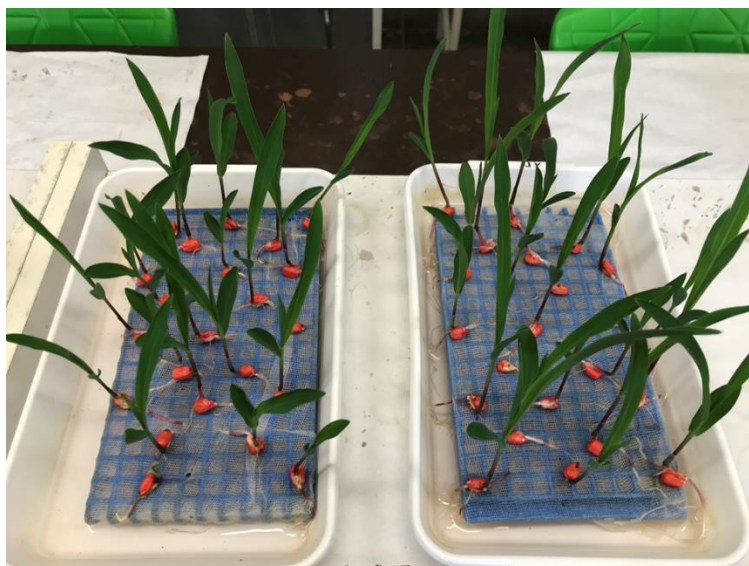
3. táblázat: A kísérlet során használt tápoldatok N tartalma

FULL	kontroll, 100%-os tápoldat, N tartalom: 238 ppm
N10%	10% N hiányos tápoldat, N tartalom: 23,8 ppm
N50%	50% N hiányos tápoldat, N tartalom: 119 ppm

A tápoldatok 5 l-es Erlenmeyer lombikokban kerültek elkészítésre. A törzsoldatok különböző makroelem és mikroelem koncentrációkat tartalmaznak. Elsődlegesen a nitrogén, mint makroelem eltérő koncentrációjának hatásaira került a hangsúly, a többi makroelemet és mikroelemet azonos koncentrációban tartalmazzák a tápoldatok. A törzsoldatok elkészítése ioncserélt vízzel történt, így biztosak lehettünk abban, hogy csak az általunk beállítani kívánt mennyiségekben tartalmazza az oldat a különböző elemeket. A tápoldatok beállításánál az volt a célunk, hogy eltérő és változatos növényeink legyenek a kísérlet során, és ezt a változatosságot összehasonlításokkal elemezzük, melyből információhoz tudunk jutni a különböző stressztényezőket illetően.

A növények hetente friss tápoldatot kaptak, melyre azért volt szükség, hogy mindig a tápoldat receptnek megfelelő koncentrációban kapják a különböző arányban beállított tápanyagokat. Az edények mindig úgy kerültek felöntésre a tápoldattal, hogy a teljes gyökér az oldatban legyen, tehát megfelelően tudja felvenni a növény a tápanyagokat. Az üvegedények az algásodás elkerülése érdekében alufóliával lettek bevonva, valamint egy lyukakat tartalmazó tető is került az üvegre, mely egyrészt azt a célt szolgálta, hogy a növény megálljon az üvegben, de

szellőztetés szempontjából is előnyös volt a lyukak megléte. A növények növekedésével egy fapálcát is állítottunk a tápoldatba, mely a növény megtartását segítette. A növények kontrollált körülmények között növekedtek 7 hetes korig. Így az állandó fényviszonyok, hőmérséklet és páratartalom mellett biztosítva volt a növekedésük, amit a mesterséges körülményeknek köszönhetően csak a beállított stresszhatások befolyásoltak. A 6. tápoldat csere során, a kísérleti növények első mérésére is sor került, melyek a következők voltak: reflektancia-mérés, fotoszintézis mérés, fluoreszcencia -és CO₂ felvétel mérés. A mérések után két stressztényező került bevezetésre: kétféle koncentrációban (100 és 200 g/kg) PEG 6000 (polietilén-glikol), mellyel szárazságstresszt idéztünk elő, a másik stressztényező pedig a hőstressz volt, melyhez hőkamrába kerültek a növények. A sorozatonként 8 növényből 2 kontroll (nem stresszelt), 2-2 szárazságstressznek (PEG100 és PEG200), és 2 növény hőstressznek lett kitéve. Az ismert, beállított stresszhatások reflektanciára, fluoreszcenciára, növekedésre gyakorolt hatásai kerültek ezzel vizsgálat alá. A növények hőstresszelése a következő lépésekben zajlott: 6 növény került klímakamrába, ahol még a stresszt megelőzően 20 °C-os hőmérsékleten voltak, majd ez 24 °C-ra emelkedett. A világítást reggel 7-kor kapcsoltuk be, ezt követően 5 óra alatt, (tehát 12 órára) már 40 °C-ra emelkedett, mely délután 2-ig fennállt. 2 óra után, 5 óra alatt, (tehát este 7-re) 24 °C-ra csökkent a hőmérséklet, és ez az éjszaka során is fennmaradt. A 40 °C-os hőstressznek 2 napig voltak kitéve a növények, a 3. napon zajlott a mérés. A szárazságstresszt laboratóriumi körülmények között polietilén-glikollal (PEG) idéztük elő. A PEG 100-as kezelés esetén 100g, a PEG 200-as kezelésnél pedig 200g polietilén-glikol került 1000 ml tápoldatba. A polietilén-glikol jelentősen csökkenti a víz ozmotikus potenciálját, ezáltal stresszként hat a növényre. Mivel a PEG nem képes bejutni az apoplastba, így a víz a növény sejteiből és sejtfalából vonódik ki az ozmózis miatt (van den Berg & Zeng, 2006). Kutatások már a kukorica esetén, csírázási %-ra, gyökérhosszúságra, hajtáshosszúságra, csírahosszra is vizsgálták a PEG különböző koncentrációjának hatását (Khodarahmpour, 2011). Az általunk beállított stresszhatásokat a 4. táblázat tartalmazza. Az utolsó, 7. tápoldatcsere után, a reflektancia-mérés, fotoszintézis mérés, fluoreszcencia és CO₂ felvétel mérések újra ismétlésre kerültek, és kiegészültek SPAD méréssel, pigmenttartalom-meghatározással, növény zöldtömeg méréssel majd szárított tömeg méréssel is.



7. ábra: 10 napos kukorica csírák a csíráztató tálcán

4. táblázat: A kísérlet során beállított stresszhatások

Növények	FULL	N10%	N50%
Stressz kódja: 0	Csak a beállított tápoldatkonzentráció hatása érvényesül, nincs kiegészítő másik stressztényező		
Stressz kódja: 1	PEG100-as kezelés, szárazságstressz (tápoldat ozmotikus potenciálja -0,148348 MPa)		
Stressz kódja: 2	PEG200-as kezelés, szárazságstressz (tápoldat ozmotikus potenciálja -0,490673 MPa)		
Stressz kódja: 3	Hőstressz		



8. ábra: Tápoldatba helyezett 10 napos kukoricacsírák (baloldal) és az 5 hetes növények (jobb oldal) fejlettségi állapota

3.2 Szántóföldi mérések

A kutatás során szabadföldi mérések és laboratóriumi mérések kerültek összehasonlításra. A szabadföldi vizsgálatok, mérések Somogy-megyében Nagycsepelyen a 2022. április 21-én elvetett kukorica állományban 2022. június 13-án történtek. A 9,6 hektáros táblában 5 különböző mintaterületen (plot) 5 pont került mérésre, így tehát 25 ponton történt adatfelvétel, melyet a 9. ábra is szemléltet. A mérések a piros vonalban, 300 m-en kijelölt domborzati grádiensen történtek, a kezdőpont és a végpont közötti szintkülönbség 12 m volt. A tábla emelkedése a műholdfotón is látható, hiszen az utolsó végpont egy eróziós foltban helyezkedik el, mely a domborzat magasságából fakadóan alakult ki. A kukorica vetése 2022. április 21-én történt, Piononer0023-as fajtájú vetőmaggal. A vetéskor hektáronként 300 kg 27%-os pétisó (N 27%, CaO 7%, MgO 5%) a kukorica sorok mellé, valamint hektáronként 15 kg pannonstarter (9 % N, 40 % P₂O₅, 1 % Zn) trágya is kijuttatásra került. A szántóföldön a következő mérések zajlottak: növények magassága, talajvíztartalom, levélhőmérséklet, reflektancia (spektrométer), fluoreszcencia (fluorométer), CO₂ felvétel (IRGA technika), pigmenttartalom (SPAD). A méréseket több térbeli ismétlésben végeztük, a mérőpontok koordinátáit nagy pontosságú GPS-el rögzítettük.



9. ábra: A vizsgált pontok elhelyezkedése (Forrás: Google Earth)

3.3 Vizsgált élettani paraméterek, ökofiziológiai változók

3.3.1 Fotoszintézis mérés

A fotoszintézis CO₂ felvételének méréséhez CIRAS-2 (PPSystem Egyesült Királyság) infravörös gázanalizátort használtunk (10. ábra). A mérést a növények kifejlett levelén végeztük, a gázanalizátor lámpájával megvilágítva, azonos hőmérsékleti és fényintenzitási

beállításokkal. A CO₂ felvétel mellett, leadás is történik (mitokondriális légzés, fotorespiráció), így a mérések során a nettó fotoszintézist mértünk. Hasonlóképpen, a terepi mérések során is infravörös gázanalizátort használtunk (LI-6400, Licor, USA), a megvilágítást azonban a terepen a napfény biztosította.



10. ábra: A CIRAS-2 gázanalizátor lámpája (baloldal) és a fotoszintézis mérése (jobb oldal)

3.3.2 LAI mérése

A levélfelület-index mérése szántóföldi körülmények között Accupar LP-80 ceptométerrel történt (Decagon Devices, USA). Ez egy hordozható, praktikus eszköz, ami a fotoszintetikusan aktív sugárzást méri a lombzat felett és alatt, ezáltal megállapítható a levélfelület. Az adatfelvétel során a növények magassága is lemérésre került.

3.3.3 Fluoreszcencia mérés

A fluoreszcencia mérést szántóföldön és laborban is FMS-2 (Hansatech, Németország) fluorométerrel végeztük (11. ábra). A mérést megelőzően egy klipsz segítségével a mérni kívánt pontot letakartuk, és 15-20 percig sötétben tartottuk. A sötétadaptáció során a reakciócentrumok oxidálódnak és a fluoreszcencia leáll. A mérések során alapfluoreszcenciát, maximális fluoreszcenciát, és változó fluoreszcenciát vizsgáltunk. A sötétadaptált leveleket kis intenzitású, modulált fénnel világítottuk meg, mely hatására 30-40 milliomod másodperc alatt, megkapjuk a fluoreszcencia lokális maximumát, ami az alapfluoreszcencia (F_0). A maximális fluoreszcencia (F_m), a folyamatos megvilágítás hatására telítődő PSII elektrontranszportot jelzi. Az alapfluoreszcencia és a maximális fluoreszcencia különbsége adja meg a változó fluoreszcencia értékét (F_v). A PSII reakciócentrum maximális kvantumhatékonyságát a változó fluoreszcencia és maximális fluoreszcencia hányadosából kapjuk meg (F_v/F_m). A megvilágítást 3 percig végeztük, mert ekkor éri el a fluoreszcencia a steady-state értéket (F_s). Ezt tudjuk a nap által kiváltott fluoreszcenciával (SIF) összehasonlítani, amit a terepi mérések során vizsgáltunk.

A rendelkezésre álló adatokkal Rfd (vitalitási index) értéket a következőképpen számoltunk: $(F_m - F_s)/F_s$ (Lichtenthaler et al., 2005).



11. ábra: Felhelyezett klipszek (baloldal), és a fluoreszcencia mérése (jobb oldal) FMS-2 fluorométerrel

3.3.4 Klorofill-tartalom mérés

A levelek klorofill-tartalmát SPAD-502 (Soil Plant Analysis Development) klorofillmérővel mértük laborban és terepen is. Ez egy egyszerű, hordozható diagnosztikai eszköz, amivel a levelek zöldességét, relatív klorofill-tartalmát tudjuk mérni, idő és helytakarékos és nem destruktív módon (Torres et al., 2005). Ezzel a műszerrel azonnal mérhető a levelek klorofill tartalma. A levélre ráhelyezett mérő, pár másodperc alatt kijelzi a relatív klorofill tartalmat, melyet a levélen áthaladó vörös és infravörös fény intenzitásának arányából számít, hátránya, hogy a mérési felület kicsi, mindössze 6 mm² (Dobos, 2013).

Emellett a mérések után mintát vettünk a mért levelekből, két-két 1 cm²-es korongot levélminta dugófúróval kifúrtunk, majd dörzsmozsárba raktunk. Hozzáadtunk 0,080-0,120 g kalcium-karbonátot, hogy gátoljuk a klorofill bomlását, valamint egy kevés kvarchomokot, hogy segítsük a minták eldörzsölését. 1 ml acetont hozzáadásával eldörzsöltük a mintát és eppendorf csőbe helyeztük, majd a 2 ml-es jelzésig acetonnal feltöltöttük. A mintákat 5 percig 10000-es fordulatszámon centrifugáltuk. A lecentrifugált pigmentoldatból 1,2 ml-t szűkített küvetába pipettáztunk és spektrofotométerrel elvégeztük az abszorbancia-mérést a megfelelő hullámhosszokon. A mérések közben referencia folyadéknak tiszta acetont használtunk. A pigmenttartalmakat Lichtenthaler & Buschmann (2001) alapján számítottuk a mért abszorbancia-értékekből.

3.3.5 Vegetációs indexek

Az adatfeldolgozáshoz különböző vegetációs indexeket (széles sávú és keskeny sávú) is számoltunk. Számos vegetációs index létezik, de ebben az esetben a spektrális és növényélettani szempontból jelentős indexek kerültek csak használatra. Ezekkel az indexekkel közvetett, de nem destruktív módon tudjuk becsülni adott vegetáció biomasszáját vagy működési jellemzőit (Balogh et al., 2016).

Széles sávú indexek multispektrális felvételekből állíthatók elő, ide tartozik az NDVI és a VIGreen index. Ebben az esetben a felvétel egy-egy sávja 50-100 nm széles tartományon érzékeny (multispektrális műholdak és egyszerű digitális fényképezők felvételei). Az egyik legfontosabb széles sávú vegetációs index, a normalizált különbség vegetációs index, vagyis **NDVI** (Normalized Difference Vegetation Index). Ezt az egészséges, zöld vegetáció műholdas vizsgálatára fejlesztették ki. A látható vörös és közeli infravörös sávok normalizált arányával kapjuk meg (Balogh et al., 2016).

$$NDVI = \frac{RNIR - RRED}{RNIR + RRED}$$

Az NDVI-hoz hasonlóan a látható vörös és zöld reflektanciák normalizált arányát számolja a **VIGreen** (Green Vegetation Index) is, mellyel infravörös felvétel hiányában is tudjuk vizsgálni a vegetációt (zöld tartományú reflektanciával számolt NDVI), előnye, hogy értéke a talajborítással lineárisan változik (Balogh et al., 2016). Esetünkben a VIGreen indexet fényképezőgéppel (Canon EOS 350D) készített képekből nyert adatokkal számoltuk ki. A képek feldolgozásához R programot használtunk. A digitális kamerák a színeket zöld, vörös és kék csatornában rögzítik, a VIGreen pedig a zöld és vörös normalizált aránya (Balogh et al., 2016).

$$VIGreen = \frac{RGrenn - RRed}{RGrenn + RRed}$$

Elemzésre került még az **NDRE** (Normalized Difference Red Edge) index is, mely a növények nitrogéntartalmával és klorofill-tartalmával áll kapcsolatban. Számítása az NDVI-hoz hasonlóan történik, de vörös sáv helyett vörös éllel számol. Jó mutatója a nitrogén ellátottságnak és a klorofill-tartalomnak (Boiarskii, 2019).

$$NDRE = \frac{NIR - REDGE}{NIR + REDGE}$$

3.4 Adatfeldolgozás

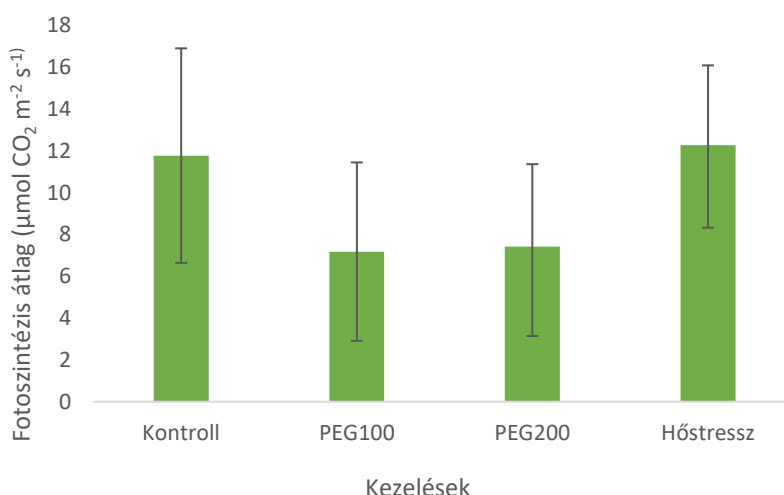
Az adatok feldolgozása, elemzése és kiértékelése MS Excel és R programokon keresztül valósult meg. A terepi adatokat kiegészítő Sentinel-2 műholdfelvételek letöltéséhez, kivágásához és a szükséges korrekciókhoz az R sen2r csomagját (Ranghetti et al., 2020) használtuk fel.

4 Eredmények és értékelésük

4.1 Labormérések

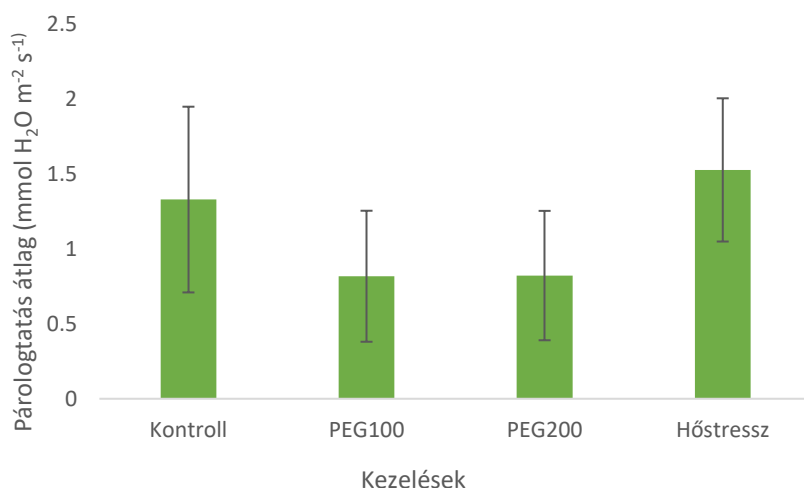
4.1.1 Fotoszintézis és transzspiráció értékek

A fotoszintézis (PN) adatok alapján (12. ábra) elmondható, hogy a kontroll növények, tehát amelyek, nem voltak stresszhatásnak kitéve, jobban fotoszintetizáltak, mint a vízhiánystressznek (PEG100 és PEG200) kitett növények. A vízhiánystressznek kitett növények, alacsonyabb fotoszintézis értékeket produkáltak, ám a két PEG kezelés között nem mutatkozik szignifikáns eltérés. Ezzel szemben a hőstressznek kitett növények magasabb fotoszintézis értékeket mutattak, melyre a kukorica C₄-es mivolta szolgálhat magyarázatul, hiszen ennek köszönhetően jól tud alkalmazkodni a hőmérséklet növekedéséhez, felső kompenzációs pontja 50-60 °C-nál található (Tuba, Csintalan 2009). A hőstresszelt növények fotoszintézise nem tért el a kontrolltól (12. ábra).



12. ábra: Fotoszintézis átlagai a különböző kezelések során (átlag ± szórás)

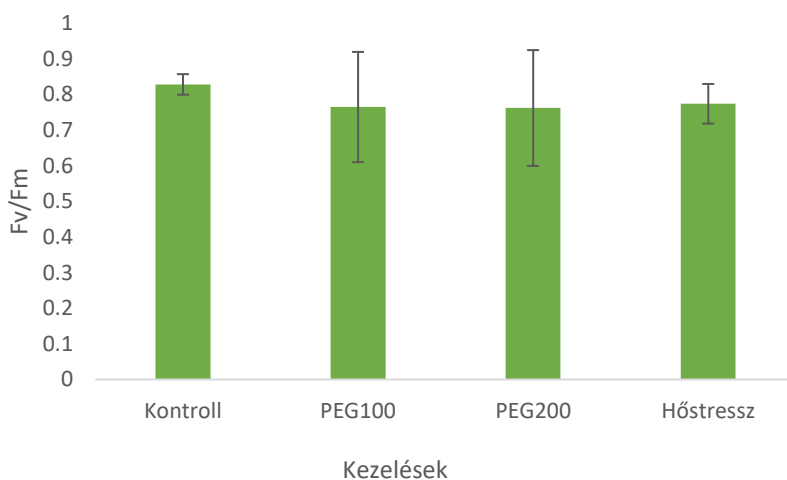
A párologtatás esetében elmondható, hogy a kontroll csoportba tartozó növényekhez képest, a vízhiánystressznek kitett növények (PEG100, PEG200) kevésbé párologtatnak. Ennek élettani magyarázata, hogy vízhiány esetén a párologtatás csökkentésének érdekében sztómazáródás jön létre (Tuba, Csintalan 2009). Mivel a párologtatás a fotoszintetikus aktivitással arányosan változik, így PN átlagok esetében a hőstressznél fellépő magasabb értékek a párologtatás esetében is megjelennek, amit a 13. ábra is szemléltet.



13. ábra: A transzspiráció változása a különböző kezelések során (átlag ± szórás)

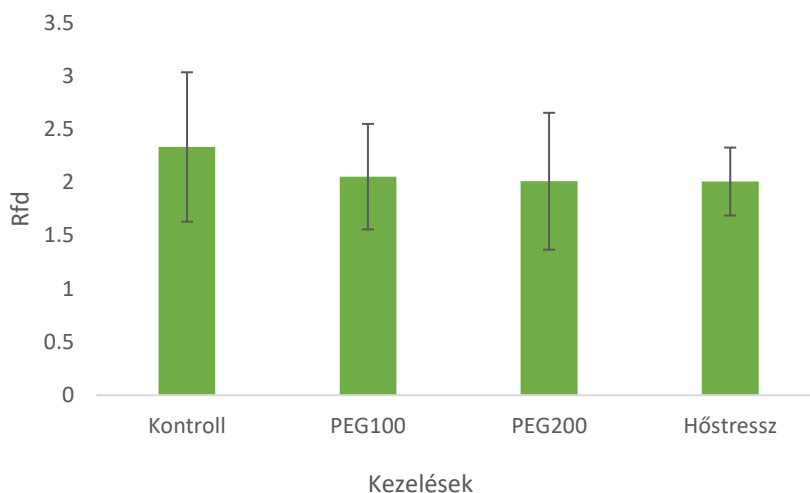
4.1.2 Fluoreszcencia paraméterek

A fluoreszcenciát az F_v/F_m és R_{fd} (vitalitási index) értékeivel szemléltetjük. Az F_v/F_m a változó fluoreszcencia és maximális fluoreszcencia hányadosa, mely a PSII reakciócentrum maximális kvantumhatékonyságát jelzi (Lichtenthaler et al., 2005). Ez a mutató a fotoszintézissel áll pozitív kapcsolatban. Mivel fluoreszcencia csak a fotoszintetikusán aktív zöld részekből érkezik, a károsodott, stresszel terhelt növények fluoreszcencia értékei megváltoznak (Tuba, Csintalan 2009), így ez az érték is a stresszelt növények esetében alacsonyabb lesz. A 14. ábra adataiból is látszik, hogy a kontroll csoport esetén, ahol a legmagasabb a fotoszintézis, ott veszi fel az F_v/F_m is a legmagasabb értéket, majd a szárazságstressznek kitett növények esetén csökkenő értékek jelennek meg, mely a hőstressz esetén is igaz, azonban ez kicsivel magasabb, mint a PEG kezelések értékei.



14. ábra: F_v/F_m átlagainak változása a különböző kezelések során (átlag ± szórás)

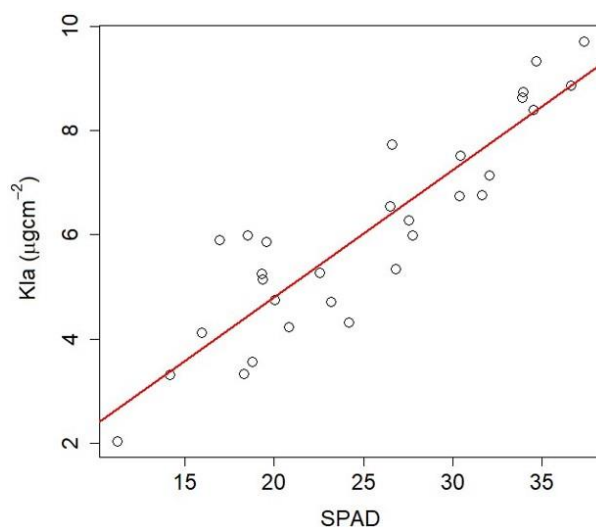
Szintén fluoreszcencia kimutatására alkalmas paraméter az Rfd (vitalitási index) (Lichtenhaler et al., 2005). A kontroll csoportnál a legmagasabb, stressz hatására azonban, akár csak az Fv/Fm esetén, ennek is csökken az értéke, mind a szárazságstresszelt és a hőstresszelt növények esetében is, a három stressztényező értékeiben nem jelentkezik szignifikáns különbség (15. ábra), illetve a kontrolltól sem térnek el szignifikánsan.



15. ábra: Az Rfd átlagainak változása a különböző kezelések során (átlag ± szórás)

4.1.3 SPAD mérések

A 16. ábra mutatja a kapcsolatot a SPAD és klorofill-a tartalom között. A megállapított összefüggést használtuk a terepen mért SPAD adatoknál is a pigmenttartalom becsléséhez, mely a következő: $(SPAD - 4.95) / 3.332$. Az ábrán látható, hogy a SPAD és a klorofill-a között szoros lineáris regresszió figyelhető meg, elmondható, hogy a minél nagyobb a SPAD érték, nagyobb klorofill-a tartalommal párosul.

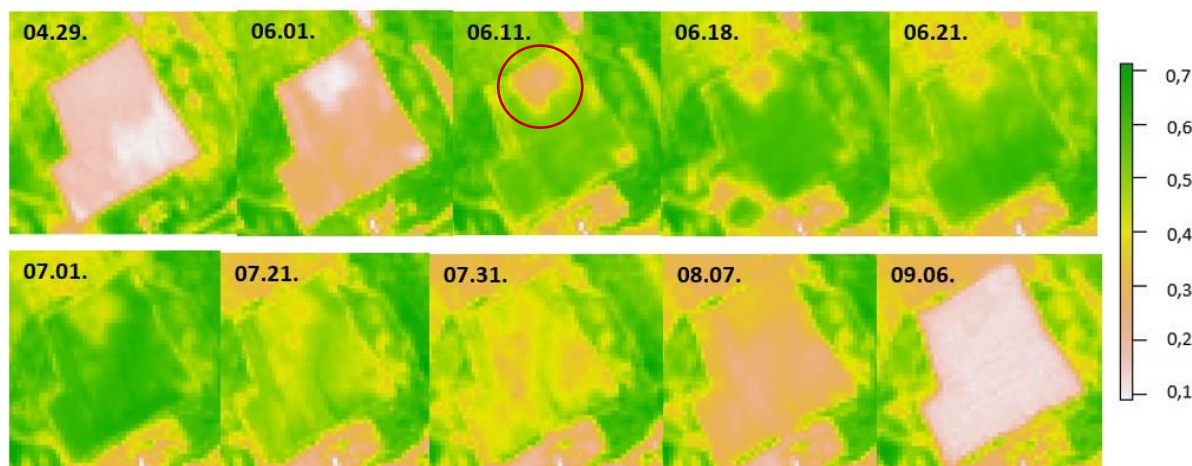


16. ábra: SPAD és a klorofill-a tartalom közötti lineáris regresszió

4.2 Szántóföldi mérések

4.2.1 Műholdfotó feldolgozás

A 17. ábra szemlélteti az NDVI alakulását és a vegetáció változását műholdfelvételek alapján, április 29-től szeptember 6-ig. A képek 10 m x 10 m-es felbontásúak, melyek a Sentinel-2 műholdfelvételek alapján, R programban kerültek feldolgozásra. Az NDVI értékeiből a növényzet állapotára következtethetünk. Jól látható, hogy a piros körrel jelzett eróziós foltban a növényzet NDVI értéke 0,1-0,2 értékek között mozog, melyet a képeken halvány sárgás szín jelöl. Ezt már a terepi mérések is igazolták, hiszen ebben a foltban voltak a legalacsonyabb fejlettségű/magasságú növények a táblán. Az eróziós foltban található legmagasabb érték 0,4 körül alakul júliusban, ám ez is jóval csekélyebb, a tábla állományának többi részéhez képest, hiszen az eróziós területet kivéve, júliusban 0,6-0,7 közötti érték látható, melyet zöld szín jelez a képen. Június elején csapadékosabb időjárás volt jellemző, mely a növényzet szép kezdeti fejlődését segítette (18. ábra). Azonban ezt követően nem volt jellemző csapadék az aszályos nyárnak köszönhetően, ez a műholdfelvételekből is látható. Július elején még magas értéket mutat az NDVI (0,6-0,7), azonban ez július végére már erősen lecsökken, 0,4 körüli értéket vesz fel. Látható, hogy augusztusban már az egész tábla 0,2-0,3 értéket vesz fel, mely a kukorica aszály által kiváltott szárazságstresszeltségének köszönhető, hiszen az állomány kiszáradt, megsárgult. Ekkor már az eróziós folt sem különül el élesen a táblából.



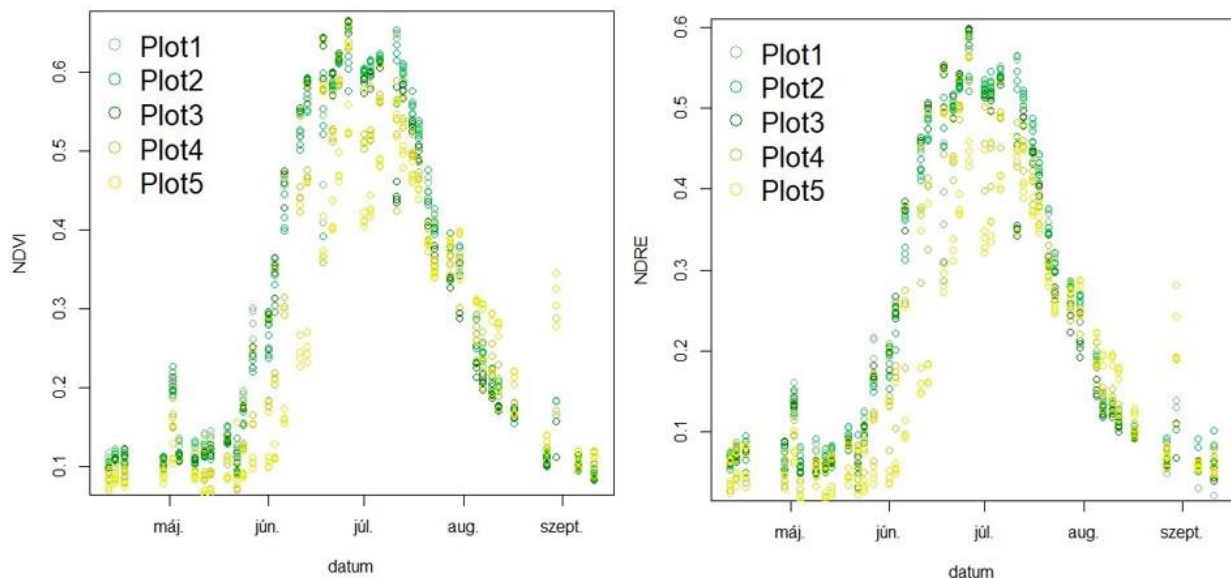
17. ábra: Az NDVI változása műholdfelvételen (Forrás: Sentinel-2 műholdfotók)



18. ábra: Az állomány 06.07-én (baloldal) és 08.09-én (jobb oldal)

A mérések során felvett pontok konkrét NDVI értékei is kielemezhetők és ezek összehasonlíthatók a Sentinel-2 műholdfotók alapján, R program használatával, amit a 19. ábra szemléltet. Az NDVI indexet gyakran használják a szakirodalomban a növényi produkció becslésére, vagy a növényi aktivitás nyomon követésére (Shammi & Meng, 2021). Az ábrán az 5x5 pont NDVI értékeinek alakulása látható áprilistól szeptemberig. A plot az 5 különböző mintaterületet, jelenti, ahol 5-5 mérést vettünk fel, elhelyezkedését a 9. ábra szemlélteti. Látható, hogy az 1-es, 2-es és 3-as plotok, vagyis a tábla eróziós foltján kívüli pontok NDVI értékei a legmagasabbak, minden hónap esetén. Az április közepétől-május végéig látható alacsony NDVI (0,1-0,2) a csírázó, kezdeti fejlődési szakaszban levő állományt jelzi, azonban már itt is élesen elkülönül az eróziós folt állománya, hiszen ez jóval alacsonyabb értéket vesz fel. Júniustól már erőteljes fejlődésnek indul az állomány (ez már a műholdfotókon is megfigyelhető volt), 0,3-ról június végéig már 0,6 fölé emelkedik az index. Kiugróan magas értékeket (0,7) figyelhetünk meg június vége-július eleje között a tábla első három pontjában felvett értékeknél, ez volt a vegetáció csúcsidőszaka, ekkor a műholdfelvételeken is láthatóan a legzöldebb a tábla (06.21 és 07.01 dátumoknál). Ekkor viszont élesen kitűnik az eróziós folt állományának elmaradott fejlettsége. Ez a görbén is leolvasható, hiszen a sárga értékek (4-es és 5-ös pontok) ebben az időszámban is csak maximális értéket nézve 0,5-0,6 között vannak, amikor a tábla többi részén a legnagyobb 0,7 NDVI értékkel bír az állomány. Július közepétől már csökkenő tendenciát mutat a görbe, augusztusra már maximálisan is csak 0,3 körüli értéket láthatunk, majd szeptemberre már 0,1 alá csökken az index. Hasonló ábrát kapunk és hasonló tendenciát figyelhetünk meg a különböző pontok értékei között, akkor is, ha az NDRE index értékeit tanulmányozzuk a műholdfotók alapján. Cammarano et al. (2011) munkájában az NDRE indexből származtatott klorofill-index és a növényi nitrogéntartalom között jó összefüggést talált. Ebben az esetben is a kezdeti fejlődés szakaszában (április-május vége) alacsonyabb, míg júniustól magasabb értékek adódnak, a görbe csúcsa itt is a június közepe-

július eleje időpontokra tehető, és július közepétől szintén csökkenő tendenciát vesz fel a görbe. Megfigyelhető, hogy augusztus végére, szeptember elejére az index a kezdeti fejlődésű állomány értékeinél is alacsonyabb értékeket vesz fel. Ez is szemlélteti a növényzet aszályos nyár következtében történő kiszáradását, vízvesztését.



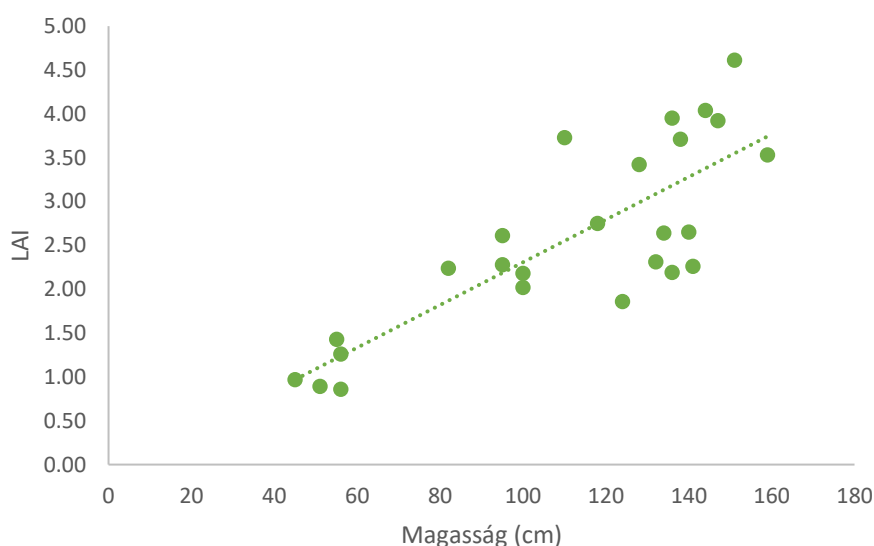
19. ábra: Az NDVI (baloldal) és NDRE (jobb oldal) alakulása áprilistól-szeptemberig

A terepi mérések június 13-án zajlottak, ekkor már hétleveles állapotban volt a kukorica, mely a műholdfotókon (17. ábra) is szépen látszik (legközelebbi műholdfotó: 06.11.), hogy „kizöldült” a tábla. A fotókon megfigyelhető hogy a tábla szinte homogén zöld, azonban az északi részén elhelyezkedik egy világos eróziós folt (piros körrel jelölve), ebből adódóan változatos állapotú növényeket figyelhattunk meg a táblán. Az adatfelvétel során a növények magassága is lemérésre került. Ez is a műholdfotókat igazolja, hiszen a tábla déli részén, ahol zöld az állomány, sokkal magasabb adatokat vettünk fel, az átlagokat az 5. táblázat szemlélteti. A mérés első 5 pontjában (9. ábrán látható) a növények átlagmagassága 134,2 cm, a legmagasabb értékeket a tábla közepén felvett 5 pontban mértük, melyek átlaga 146 cm, azonban az eróziós foltban mért pontok jelentős csökkenést mutattak, mert ezek átlaga már csak 52,6 cm volt. A talajnedvesség mérés esetén is hasonló tendencia volt megfigyelhető, mert az első 5 pontban mért adatok átlaga 19,64 térfogat %, míg az eróziós foltban már csak 11,58 % nedvességet mértünk. A LAI, vagyis a levélfelület értékei is, a tábla tengerszintfeletti magasságának növekedésével csökkenő értéket mutattak, így a tábla közepén mért pontoknál volt a legmagasabb az index értéke (3,756), a tábla legmagasabb pontján, az eróziós foltban azonban már csak 1,082 értéket vett fel az index. Hasonló a változás a levelek klorofill tartalmának értékeiben is, bár itt kevésbé szignifikáns a különbség.

5. táblázat: A szántóföldön mért pontok átlagainak változása

Pontok (minden érték 5 pont átlaga)	Magasság (cm)	Talajvíztartalom (térfogat %)	LAI	Klorofill-a ($\mu\text{g cm}^{-2}$)
1.	134.2	19.64	2.564	14.31393
2.	122.8	17.58	3.1	13.92017
3.	146	17.96	3.756	14.04862
4.	99	17.1	2.36	13.97479
5.	52.6	11.58	1.082	12.31693

A levélfelület-index értékei nagyon jól korrelálnak a növények magasságával (20. ábra), a magasság növekedésével nő a LAI értéke (az egyenes egyenlete: $y=0,0243x-0,1262$, $R^2=0,6585$). Az index pozitív kapcsolatot mutat még a klorofill mennyiségével is, mert eredményeink azt mutatták, hogy a minél nagyobb növény levélfelület-index, magasabb klorofill-tartalommal is párosul. A 21. ábra képein látható, hogy milyen nagy eltérés van a tábla egyes pontjai között az állományban. A táblán kijelölt mind a 25 pontban fényképezővel (Canon) kép készült az állományról. Ezekből a fotókból R program segítségével VIGreen indexet számítottunk. Ez az NDVI-hoz hasonló index (zöld tartományú reflektanciával számolt NDVI). Mivel digitális kamera a színeket zöld, vörös és kék csatornában rögzíti, a VIGreen pedig a zöld és vörös normalizált aránya, így a képből ki tudtuk nyerni a szükséges információkat (Balogh et al., 2016).



20. ábra: A LAI és a magasság kapcsolata



21. ábra: Az állomány fejlettsége az 1. mérési pontban (bal), a tábla közepén a 3. mérési pontban (középen), és az eróziós foltban levő 5. mérési pontban (jobb)

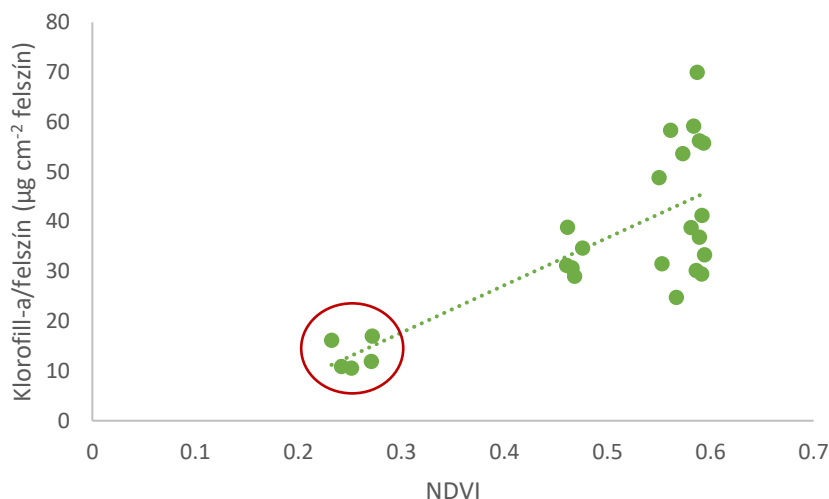
A 6. táblázat szemlélteti a kijelölt 5 mérési pont A VIGreen indexeinek átlagolt értékeit. Az index legmagasabb értéke a tábla első öt pontjában van (0,300104), valamint a tábla középső részén, majd az eróziós pont fele haladva csökken az értéke, és végül az eróziós pontban veszi fel a legalacsonyabb értéket (0,126371).

6. táblázat: A pontok VIGreen index átlagai

Pontok (minden érték 5 pont átlaga)	VIGreen index
1.	0.300104
2.	0.198187
3.	0.265699
4.	0.2066
5.	0.126371

A LAI és a klorofill-a értékek szorzatából kiszámolható az egységnyi felszínre jutó klorofill-tartalom is. Ezzel a klorofill/felszín értéknek és műholdfotókból nyert NDVI és NDRE indexeknek az összefüggéseit vizsgáltuk. A felszínre jutó klorofill és NDVI esetén azt a kapcsolatot figyelhetjük meg, hogy minél nagyobb a klorofill-tartalom, annál nagyobb értéket vesz fel az NDVI is (22. ábra). Az NDVI az egészséges, és fotoszintetikusán aktív állományokban magas (Balogh et al., 2016). Ezt az eredményeink is igazolják, hiszen a tábla eróziós pontján kívül, az állomány magas, élénk zöld színű levélzettel rendelkezik, míg az eróziós foltban (piros körrel jelölve) található növények alacsonyabbak, világos zöld színűek, ebből kifolyólag alacsonyabb klorofill tartalommal is bírnak, ami a fotoszintézis hatékonyságát is negatívan befolyásolja, így az NDVI értékük is az e pontban vizsgált növényeknek lesz a legkisebb. Az egyenes egyenlete: $y=95,298x - 10,912$, $R^2= 0,5726$. Míg a tábla közepén 0,587, addig az eróziós pontban csupán 0,2321 értéket vesz fel az NDVI. Az NDVI-hoz hasonló eredményeket és trendvonalat kapunk, akkor is, ha a felszínre jutó klorofill-tartalom és NDRE kapcsolatát vizsgáljuk. Az NDRE 717 nm-es vörös él (red edge, REDGE) hullámhosszon

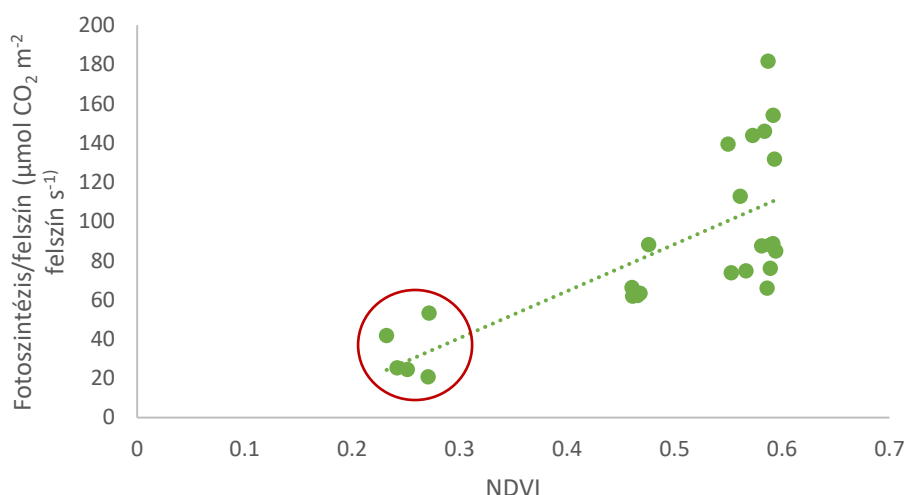
érzékeny indikátora a levelek klorofill-tartalmának és levélsűrűségnek. A nitrogén ellátottságnak is jó indikátora, hiszen ahol kevesebb nitrogén áll a növény rendelkezésére, ott alacsonyabb értéket láthatunk. Mivel a klorofill a vörös tartományban maximális abszorpcióval rendelkezik, így a vörös fény nem tud a levélben mélyre hatolni. Azonban a vörösel tartományban a levelek „áttetszőbbek”, mint a vörös fényben, ugyanis a REDGE mélyebben hatol be a levélbe, így ez az index a fejlettebb vegetáció monitoringjára alkalmas, mert eddigre már nagy klorofill koncentrációval bírnak a levelek, így a vörös tartományban nagy az abszorpciójuk (Boiarskii, 2019). Ennek ellenére az NDVI és NDRE adatok szórásában nem volt jelentős eltérés a vegetációs időszak csúcsán sem (19.ábra). Míg a tábla közepén az NDRE legmagasabb értéke 0,4635 volt, a legalacsonyabb értéket az eróziós foltban mért 4. pontban vette fel az index (0,1469). Minél egészségesebb a növényzet, - ami nagyobb klorofill tartalommal is párosul, annál nagyobb értékeket vesz fel az NDRE is.



22. ábra: A felszínre jutó klorofill és az NDVI kapcsolata

Elemzésre került még az NDVI kapcsolata a felszínre jutó fotoszintézissel és párologtatással is. A területen mért fotoszintézis átlag adatait megszorozva a LAI-val megkapjuk a területre jutó fotoszintézis mennyiségét (23. ábra). Jól látható, hogy a minél magasabb fotoszintézis érték, magasabb NDVI értékkel párosul (az egyenes egyenlete: $y=239,19x - 31,222$, $R^2=0,5291$). Szépen elkülöníthető az eróziós foltban mért 5 pont (piros körrel jelölve), melyek a legalacsonyabb fotoszintézis és NDVI értékkel bírnak. Itt az NDVI index 0,2-0,3 közötti értékeket vesz fel, és a felszínre vonatkoztatott fotoszintézis is itt a legalacsonyabb (20-60 között). A tábla többi pontján jóval magasabb NDVI értékek lesznek, (0,5-0,6 között), és a fotoszintézis is 60 és 180 közötti értékekkel rendelkezik. Fotoszintetikusan legaktívabb

növényzet a tábla közepén mért állomány volt, itt mértük a legnagyobb növénymagasságot, levélfelület-indexet, klorofill tartalmat, talajvíztartalmat is. Tehát a tábla közepén voltak a legideálisabb feltételek a növényzet számára, míg az eróziós foltban a legkedvezőtlenebb feltételek teljesültek. Hasonló tendenciát figyelhetünk meg az NDRE és a felszínre vonatkozó fotoszintézis esetében (az egyenes egyenlete: $y=277,59x - 16,106$, $R^2= 0,536$). Ez esetben is jól elkülöníthetők az eróziós folt állományának alacsony fotoszintetikus aktivitásából fakadó alacsony értékek.



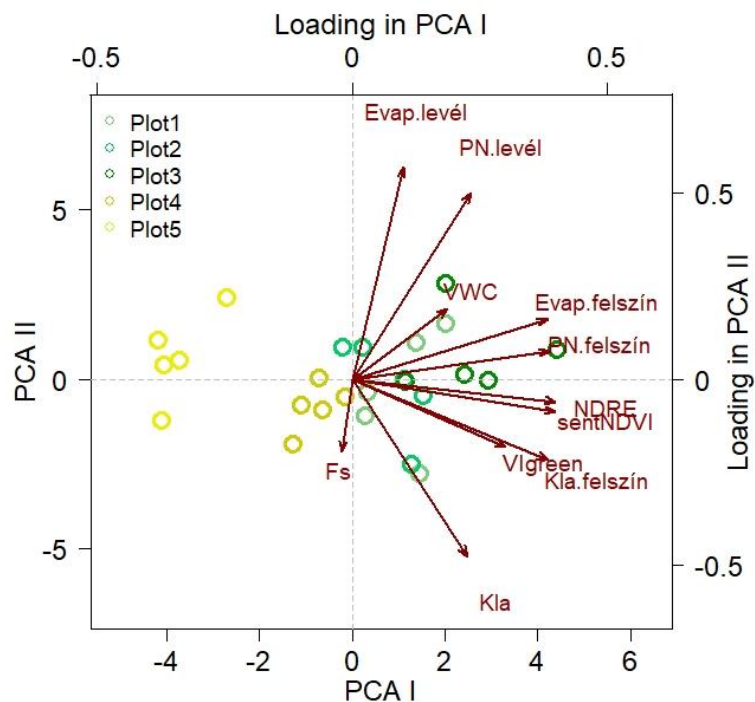
23. ábra: A felszínre jutó fotoszintézis kapcsolata az NDVI-al

A területre jutó párologtatást, a terepen mért párologtatás átlagának LAI-val való szorzatából kapjuk meg. Hasonló tendenciát figyelhetünk meg a felszínre jutó párologtatás és NDVI kapcsolata között, mint a felszínre jutó fotoszintézis esetén (az egyenes egyenlete: $y=37,34x - 4,1333$, $R^2=0,478$). A párologtatás a fotoszintézissel arányosan változik. Minél nagyobb adott növény fotoszintetikus aktivitása, annál nagyobb a párologtatás mértéke is (az egyenes egyenlete: $y=0,147x + 1,5299$, $R^2=0,8009$). Itt is megfigyelhető, hogy a piros körrel jelzett eróziós pontban mért állományban, alacsony NDVI értékei alacsony párologtatással is párosulnak (Boiarskii, 2019). Ez nem meglepő, hiszen a talajvíztartalom vizsgálatok alapján, ezen a területen volt a legkevesebb a talajvíztartalma, így a növényzet szárazságstressznek volt kitéve, ilyen körülmények között a sztómák záródnak, ezzel akadályozva a növény további vízvesztését (Tuba, Csintalan 2009).

4.2.2 Főkomponens analízis

A mért adatok alapján számolt indexek főkomponens analízissel (PCA: Principal Component Analysis) is feldolgozásra kerültek. A PCA-ból nyert adatok felhasználhatók tulajdonságok összehasonlítására, szembeállítására (pl. növény reakciója stressztényezőre), analitikai

paraméterek azonosítására (Shahid et al., 2018). A PCA segítségével két tengely terében megjeleníthető a terepen felvett 5x5 pont, míg a tengelyen nyilakkal kerülnek ábrázolásra a különböző indexek, melyek mérete és iránya (pozitív, negatív) a változókkal való kapcsolat függvényében alakul. A PCA által kapott eredményeket a 24. ábra szemlélteti. A pontok elhelyezkedését a 9. ábra szemlélteti. Látható, hogy az eróziós foltban (sötétebb sárga) és az eróziós folt előtt mért pontok (citromsárga), élesen elkülönülnek a többi ponttól, hiszen ezek negatív irányba esnek. Ebbe az irányba mutat az Fs (steady state fluoreszcencia), aminek stressz hatására magas az értéke, hiszen ekkor a fényenergia nem hasznosul a fotoszintézisben, hanem fluoreszcencia formájában szabadul fel (Ač et al., 2015). Mivel a tábla ezen részén volt a legkevesebb a nedvességtartalom, így ezek a növények szárazságstresszelt állapotban voltak. A tábla többi részén mért pontok a tengelyek másik oldalán helyezkednek el és pozitív irányba esnek, ezek a növények voltak a tábla legkedvezőbb részein. Megfigyelhető a levelek fotoszintézisének (PN levél) és a párologtatásának (EVAP levél) pozitív kapcsolata, valamint ugyanez igaz a felszínre vonatkoztatott fotoszintézisre (PN felszín), és párologtatásra (EVAP felszín) is. Mivel fotoszintézissel arányosan nő a párologtatás, látható, hogy ezek is az egészséges növényzet esetében lesznek magasak, így az eróziós pontokkal ellentétes irányba mutat a nyíl, hiszen az eróziós pontban található állomány rendelkezett a legkisebb fotoszintetikus aktivitással, párologtatással. Az NDVI és NDRE indexek is pozitív kapcsolatot mutatnak, szintén az egészséges növényzetnél vesznek fel magas értéket. Jól korrelál még a VIGreen a klorofill-a értékekkel (Kla.felszín és Kla). A talajnedvesség (az ábrán VWC-vel jelölt nyíl) az első pontoknál a legnagyobb, így ebbe az irányba mutat a nyíl, az eróziós pont fele haladva csökken a mértéke, melyet a terepi mérések is igazoltak.



24. ábra: A főkomponens analízis eredménye

4.3 Az eredmények összegzése

A laboratóriumi körülmények között zajlott kísérlet során hőstressznek és szárazságstressznek kitett kukorica élettani változásait figyeltük meg. Laboratóriumi körülmények között a fotoszintézis, párologtatás, fluoreszcencia és a klorofill tartalom vizsgálatára és elemzésére helyeztük a hangsúlyt. A szántóföldi vizsgálatok során szintén előtérbe helyeztük a fotoszintézis, párologtatás, fluoreszcencia és klorofill tartalom vizsgálatát, azonban a távérzékelés által nyújtott adatok felhasználásával, a kutatás e szakasza kiegészült még az műholdas NDVI, NDRE, és felszíni VIGreen indexek és a LAI elemzésével is. A laboratóriumi körülmények között nevelt kukorica fotoszintézis vizsgálatakor, azt tapasztaltuk, hogy a kontroll csoport rendelkezett a legnagyobb fotoszintetikus aktivitással, míg a vízhiánystressznek kitett növények fotoszintézise erőteljesen lecsökkent. Ugyanezt a tendenciát a szántóföldi körülmények során is tapasztaltuk, hiszen a táblában található eróziós foltban a növények egyfajta „természetes” vízhiánystressznek (alacsonyabb talajnedvesség értékek) voltak kitéve, míg a tábla többi részén megfelelő talajvíz állt rendelkezésre az állomány többi részének. A párologtatás elemzése során is ugyanezen megállapításokat és párhuzamba állításokat mondhatjuk el, hiszen ez a fotoszintetikus aktivitással arányosan növekvő/csökkenő élettani folyamat. A klorofill tartalmat vizsgálva a laboratóriumi és szántóföldi körülmények között az egészséges növényzet rendelkezett nagyobb SPAD és klorofill-a tartalommal is, míg

a stresszelt növényzet klorofill tartalma lecsökkent. Az általunk vizsgált indexek közül az NDVI mutatta a legszorosabb kapcsolatot a LAI-val, fotoszintézissel, párologtatással és klorofill-tartalommal.

5 Összefoglalás

A mezőgazdaság szerepe a világban kiemelkedő, mind élelmezés, mind a környezetre gyakorolt hatását tekintve, így a nem megfelelő és elavult technológia óriási károkat okoz a talajszerkezetben. Ezért fontos a precíziós gazdálkodás előtérbe helyezése, mert a helyspecifikus technológiákkal, fenntarthatóan és minimálisra csökkentett környezetterheléssel lehet kihasználni az adott terület ökológiai potenciálját (Dobos, 2013). A precíziós gazdálkodás egyik alappillére a műholdas felvételeken, távérzékelésen nyugszik. Az adatgyűjtés a legfontosabb, hiszen adat alapú tervezés történik a gazdálkodás technológiájának, és kivitelezésének megvalósításához. Így például műholdfelvételekből már kulcsfontosságú információkat nyerhetünk ki, különböző vegetációs indexeket elemezhetünk. Jelen kutatásban műholdfelvételek alapján készült NDVI elemzéssel, a növényzet minden fejlődési fázisáról információkhoz jutottunk a növényzet állapotát illetően. A műholdfelvételekből nyert NDVI regionális szintű elemzéseket is lehetővé tesz, azonban léteznek olyan műszerek is, melyekkel tábla szinten tudjuk értékelni az adott vegetációt (pl. Green Seeker, mely készülék traktorra, műtrágyaszóróra, permetezőre szerelhető). Mivel az NDVI szoros kapcsolatban áll a növényállomány nitrogéntartalmával, fejlődésével, ezáltal a termés mennyiségével így kulcsfontosságú információs forrás a termésbecsléshez is. Ezen index birtokában a növényállomány folyamatos monitoringjával képet kaphatunk annak egészségi állapotáról, nitrogénellátottságáról, és ezek alapján megtehetjük a szükséges lépéseket (pl. területalapú differenciált N-pótlás, vegyszer kijuttatás). Fontos mérőműszer lehet a precíziós gazdálkodásban a SPAD is, hiszen a levelek relatív klorofilltartalma ezzel meghatározható. A levelek klorofill tartalma alapvetően meghatározó a növény fotoszintetikus potenciáljára nézve, és ezáltal a biomassza termelődésére (Dobos, 2013). Ezt a tényt a kutatás során kapott eredmények is igazolták. Fontos tényező még a növények vízellátottsága is, mely az egész vegetációs időben elsődleges szereppel bír, hiszen szükséges a vetőmag csírázáshoz és a biomassza előállításához, valamint részt vesz a fotoszintézisben, párologtatásban. Ezért a növényi vízstressz megfigyelése alapvető jelentőségű, melyet a 2022-es aszályos nyár is igazolt. Kísérletünkben mind laboratóriumi, mind szántóföldi körülmények között megfigyelhető volt a szárazságstressz által okozott változás a növény élettani reakcióiban, így a fotoszintézisben, párologtatásban, fluoreszcenciában is. Szárazságstressz hatására jelentősen csökken, vagy akár le is áll a fotoszintézis és a növekedés is, ezeket külsőleg megfigyelhető tünetek is kísérik, így például a növény hervadása, biomassza csökkenése. A szárazságstressz vizsgálatával növény optimális termelésének eléréséhez kapunk információt. Kutatásunk során látható volt a szántóföldi vizsgálat során, az eróziós foltban található növények visszamaradott

állapota a tábla kedvezőbb vízellátottságú részeivel szemben. A szárazságstressz korai felismerése elengedhetetlen, mert visszafordíthatatlan károkat okozhat. Ezt a korai felismerést a műholdfelvételek lehetővé teszik. A műholdfelvételekből az is kiderült, hogy a szépen növekvő állomány NDVI értékei július közepétől az aszály miatt jelentős csökkenésnek indultak. Ezek a tények is a precíziós gazdálkodás alapvető fontosságát támasztják alá, hiszen ezek az információk felhasználhatók a vízmegtakarítás, tápanyagutánpótlás, helyes agrotechnika megválasztás, vagy akár a precíziós öntözés tervezésekor. A távérzékelés mellett szólnak még azok a tények is, hogy a terepen végzett mintavételezésen alapuló módszereknek, nagy az idő és eszközigényük és csak adott pontokra szolgálnak információval, és ezek a heterogén tábláknál nem mindig szolgálnak pontos információval. Azonban a műholdfelvételekkel nagy területekről kaphatunk információkat, melyek a heterogenitásnak megfelelő adatokkal szolgálnak. Ezek további előnye, hogy viszonylag gyorsan és ingyenesen hozzáférhető (Landsat, Sentinel) több időpontban kinyerhető, többsávos űrfelvételekkel teszik lehetővé a szántóföldi monitoringot (Malgorzata, 2020). Jelen kutatásban a terepi felvételezés, laborvizsgálatok és műholdfelvételek által gyűjtött adatok összehasonlításával próbáltunk képet kapni egy heterogén tulajdonságokkal bíró tábla állományának növényélettani változásairól. Ezek az eredmények a növény-környezet kapcsolat jobb megértését, valamint a precíziós gazdálkodás elősegítését szolgálhatják.

6 Irodalomjegyzék

- Ač, A., Malenovský, Z., Olejníčková, J., Gallé, A., Rascher, U., & Mohammed, G. (2015). Meta-analysis assessing potential of steady-state chlorophyll fluorescence for remote sensing detection of plant water, temperature and nitrogen stress. *Remote Sensing of Environment*, 168, 420–436. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.022>
- Balogh, J., Dr. Fóti, S., Gecse, B., Dr. Hidy, D., Kertész, P., Dr. Koncz, P., Prof. Dr. Nagy, Z., Papp, M., & Dr. Pintér, K. (2016). *Egyetemi jegyzet Szent István Egyetem Növényteni és Ökofiziológiai Intézet 2016.*
- Bellard, C., Bertelsmeier, C., Leadley, P., Thuiller, W., and Courchamp, F. (2012). Impacts of climate change on the future of biodiversity. *Ecol. Lett.* 15, 365–377. doi: 10.1111/j.1461-0248.2011.01736.x
- Boiarskii, B. (2019). Comparison of NDVI and NDRE Indices to Detect Differences in Vegetation and Chlorophyll Content. *Journal of Mechanics of Continua and Mathematical Sciences*, spl1(4). <https://doi.org/10.26782/jmcms.spl.4/2019.11.00003>
- Bratek, Z., Fodor, F., Király, I., Nyitrai, P., Parádi, I., Rácz, I., Rudnóy, S., Sárvári, É., Solti, Á., Szigeti, Z., & Tamás, L. (2013). *A növényi anyagcsere élettana.* 379. http://www.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0073_novenyi_anyagcsere/adatok.html
- Cammarano D., Fitzgerald G., Basso B., O'Leary G., Chen D., Grace P., Fiorentino C. (2011). Use of the Canopy Chlorophyll Content Index (CCCI) for Remote Estimation of Wheat Nitrogen Content in Rainfed Environments. <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2134/agronj2011.0124>
- Diriczi Zs. (2017). Hogyan hasznosíthatom a vegetációs index képeket? <https://www.agroinform.hu/szantofold/hogyan-hasznosithatom-a-vegetacios-index-kepeket-demo-32500-001> (megtekintve: 2022.08.08.)
- Dobos, A. C. (2013). *Precíziós növénytermesztés.* https://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/bitstream/handle/123456789/12423/2011-0085_precizios_novenytermesztes.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Dukhnytskyi, B. (2019). World agricultural production. *Ekonomika APK*, 7, 59–65. <https://doi.org/10.32317/2221-1055.201907059>

- Erenstein, O., Jaleta, M., Sonder, K., Mottaleb, K., & Prasanna, B. M. (2022). Global maize production, consumption and trade: trends and R&D implications. *Food Security*, 0123456789. <https://doi.org/10.1007/s12571-022-01288-7>
- ESA FLEX: <https://earth.esa.int/eogateway/missions/flex> (megtekintve: 2022.08.18.)
- Garab, G. (2018). Élet a fényből • Fotoszintézis: molekuláris folyamatok – globális hatások. *Magyar Tudomány*, 179, 1119–1131. <https://doi.org/10.1556/2065.179.2018.8.2>
- Hingyi, H. (2005). A MAGYARORSZÁGI RÉGIÓK BÚZA- ÉS KUKORICATERMELÉSÉNEK FŐBB JELLEMZŐI. *Gazdálkodás XLIX. Évfolyam 5. Szám*. <https://ageconsearch.umn.edu/record/54334/>
- Horváth, J., & Komarek, L. (2016). A világ mezőgazdaságának fejlődési tendenciái. In *A világ mezőgazdaságának fejlődési tendenciái*. <https://doi.org/10.1556/9789634546030>
- H.M. Kalaji, A. Rastogi, M. Živčák, M. Brestic, A. Daszkowska-Golec, K. Sitko, K.Y. Alsharafa, R. Lotfi, P. Stypiński, I.A. Samborska, M.D. Cetner: Prompt chlorophyll fluorescence as a tool for crop phenotyping: an example of barley landraces exposed to various abiotic stress factors. – *PHOTOSYNTHETICA* 56 (3): 953-961, 2018
- Kemény, G., Bene, E., Keményné Horváth, Z., Vári, E., Zubor-Nemes, A., Lőrincz, K., Domán, C., & Vigh Enikő, Z. (2019). *A klímaváltozás hatásának modellezése a főbb hazai gabonafélék esetében* (G. Kemény, A. Molnár, & J. Fogarasi (eds.)). Agrárgazdasági Kutató Intézet. <https://doi.org/http://doi.org/10.7896/ak1901>
- Khodarahmpour, Z. (2011). Effect of drought stress induced by polyethylene glycol (PEG) on germination indices in corn (*Zea mays* L.) hybrids. *African Journal of Biotechnology*, 10(79), 18222–18227. <https://doi.org/10.5897/AJB11.2639>
- KSH(1): https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0068.html (megtekintve: 2022.08.03.)
- KSH(2): https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0012.html (megtekintve: 2022.08.03.)
- KSH(3): https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0015.html (megtekintve: 2022.08.03.)
- Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 1(1), F4.3.1-F4.3.8. <https://doi.org/https://doi.org/10.1002/0471142913.faf0403s01>

- Lichtenthaler, H. K., Langsdorf, G., Lenk, S., & Buschmann, C. (2005). Chlorophyll fluorescence imaging of photosynthetic activity with the flash-lamp fluorescence imaging system. *Photosynthetica*, 43(3), 355–369. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0060-8>
- Malgorzata, V. W. (2020). *A talaj és a növény vízellátottságának mérési lehetőségei távérzékelési módszerekkel*. 120–124.
- Mika, J., Utasi, Z., Bíró, C., & Pézsesné Kónya, E. (2011). *Műholdakról távérzékelte adatok feldolgozása és hasznosítása*. <https://adoc.pub/mholdakrol-taverzekelt-adatok-feldolgozasa-es-hasznositasa-j.html>
- Molnár, T., & Somogyi, Z. (2020). *A távérzékelés alkalmazása az erdőszetben és a precíziós gazdálkodásban*. May.
- Nagy, A., Riczu, P., & Tamás, J. (1997). *Almafa lisztharmat (Podosphaera leucotricha) okozta stressz tüneteinek spektrális értékelése. Benedek 2007*. https://dtk.tankonyvtar.hu/xmlui/bitstream/handle/123456789/7120/05_nagy.pdf?sequence=1&isAllowed=y
- Pepó, P., & Sárvári, M. (2011). *Gabonanövények termesztése*. 40-.
- Ranghetti, L., Boschetti, M., Nutini, F., & Busetto, L. (2020). “sen2r”: An R toolbox for automatically downloading and preprocessing Sentinel-2 satellite data. *Computers and Geosciences*, 139(February), 104473. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2020.104473>
- Shahid, M., Pinelli, E., & Dumat, C. (2018). Tracing trends in plant physiology and biochemistry: Need of databases from genetic to kingdom level. *Plant Physiology and Biochemistry*, 127(February), 630–635. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2018.04.030>
- Shammi, S. A., & Meng, Q. (2021). Use time series NDVI and EVI to develop dynamic crop growth metrics for yield modeling. *Ecological Indicators*, 121(October 2020), 107124. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107124>
- Süb, 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, GFZ Data Services*, 1–13. https://gfzpublic.gfz-potsdam.de/rest/items/item_1388302/component/file_1388303/content
- Szigeti, Z. (2018). Changes in the explanation of plant stress concept. *Botanikai Közlemények*,

105(2), 165–178. <https://doi.org/10.17716/BotKozlem.2018.105.2.165>

Taiz, L., Zeiger, E., Møller, I. M., & Murphy, A. (2014). Physiology Plants. *Plants Physiology*, 449–451.

<http://www.sinauer.com/media/wysiwyg/tocs/PlantPhysiology5.pdf>

Tamás, L., Dr. Fodor, F., Dr. Nyitrai, P., Dr. Oszvald, M., Dr. Rudnóy, S., Dr. Sárvári, É., Dr. Solti, Á., Dr. Szigeti, Z., & Tóth, G. (2013). *Növényélettani vizsgáló módszerek*.

Torres, A., Campostrini, E., & Bressan-smith, R. E. (2005). *Photosynthetic pigments , nitrogen , chlorophyll a fluorescence and SPAD-502 readings in coffee leaves*. 104, 199–209. <https://doi.org/10.1016/j.scienta.2004.08.013>

van den Berg, L., & Zeng, Y. J. (2006). Response of South African indigenous grass species to drought stress induced by polyethylene glycol (PEG) 6000. *South African Journal of Botany*, 72(2), 284–286. <https://doi.org/10.1016/j.sajb.2005.07.006>