



TDK DOLGOZAT

A növényi stressz vizsgálata reflektancia és fluoreszcencia mérések alapján napraforgó növényen

Plant stress detection by reflectance and fluorescence measurements in sunflower

Készítette: Bene Kristóf, OXTR25
Agrármérnök
Nappali tagozat
Szent István Campus

Témavezető: Dr. habil Balogh János, egyetemi docens,
Növényélettan és Növényökológia Tanszék,
Növénytermesztési-tudományok Intézet, MATE

**Gödöllő
2021.**

Tartalomjegyzék

1. Bevezetés és célkitűzés	4
2. Szakirodalmi áttekintés	6
2.1 Fotoszintézis.....	6
2.1.1. A fotoszintézis színanyagai.....	7
2.1.2. A fény abszorpciója.....	9
2.2. A növények ásványi táplálkozása	11
2.2.1. A tápanyagfelvétel folyamata.....	12
2.2.2. A tápanyagok és hiánytünetei	13
2.3. Az abiotikus stressz hatásai.....	15
2.3.1. Vízhány, szárazságstressz	16
2.3.2. Magas hőmérsékleti stressz.....	17
2.4. Távérzékelés.....	17
2.4.1. Reflektancia vizsgálatok.....	19
2.4.2. Fluoreszcencia vizsgálatok.....	20
2.5. A napraforgó jelentősége	21
3. Anyag és módszer	23
3.1. Laboratóriumi növénynevelés	23
3.2. Tápoldat.....	25
3.3. Műszerek és mérések	26
3.3.1. Reflektancia mérések	26
3.3.2. Fluoreszcencia mérések.....	27
3.3.3. Fotoszintézis mérések	28
3.3.4. Vegetációs indexek	29
3.3.5 Pigmenttartalom meghatározás	30
3.3.6 Adatfeldolgozás módszerei	31
4. Eredmények.....	32

4.1. Főkomponens-analízis.....	32
4.2. Denzitás függvények	34
4.3. A nitrogén és a vegetációs indexek összefüggése	39
4.4. A fotoszintézis és a vegetációs indexek összefüggése	40
4.5. A pigmenttartalom és a vegetációs indexek összefüggése.....	41
5. Összefoglalás.....	43
6. Irodalom jegyzék.....	45
7. Mellékletek.....	49

1. Bevezetés és célkitűzés

A Föld népessége évente 75 millió fővel gyarapodik, ez azt jelenti, hogy 2025-re 8 milliárd ember él majd a Földön. Ilyen ütemű növekedés mellett gyorsan nő az igény a mezőgazdasági termékekre és rohamosan csökken az egy főre jutó termőterületek nagysága. Tehát ugyanakkora területen, egyre többet kell termelni. Ahhoz, hogy ez a termelés nőjön és fenntartható legyen, elengedhetetlen a növénytermesztés technológiai elemeinek megfelelő megvalósítása és a tápanyagok precíz visszafótlása. Ezeknek a célkitűzéseknek a megvalósításához a precíziós növénytermesztés eszköztárához kell nyúlni. A precíziós növénytermesztés a termőhely térbeli heterogenitásához illeszkedik, a táblát nem homogénnek, hanem pontról-pontra eltérőnek fogadja el, ehhez igazítva a kijuttatott hatóanyagokat. Ez nem csak költségeket takarít meg, hanem csökkenti a többlet-tápanyag kijuttatásból származó környezeti terhelést is. Az optimális tápanyagszint nagyobb termésátlagokat eredményez, ezzel együtt nagyobb a termésbiztonság is (Dobos, 2013).

Az ilyen típusú gazdálkodáshoz elengedhetetlen a távérzékelés alkalmazása, ez tudja biztosítani a helyspecifikus adatokat, így mindig aktuális képet kaphatunk a tábla állapotáról, akár növény szinten is. A technológia fejlődése teret ad a távérzékelés folyamatos fejlődésének, mely a dróntechnológia fejlődésével és az egyre pontosabb kamera és érzékelő rendszerekkel a legnagyobb támasza a fenntartható mezőgazdaságnak.

A távérzékelésben az egyik legújabb eszköz a hiperspektrális reflektancia és a növényi fluoreszcencia mérése. Fluoreszcencia-mérésekkel különböző növények válaszreakcióit összehasonlítva ugyanabban a stresszhelyzetben, képet kapunk a különböző tolerancia mechanizmusokról, illetve, hogy hogyan hasznosul a fényenergia. Fluoreszcencia értékekből megismerhető a növények fotoszintetikus aktivitása, amely jól alkalmazható a növényi produkció vizsgálatához, terméshozam statisztikák elkészítéséhez (Guan et al., 2016). Továbbá néhány klorofill-fluoreszcencia paraméter alkalmas biológiai markernek is (Kalaji et al., 2018). A hiperspektrális távérzékelésnek köszönhetően sok növény esetében jól megfigyelhető a nitrogén (N) ellátottság szintje, míg néhány növény esetében a foszfor (P) és a kálium (K) szintjéről is megfelelő képet kaphatunk (Mahajan et al., 2014).

A reflektancia-mérésnek és a különböző vegetációs indexeknek jelentős irodalma van, de a hiperspektrális mérések és az indexek alkalmazása újnak mondható. A fluoreszcencia távérzékeléssel történő mérése az utóbbi évtizedben fejlődött ki és még csak kevés ismeretünk van róla. Kutatásom célja többek között a növényre ható különböző stresszhatások vizsgálata

reflektancia és fluoreszcencia mérésekkel, így a tápanyaghiány és más abiotikus stresszek megfigyelése (magas hőmérsékleti stressz, vízhiány stressz). Vizsgálataink során szeretnénk összekapcsolni a reflektancia méréseket fluoreszcencia mérésekkel, melyekkel pontosabb képet kaphatunk növényeink állapotáról. A két mérés együttes felhasználása egyre nagyobb hangsúlyt kap a szakirodalomban, mely szélesebb körben használhatóvá teheti a távérzékelést a mezőgazdaság számára. Reményeink szerint az eredményeink a gyakorlatban is használhatók lehetnek a növények különböző stresszhatásainak reflektancia és fluoreszcencia módszerekkel való vizsgálatához, különösen az újabb távérzékelő eszközök (pl. FLEX misszió, ESA) megjelenésével.

2. Szakirodalmi áttekintés

2.1 Fotoszintézis

Egyszerűen fogalmazva a fotoszintézis olyan folyamatok összessége, melyben a fényenergia kémiai energiává alakul át és az így kapott energiából szerves anyagok képződnek. Ez a folyamat a földi élet alapja, hiszen a fotoszintézis által megkötött fényenergia szolgáltatja az egész élővilág számára a szükséges energiát. A termékei adják az élővilág szerves anyagát és az élethez szükséges oxigént (körülbelül 100 milliárd tonna/év).

Tudományosabb megfogalmazásban, a fotoszintézis olyan redox folyamat, melyben az elektrondonorról az elektron úgy jut át az elektronakceptorra, hogy a redoxpotenciál különbséget a két redox tag között a fény által szolgáltatott energiával küzdi le.

Növények esetében az elektrondonor rendszerint a víz, míg az elektronakceptor a szén-dioxid.

Így a fotoszintézis folyamatának egyenlete:



A fotoszintézis összetett folyamat, amely több szakaszban zajlik le:

1. fényszakasz
2. széndioxid-redukciós szakasz
3. diffúziós folyamatok szakasza

(Tuba & Csintalan, 2009).

A fotoszintézis fényszakasza:

Ebben a szakaszban történik a fényabszorpció (fényenergia elnyelése), az energiaszállítás közvetlenül a fotokémiai reakcióban résztvevő pigmentekre és végül a fényenergia kémiai energiává alakulása. A fényszakaszban történik még a vízbontás, azaz az oxigéntermelés. Itt képződik a NADPH redukáló vegyület, valamint a fotofoszforiláció eredményeként az ATP.

Ezek a folyamatok lineárisan függenek a fény intenzitásától, a fényenergia kémiai energiává alakulása 10^{-15} és 10^{-3} másodperc alatt lezajló folyamat (Tuba & Csintalan, 2009).

A fotoszintézis sötétszakasza:

Itt történik a szén-dioxid fixációja és a szénhidrát szintre történő redukciója, melyhez kizárólag a fényszakaszban képződő ATP és NADPH használódik fel. Így a szénhidrát szintre történő redukció mindig nappal megy végbe, annak ellenére, hogy a sötétszakaszban egy folyamat sem igényel közvetlenül fényt.

A fényszakasz és szénredukációs szakasz egymástól teljes egészében elválasztható. Izolált kloroplasztiszok megvilágítás hatására mesterséges elektronakceptorok vagy redukálásra képes festékek jelenlétében is képesek oxigént termelni, szén-dioxid hiányában. Ezt a reakciót Hill-reakciónak nevezzük.



(Tuba & Csintalan, 2009).

A diffúziós folyamatok szakasza

Ez a szakasz a környező légtér és a kloroplasztisz közötti szén-dioxid és oxigén gázcserét biztosítja. A fotoszintézishez használt szén-dioxid felvétele és a fotoszintézis által termelt oxigén leadása párhuzamosan zajlik a légzéshez szükséges oxigén felvételével és az abból származó széndioxid leadásával (Tuba & Csintalan, 2009).

Fotoszintézis helye:

Magasabb rendű növények fény- és sötétszakasza is a zöld színtestben, a kloroplasztiszban történik. Sejtenkénti száma fajspecifikus érték és nagyban függ a fényklímától. Átlagos körülmények között nevelkedett növényeknél 30-100 db/sejt fordul elő (Tuba & Csintalan, 2009). A kloroplasztiszból alakul ki, részei a külső és belső membrán, a tilakoid membránrendszer és a kloroplasztiszt kitöltő alapállomány, a sztróma (Ördög & Molnár, 2011). A membránrendszer sztrómatilakoidokból és gránumtilakoidokból áll. A sztrómatilakoidok nagyjából egyenesek és egyszerű kettősmembránból állnak. Ha elegendő számúak és hosszúságúak, elkezdenek önmaguk körül feltekerni, így alkotva meg a gránumtilakoidokat. Tehát a gránumok, egymásra helyezett pénzérmék oszlopához hasonlító felcsavarodott kettősmembránok.

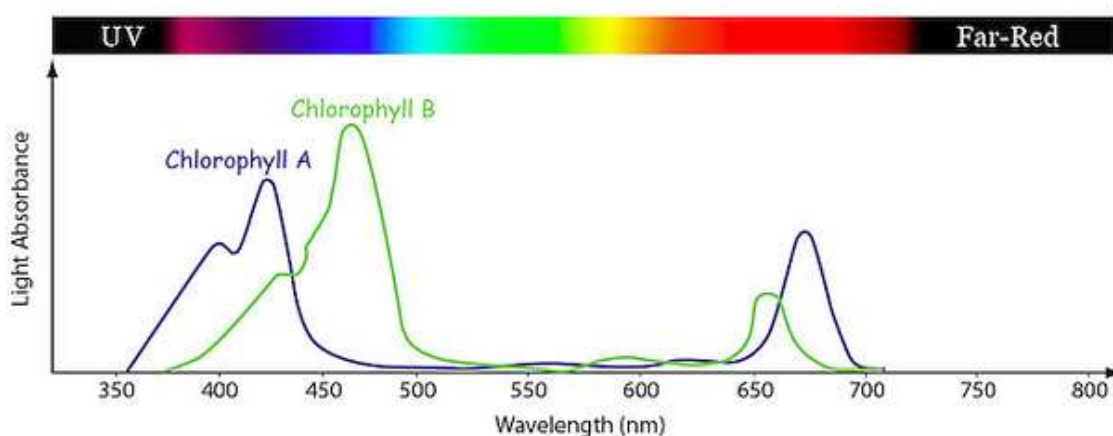
Ezekben a tilakoidmembránokban helyezkedik el a fényenergia megkötéséért felelős pigment-protein komplex, mely a fotoszintézis színanyagait tartalmazza (Tuba & Csintalan, 2009).

2.1.1. A fotoszintézis színanyagai

Fotoszintetikus pigmentnek nevezünk minden olyan pigment-molekulát, amely a fényt elnyeli és akár közvetve, akár közvetlenül, fotokémiai reakciót katalizál a fotoszintetikus apparátusban. (Bratek et al., 2013). Számos ilyen pigment létezik, de a magasabb rendű növényeinknél két nagy csoportot találunk, a klorofilokat, melyek a zöld színanyagok, illetve a karotinoidokat, melyek a sárga színanyagok (Tuba & Csintalan, 2009).

Klorofillok:

Négy pirrolgyűrűből álló porfirinvázis vegyületek, a gyűrű közepén Mg^{2+} ionnal, illetve a negyedik gyűrűhöz kapcsolódó észteresítő fitolláncsal. A porfirinvázban a kettős-kötés rendszer pi elektronjai delokalizált rendszert alkotnak, melynek a klorofill fényelnyelési szempontjából jelentős a szerepe. Zöld növényekben kétféle klorofillt különböztetünk meg, a klorofill-a és klorofill-b néven ismert molekulákat. Ez a két molekula mindig jelen van a magasabb rendű növényekben, általában 3:1 arányban. A különbséget klorofill-a és klorofill-b között csupán az jelenti, hogy a klorofill-b-nek II. pirrolgyűrűjének 3. szénatomjához metil-csoport helyett formil-csoport kötődik. Ez a különbség ugyan csekély, de a spektroszkópiai tulajdonságokban igen jelentős változást idéz elő (Bratek et al., 2013).



1. Ábra: A klorofill-a és klorofill-b abszorpciós spektruma (<https://hu.weblogographic.com/difference-between-chlorophyll>).

Karotinoidok:

Minden fotoszintetizáló szervezetben megtalálható 40 C atomból álló izoprén-vázis lipid jellegű tetraterpének. Sárgás színű vegyületek, melyeket két nagy csoportra oszthatunk. Az egyik a karotinok, melyek az oxigént nem tartalmazó szénhidrogének. Legfontosabbak a likopin és a béta-, alfa-, gamma-karotin. A másik csoport az oxigént tartalmazó xantofilokat foglalja magába, melyek legfontosabb képviselői a lutein, neoxantin, zeaxantin, anteraxantin és a violaxantin. Jelentősebb szerepük az antenna rendszerekben van, az elnyelt fényenergiát a klorofillok felé továbbítják, illetve közismert az a tény is, hogy megvédik a fotoszintetikus rendszert a fotooxidatív hatásoktól (Bratek et al., 2013).

Fikobilinek

A teljesség kedvéért érdemes megemlíteni a fikobilineket, melyben a négy pirrolgyűrű nyílt láncot alkot és a korofillokkal ellentétben nem kompenzálják fémiont. Ezek a molekulák is szerepet játszanak a fényenergia megkötésében, azonban nem növényekben, hanem kékbaktériumokban, barna és vörös moszatokban, illetve különböző algákban (Bratek et al., 2013).

2.1.2. A fény abszorpciója

A nap által kisugárzott fény szemmel is látható tartományát képesek a fotoszintetikus pigmentek valamely mértékben abszorbeálni. Ez a tartomány 400-700 nm között van. A látható fény energiája akkora, hogy a fényenergiát elnyelő pigment delokalizált elektronját gerjeszteni képes. Ez az energia 147-587 kJ/mol. A földfelszínre érkező ultraibolya és infravörös fény a fotoszintézis számára értéktelen.

A Stark-Einstein törvény kimondja, hogy egy molekula egyszerre csak egy fotont képes abszorbeálni és egy foton csak egy elektront tud gerjeszteni. A vegyérték elektronok alapállapotból gerjesztett állapotba kerülnek, így a pigment molekula is gerjesztett állapotba kerül. Ez a törvény adja a fényabszorpció alapját (Ördög & Molnár, 2011).

A fény energiája egy elektronátmenetet képez az azt abszorbeáló molekulában. A pigment molekulának az egyik delokalizált elektronja kötőpályáról a gerjesztés hatására lazítópályára lép. A gerjesztett pigment molekula különböző szinglet állapotokba léphet vagy metastabilis triplet állapotba kerül. A molekula csak fénykisugárzással, hőleadással vagy energiaátadással juthat vissza az alapállapotába. Ha az energiát fénykisugárzással adja le, az a fotoszintézisben nem hasznosul, a jelenséget pedig fluoreszcenciának nevezzük. Az energiaátadás révén az abszorbeált energia a fotoszintézisben fog hasznosulni.

A fényenergia csak akkor tud hasznosulni, ha a fotoszintetikus pigment kémiai reakcióba tud lépni. Ez csak S1 (szinglet 1, 2, 3 létezik, de a fotoszintézis szempontjából csak S1 hasznos) vagy T1 (metastabilis triplet) állapotról történhet. A fotokémiai reakció során a gerjesztett pigment molekula elektronja lazító pályára lép, majd ezt az elektront leadja a mellette lévő elektronakceptorra, így az oxidálódott klorofillmolekulának szüksége lesz egy elektrorra, melyet a szintén mellette lévő elektrondonortól tud felvenni. Lényegében akceptorról donorra a fényenergia segítségével jut át az elektron.

Ahhoz, hogy a klorofill molekula képes legyen fotokémiai reakcióra, közvetlen kapcsolatban kell lennie mind az elektron donorral, mind az elektron akceptorral. Ez mindössze a

klorofillmolekulák 1%-nál teljesül. A fotokémiai folyamatokban résztvevő klorofilok az úgynevezett reakciócentrumokban vannak. A körülöttük lévő pigment molekulák is képesek abszorbeálni a fényt és S1 vagy T1 állapotba jutni, majd a gerjesztési energiát átadhatják a mellettük még alapállapotban lévő pigment molekulának. Így az a molekula jut S1 vagy T1 állapotba és a fényt abszorbeáló molekula újra S0 állapotba kerül. Ez a folyamat az energia transzfer. Szerepe jelentős, mert ez teszi lehetővé, hogy az energia molekuláról molekulára vándorolva végül a reakciócentrumba jusson, ahol fotokémiai reakcióban hasznosulhat. Az energia transzfer irány a rövidebb hullámhossztól a hosszabb hullámhossz felé mutat. Ezért a reakciócentrumokban lévő klorofill-a gyakorlatilag energiacsapdaként működik, hiszen minden környezetükben lévő molekulánál hosszabb abszorpciós spektrummal rendelkeznek. Lényegében a reakció centrumok körüli molekulák fénygyűjtő funkciót látnak el, így mindegy, hogy a fénygyűjtő rendszeren belül melyik molekula abszorbeálja a fényt, azt a klorofill-a fogja a reakciócentrumban hasznosítani.

A különböző pigmentek különböző mértékben képesek az elnyelt fényt hasznosítani, ezt a fotoszintézis akcióspektruma mutatja meg nekünk. Különböző hullámhosszúságú, azonos intenzitású fénnel (a látható fény tartományában) világítják meg a növényeket, közben mérve a CO_2 -felvételt vagy az oxigén termelődést. Az akcióspektrumot az abszorpciós spektrummal összevetve megkapjuk, hogy milyen mértékben hasznosul a különböző hullámhosszú fény. Ezen vizsgálatok eredményeül azt kapták, hogy a 670 nm és 700 nm hullámhosszúsággal külön-külön megvilágított növény együttes oxigéntermelése kevesebb, mint amikor a két hullámhosszt együtt alkalmazzuk. Ezt a jelenséget nevezik Emerson-effektusnak, mely azt bizonyítja, hogy a magasabb rendű növényekben kettő fotokémiai rendszer működik. A pigmentrendszerek egy reakciócentrumból és egy antennarészből állnak, és a két rendszert egy klorofill a/b-pigment-fehérje komplex veszi körül. Ennek feladata a fénygyűjtés.

Az első fotokémiai rendszer (PS I.) reakciócentrumában P700-nak nevezett klorofill van (az elnevezés az abszorpciós maximumra utal), antennarészában klorofill-b-ből többet tartalmaz, mint klorofill-a-ból. Karotinoidok közül elsősorba karotint tartalmaz. A második pigment rendszer (PS II.) reakciócentrumában P680 nevű klorofill-a forma van, antennarészában klorofill-a-ból tartalmaz többet, és karotinoidok közül főleg xantofilokat találunk benne (Tuba & Csintalan, 2009).

A fényenergia megkötése és hasznosulása a fotoszintézis első és alapvető folyamata, de ez a folyamat határozza meg a növények által kibocsátott fény mennyiségét (fluoreszcencia) és a növényi felszínekről visszaverődő fény mennyiségét és minőségét is (reflektancia). Ezzel lehetővé téve a fotoszintézis folyamatának távérzékeléssel történő vizsgálatát.

2.2. A növények ásványi táplálkozása

A növényeknek a környezetükből kell felvenni a növekedéshez és életfenntartásukhoz szükséges tápanyagokat, melyek közé a fényen és vízen kívül bizonyos kémiai elemek is tartoznak. A növények tápelem igénye az állatokénál jóval egyszerűbb. Kedvező feltételek mellett szinte az összes növény a fényenergia segítségével a CO_2 -ot és a vizet szerves anyaggá alakítja, majd ezekből kielégíti az energia szükségletét. A környezetéből felvett szervetlen anyagokból is minden számukra nélkülözhetetlen aminosavat és vitamint létre tudnak hozni. Ez a tápanyagfelvétel jelentős szerepet tölt be az ásványi anyagok körforgásában, mert a talajban lévő ásványi anyagokat csak a növények és mikroorganizmusok képesek szerves vegyületekké alakítani. Ez az egyetlen módja, hogy egyéb élő szervezetek is ásványi sókhoz jussanak (Tuba & Csintalan, 2009).

A növények tápelem igényét már az 1800-as évek elejétől kutatják, ekkor figyeltek fel először arra, hogy csak bizonyos tápelemeket vesznek fel környezetükből. Sokáig nem értettek egyet abban, hogy ezek az elemek valóban szükségesek-e a növények számára, de az 1800-as évek közepére eljutott a tudomány addig, hogy felismertek 10 olyan elemet, amely nélkülözhetetlen az egészséges fejlődéshez. Ezeket az elemeket (C, H, O, K, Ca, Mg, N, P, S, Fe) a növekedés szempontjából nélkülözhetetlennek, azaz esszenciálisnak ítélték. Az 1900-as évek elejétől folyamatosan fedeztek fel újabb és újabb esszenciális elemeket, ahogy fejlődött a technológia. Napjainkban 17 kémiai elemet tartunk számon, mint a növényi működéshez elengedhetetlen elem (Tuba & Csintalan, 2009).

Az esszenciális elemeket szárazanyagra vonatkoztatott relatív tömegük alapján soroljuk két nagy csoportba. Az egyik nagy csoport a makroelemek, ide tartozik a kutatásunkban szereplő nitrogén (N) is. Száraz tömegre vonatkoztatott százalékos mennyisége 1,5% (Tuba & Csintalan, 2009). További elemek a hidrogén (H), az oxigén (O), a foszfor (P), és a kálium (K). Ma már hozzávesszük a makroelemek csoportjához a kén (S), a szén (C), a magnéziumot (Mg) és a kalciumot (Ca) is (Tuba & Csintalan, 2009)). Sokáig vitatott téma volt, hogy a foszfor és kálium melyik csoportba tartozzon, mert azok égetés után a hamuban visszamaradtak, hasonlóan a mezo- és mikroelemekhez, azonban élettani jelentőségük a mikro- és mezoelemek felett áll, így makroelemnek tartjuk őket.

A csoportba tartozó elemeket a talajból veszi fel a növény, kivételt a hidrogén, az oxigén és a szén képez. Előbbieket a vízből, utóbbit a levegő szén-dioxid tartalmából nyeri. A kloroplasztiszok tevékenysége által a fotoszintézis útján alakulnak ezek az elemek szénhidráttá. Ezek a szénhidrátok képzik az alapját aminosavaknak és fehérjéknek, illetve az élő

protoplazmának is. Ezeknek a fontos elemeknek a felvételét a kedvező tápanyag utánpótlással, vízigény kielégítésével, esetleg a talaj fizikai tulajdonságainak javításával elősegíthetjük, növelhetjük (Major, 1987).

A másik csoport a mikroelemek. Ide tartozik a kutatásban szereplő bór (B) is. Száraztömegre vonatkoztatott mennyisége 0,002%. A bór mellett ide soroljuk még a molibdént (Mo), Nikkelt (Ni), Rézet (Cu), Cinket (Zn), Mangánt (Mn), vasat (Fe) és a klórt (Cl). (Tuba & Csintalan, 2009). Csekély mennyiségük ellenére alapvető jelentőségűek, hiányuk esetén akár 40%-os termés kieséssel is lehet számolni (Birkás, 2017b). A mikroelemek közül néhány minden növényben előfordul, szerepe alapvető, míg mások specifikusak, sőt bizonyos esetekben teljesen helyettesíthetőek is (Major, 1987).

Sok esetben a növények nagyobb mennyiségben akumulálnak nem esszenciális elemeket is, illetve a legtöbb elem koncentrációja magasabb a minimális igényeknél. Ezért egy másik csoportosítás is használatos, ami a biokémiai és fiziológiai szerepük alapján csoportosítja a tápelemeket. Az első csoportba tartoznak a szerves vegyületeket alkotó elemek (C, H, O, N, S). A második csoportba azok az elemek tartoznak melyek a szerves molekulákhoz észter kötés révén kapcsolódnak (P, B, Si). Ezek az energia átalakító folyamatokban játszanak szerepet. A harmadik csoport elemei többek között a Ca, K, Mg, Cl. Ionos formában található meg vagy szerves vegyülethez kapcsolódnak. Segítenek az ozmotikus potenciál fenntartásában és sok enzimnek kofaktorai. A negyedik csoport elemei (pl.: Fe, Cu, Zn) az elektron-transzport folyamatokban vesznek részt (Tuba & Csintalan, 2009).

2.2.1. A tápanyagfelvétel folyamata

Az ásványi sók többféle módon juthatnak el a talajban a gyökerek felületéig. Diffúzióval, a talajoldat tömegáramlásával vagy ha gyökér növekszik a tápanyagok felé. A gyökérszőrökkel vagy ezt helyettesítő gombafonalakkal borított gyökércsúcson és az ettől valamivel távolabb lévő gyökérszakaszon keresztül történik a tápelemek abszorbeálása. A tápanyagok felszívása csak a gyökér közvetlen közelében húzódó felszívási zónán keresztül lehetséges, ez jellemzően 1-2 cm. Növényenként változik azonban az, hogy melyik elem melyik gyökérszakaszon szívódik fel (Tuba & Csintalan, 2009).

Felszívódás után az ionok mozgása két szakaszra osztható. Az első szakaszban az apoplazmába áramlik a talajoldat és koncentráció kiegyenlítődés történik. Ez egy fizikai folyamat, tehát a felvett ionok mennyisége nem függ össze a légzéssel, az oxigénhiánnyal vagy annak jelenlétével sem és a hőmérséklettől is csak kis mértékben függ. A külső oldat koncentrációjával

arányos a felvett ionok mennyisége. A következő, szimplazmás szakaszban a Caspary-csíkos endodermiszig jutott ionoknak aktív transzport révén át kell jutniuk a membránon, majd a sejteket összekötő plazmodezmákon keresztül a központi hengerbe jutnak. A folyamat utolsó lépéseként az ionok és a víz belépnek a szállítóyalábok elhalt xilém elemeibe. A xilémekben a párologtatási áramlat révén gyorsan haladnak felfele. Vannak, amik oldalirányban elhagyják a xilémet és az ott lévő növényi részek (gyökér, szár) hasznára válnak, míg a többi egészen a levélig jut és ott hasznosul (Allaga & Bódis, 2014).

2.2.2. A tápanyagok és hiánytünetei

A tünetek elsősorban a hiányzó elemek élettani szerepétől és azoknak a mobilizálhatóságától függenek. Azok az elemek, melyek jó oldékonyságú vegyületekben vannak és képesek a floém rostacsőveibe belépni könnyen mozognak a növényben, tehát mobilizálhatóak. Ezért a hiánytünetek mindig az idősebb, alsóbb leveleken kezdenek megjelenni, mert a benne lévő elemek a fiatal hajtásokhoz szállítódnak. A nem mobilizálható elemek hiánya épp ellenkezőleg, mindig a felső, friss hajtásokon kezd megjelenni.

A szöveteken belüli elemkoncentráció több zónára osztható. Az alacsony koncentrációjú hiányszakaszban már a kis mértékű elemkoncentráció növekedés is jelentősen növeli a növény növekedési rátáját. A hiányzóna felett átmeneti zóna húzódik egészen a növekedési ráta 90%-os kritikus koncentráció feletti akvedát zónáig. Ebben a zónában már az elemkoncentráció növelése szinte semmiféle hatással nincs a növekedésre. A koncentráció növelés egészen a toxikus zónáig lehetséges, ahol a túl magas ionkoncentráció már gátló hatással bír, sok esetben a növény teljes pusztulásához vezet. Ez utóbbi napjainkban kezd jelentős problémává válni, főleg a nehézfémek esetében.(Ördög & Molnár, 2011)

2.2.2.1. Nitrogén

A negyedik leggyakoribb elem az élő szervezetekben. A földkéregnek csupán 0,1%-át teszi ki, de a légkörnek megközelítőleg 80%-át alkotja. A földkéreg nagy tömege miatt, a N atomok száma 50-szer nagyobb, mint a légkörben. A növények képesek a nitrogént sztómaikon keresztül felvenni, de hasznosítani nem tudják, így a nitrogéngáz visszakerül a légkörbe. A nitrogént csak NH_4^+ formában képesek felvenni a növények, illetve NO_3^- -ként, amit azután redukálnak NH_4^+ -ra. Néhány növény képes a vele szimbiózisban élő nitrogénkötő baktériumon

keresztül felvenni a szükséges nitrogén mennyiséget. Ez a folyamat a biológiai nitrogénfixáció (Tuba & Csintalan, 2009).

A nitrogén az egyik legfontosabb növekedést befolyásoló tápelem. A nukleinsavak (DNS, RNS) és a nukleotidok (ATP, UTP, GTP, CTP) bioszintézisében rendkívül fontos, valamint az aminosavak és fehérjék felépítésében is megkérdőjelezhetetlen a szerepe. A protoplazmának szintén alkotórésze és a biokémiai folyamatokat katalizáló elem. A növények nitrogén tartalma 0,5-5% között változik, az idő függvényében. A fiatal, élettanilag aktív növényi részekben több van, míg az idősebb szervekben kevesebb (Birkás, 2017b).

Hiánya a fehérjeképződés gátlása révén mérsékeltbb növekedést eredményez, a szár elvékonyodik és rövidül, míg a gyökér kevésbé elágazóvá válik és megnyúlik. A reflektancia mérésekkel jól mérhető tünetek a levelek sárgászöldé, sárgává válása. Ennek oka a gátolt klorofill szintézis. A pigmentszintézis zavarai (pigmentek mennyisége) a fluoreszcenciát is befolyásolják. Olykor előfordul a levél erek vöröslő színűvé válása is. Fontos megjegyezni, hogy a tünetek mindig az alsóbb, idősebb leveleken jelennek meg. Ennek oka a nitrogén mobilizálhatósága. Nitrogénbőség is zavarokat okoz, a vegetatív részek erőteljesebben fejlődnek, lédúsak és szivacsosak lesznek, de fogékonyabbak a fertőzésekkel szemben. Sötétzöld színre váltanak a levelek a fokozott klorofill szintézis miatt, továbbá a termés késik a jelentősen kitolódott vegetatív időszak miatt (Birkás, 2017a).

2.2.2.2. Bór:

Brenchley 1927-ben a legfontosabb mikroelemnek nevezte a bórt a növény szempontjából. Ekkor bizonyították be, hogy nélkülözhetetlen a magasabb rendű növények számára. Sok növényi betegségről is bebizonyosodott, hogy bórhiány következménye, ilyen a dohány csúcsszáradása, karfiol barnarothadása vagy a répák szívrothadása. Már az első bórral kapcsolatos vizsgálatok is a tápanyag felvétel komplexitását mutatták ki, miszerint kis kalcium szint esetén kicsi a bórtűrés, míg magas kalcium szint esetén nő a bórigeny. Foszfát hiány esetén nagyobb, míg többlet esetén kisebb a bórigeny. Fordított a helyzet a nitrogénnel. Nitrogénhiány esetén a növények kevesebb bórt igényelnek, mint jó nitrogén ellátáskor (Pais, 1980).

A talajban főleg bórsav és borátok formájában fordul elő csillámokban és szilikátokban, illetve a talajrészecskék felületéhez kötött állapotban szabad anionként. A felvehető bórtartalom a kötöttség és a talaj szénsavas mésztartalmának növekedésével (pH-emelkedéssel) csökken. Felvétele $B_4O_7^{2-}$, $H_2BO_3^-$, HBO_3^{2-} és BO_3^{3-} formákban történik. A kétszikűek bórigenye 20-60 mg/kg, ez a szám az egyszikűeknél 6-18 mg/kg.

A növények tápelemfelvételében, szénhidrátok és asszimiláták szállításában és felhalmozásában van jelentős szerepe. Gyökér és szállítószövetek kialakításában is részt vesz és a virág- és termésképzésben is hasznos. A bibe börtartalma leköti a hajtást gátló glükozidokat és stimulálja a pollentömlő növekedést, ezáltal lehetővé teszi pollentömlő kihajtását (Birkás, 2017a).

Hiányának tünetei növényenként változnak, de általában az osztódó szövetek (merisztéma) degenerálódásához vezet, az alapszövet sejtjei (parenchima) összeesnek, a szállítószövetek gyengén fejlődnek. Csúcsnövekedésben színtelenedést, rozettásodást okoz, a szárak megvastagodnak, parásak lesznek. Gyümölcsökön barna nekrotikus foltok jelentkeznek, míg például a paradicsom leveleinek főerein megszűnik a szörképződés. Bórhiány a savanyú vulkáni eredetű, az édesvízi üledék eredetű, a könnyű szerkezetű homok, a szabadmeszet tartalmazó talajfélésegeken fordul leginkább elő. (Pais, 1980).

Bórfelesleg esetén levélcsőcs sárgulást, barnulást láthatunk, akár az egész levél szélre is kiterjedhet. Idővel az egész levélre majd a növényre is kiterjed a nekrozis. Nagymennyiségű termésveszteséget, akut esetben akár elhalást is okozhat (Birkás, 2017a). Főleg a tengeri eredetű üledék, száraz és sok bört tartalmazó kőzetből keletkezett talajokon jellemző a bórbőség. A semleges vagy alkalikus talajok savanyítása, a sok bört tartalmazó talajok öntözése és a sok oldható bórvegyülettel trágyázott talajokban is jelentkezhet túl sok bór (Pais, 1980).

2.3. Az abiotikus stressz hatásai

A stresszhatást mindig stresszor okozza, amely a környezet egy eleme és a növény fiziológiai változását idézi elő azzal, hogy a növény megpróbál alkalmazkodni a megváltozott környezethez. Pontosabban fogalmazva, a stressz az a fiziológiai állapot, amely akkor jelentkezik, mikor a környezeti terhelés hatására a növény a genomban meghatározott növekedési, fejlődési és szaporodási lehetőségek alatt marad (Bratek et al., 2013). A stresszre adott válaszreakció három fázisból állhat. Az első fázis a vészreakció, a stressz okozta fokozódó terhelés miatt csökken a vitalitás, az anyagcsere lebontó folyamatai kezdenek dominálni, amíg el nem éri az ellenállási minimumot. Ezt túllépve súlyos károkat szenved a növény. Ha a növény ellenállóképessége lehetővé teszi, akkor eljut a második, ellenállási fázisba. Itt különböző alkalmazkodási és védekezési folyamatok miatt újra standard (vagy minimálisan jobb) értékekre áll vissza a növény. Ez egészen a kimerülési szakaszig tart. Ha a stressz tovább fennáll vagy intenzívebben van jelen, mint amihez a növény alkalmazkodni tud, akkor elhalással

végződik a harmadik szakasz. A stresszt kiváltó ok megszűnése esetén még a harmadik szakaszból is felépülhet a növény (Bratek et al., 2013).

Szántóföldi körülmények között a napraforgó esetében az abiotikus stresszhatások közül kiemelkedik a vízhiánystressz és a magas hőmérsékleti stressz gyakorisága.

2.3.1. Vízhiány, szárazságstressz

Természetes körülmények között rendszeres probléma a csapadék hiánya vagy egyenlőtlen eloszlása. Ezekben az időszakokban a talaj evaporációja és a növények vízfelvétele révén a talaj fokozatosan kiszárad. Ennek következtében a növények vízutánpótlása is korlátozottabbá válik míg el nem éri a talaj vízpotenciál-értéke a hervadási pontot. Ez alatt a növény már nem képes a talajból vizet felvenni, így rövid időn belül végleg elpusztul.

A vízhiány hatása először a sztómák záródását fogja előidézni, ezzel próbálja meg a növény csökkenteni a transzspirációs veszteséget. A vízhiány kezdeti szakaszában még nem záródnak be teljesen, ettől a párologtatás mérséklődik, de a szén-dioxid felvétel is csökken. Ebből az állapotból azonban még gyorsan helyre tud állni a növény. Tartós vízhiány esetén a sztómák teljes záródása gátolja a szén-dioxid felvételt és szinte teljesen megszűnik a transzspiráció is (kutikulán keresztül kis mértékben még tovább folyik.). Ebben az állapotban már a növény anyagserefohamataiban is súlyos változások következnek be.(Ördög & Molnár, 2011)

Ezek a változások elsősorban a fotoszintetikus rendszerekben jelentkeznek. Kezdetben nő a vízhasznosítási efficencia, mert a szűkített sztómák miatt kisebb mértékben csökken a CO_2 felvétel, mint amilyen mértékben a párologtatás csökken. A szárazságstressz előrehaladtával csökkenésnek indul a vízhasznosítási efficencia és a kloroplasztisz anyagserefohamatai is romlanak. A fotoszintetikus aktivitás is jelentősen lecsökken, ennek több oka is van. Egyrészt az intenzívebbé váló lebontó folyamatok csökkentik a pigmentprotein-komplexek mennyiségét, amely kevesebb fényenergiát tud így abszorbeálni, valamint a hozzáférhető víz mennyisége is kevesebb. Másrészt a Hill-reakció intenzitásával együtt az ATP és NADPH képződés szintén csökken, amire a CO_2 fixációjához van szüksége a növénynek. A CO_2 -asszimiláció leállása végsősoron az asszimiláták áthelyeződésének leállítását idézi elő. Mindezek mellett az iontranszport is lelassul (Tuba & Csintalan, 2009). Napraforgót gyakran érinti a szárazság stressz, mivel a fő növekedési időszaka nyárra esik, így megnövekedett vízigényét nem tudja kielégíteni a nyári aszályos időjárás. Júliusi virágzása kezdetén a párás meleget kedveli, de az időjárás ennek csak ritkán felel meg. Augusztusban azonban kifejezetten kedveli a hosszabb

száraz és napfényes időszakot, amely ha 20 napig fennáll elősegíti az egyöntetű érést (Antal et al., 2000).

2.3.2. Magas hőmérsékleti stressz

A növény számára az optimális hőmérsékleten kívüli, legyen az túl hideg vagy túl meleg érték, jelentősen befolyásolja a növekedést és az anyagcserét, rontja a növény életképességét. A hőstressz elsősorban a membránok állapotát befolyásolja, különösen a kloroplasztisz tilakoid membránjait, ezért akár csak a vízhiány, ez a hatás is először a fotoszintézis értékein jelentkezik. A PS II fotokémiai rendszer gátlódik, majd a szén-dioxid fixáció is leáll (Bratek et al., 2013). A második fotokémiai rendszer károsodásának hátterében több dolog áll. A vízgyűjtő komplex hőérzékenysége, valamint a pigment protein komplexek leválása a reakció centrumokról együttesen járulnak hozzá a PS II működésképtelenné válásához. Csak ezt követően kezdődik a fehérjék és enzimek denaturációja. Fontos megjegyezni, hogy a hőstressz és a szárazságstressz a természetben legtöbbször együtt jár. Víz hiányában a bezáródott sztomákon keresztül nem érvényesül a transzspiráció hűtő hatása, ezért a levelek hőmérséklete akár 4-5 fokkal is feljebb mehet.

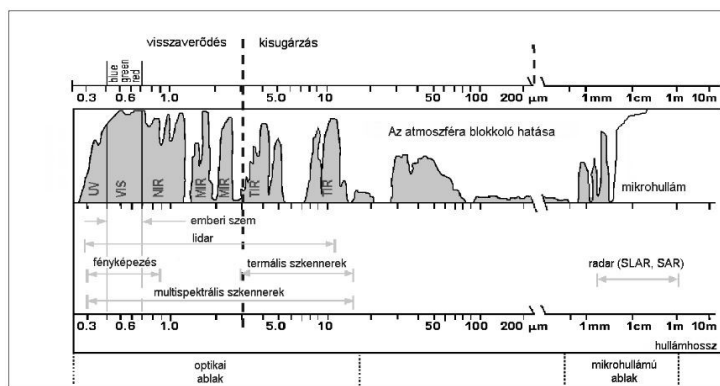
Viszonylag új felfedezés a hősokk-fehérjék. Ha a növények hirtelen hőmérséklet emelkedésnek vannak kitéve (20-25 fokról 35-40 fokra), akkor akár 3-5 percen belül új fehérjéket kezd szintetizálni, általában 30-50 fajtát. Ez a hatás fokozatos hőemelkedés mellett is megfigyelhető. A szerepük napjainkban még teljesen nem tisztázott, vannak melyek a fotoszintetikus rendszereket védik, néhány közülük enzim, amelyek fehérjestabilitást és membránlipid-telítettséget biztosítanak. Közülük pár a normális anyagcserében is részt vesz, azok jelen vannak egészséges növényben is, de hő hatására megnő a számuk (Tuba & Csintalan, 2009). A melegedő éghajlatunk az elmúlt években többször okozott hőstresszt még olyan melegkedvelő növényeknek is mint a napraforgó. Várakozások szerint az éghajlatunk tovább fog melegedni, így fontos a magas hőmérséklet hatásainak felismerése az olyan növényeknél is, melyek eddig képesek voltak ellenállni a hőmérséklet emelkedésének.

2.4. Távérzékelés

A térinformatika egy új tudományág, az 1900-as évek közepéig tekint csak vissza. A számítástechnika gyors fejlődése tette lehetővé a létrejöttét és fejlődését. A 60-as években

megfelelő fejlettségű kereskedelmi hardverek tették lehetővé a folyamatos számítógépes térképészeti kutatásokat. Ahogy a technika folyamatosan fejlődött, úgy sokasodtak meg a szoftver fejlesztés kísérletei, majd kialakultak az első térinformatikai szoftverekkel foglalkozó cégek. A 80-as években megjelenő személyi számítógép és később az internet mindenki számára lehetővé tette az adatbázisok elérését. A légifelvételeknek és az egyre több műholdnak köszönhetően a helyszíni méréseket időközben felváltotta a távérzékelés. Manapság a távérzékelés a térinformatika elsődleges adatgyűjtési eljárása (Márkus, 2010).

A távérzékelés egy olyan adatgyűjtési eljárás, ahol nincs közvetlen kapcsolat a mérőeszköz és a tárgy között, melyről adatot gyűjtünk. Elsősorban az érzékelő műszerek a tárgyról visszavert, vagy azok által kibocsátott elektromágneses hullámait rögzítik (Balogh et al., 2016). Sok előnye van az in situ (helyszíni) mérésekkel szemben. Az alkalmazott eszközeinkkel akár a fény látható tartományán kívül is vizsgálhatunk rendkívül nagy területről rövid időn belül. A rendelkezésre álló eszközök, módszerek és eljárások sokasága lehetővé teszi, hogy mindig a kutatásunknak megfelelő összeállítást használjuk. Olyan területeket is elérhetünk, melyek megközelítése nehéz vagy lehetetlen. Adataink térbeli összefüggésekkel együtt kezelhetők, térképeket hozhatunk létre és ismételt mérésekkel idősorok alkotására is alkalmas. Számos előnye mellett hátránya is adódik a légköri abszorpció miatt. A műszereknek át kell néznie a légkörön, de ahol az abszorpció nagy, ott a műszer mérésre nem alkalmas, mert 'nem lát át' a légkörön. Azokat a hullámhossz-tartományokat melyekben a légkör elnyelése csekély, ablakoknak nevezzük. Ezeken a hullámhosszokon lehetséges a földfelszín vizsgálata. Ezek az ablakok lehetnek optikai ablakok vagy mikrohullámú ablakok. Az optikai ablakok a látható fény (VIS=400-700 nm), a közeli infravörös (NIR=700-1300 nm), a középső infravörös (MIR=1300-2500 nm) és a távoli vagy termális infravörös (TIR=3500-14000 nm) tartományokat jelentik. A mikrohullámú ablak a mikrohullámú (1-70 cm) tartományt jelenti (Belényesi et al., 2008).

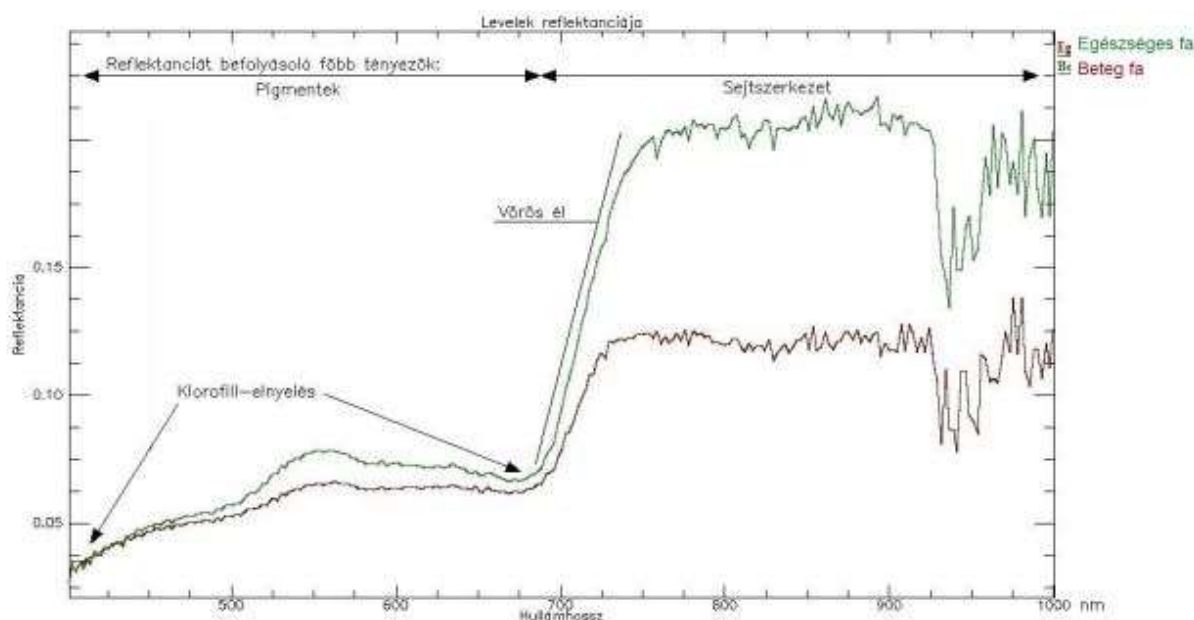


3. Ábra: A légkör sugárzásra gyakorolt hatása, a légköri ablakok (Belényesi et al., 2008).

2.4.1. Reflektancia vizsgálatok

A vizsgált felszín az aktuális borítottságától függően sokféle és sajátos reflektanciát mutat. Az adott tárgyak fizikai és kémiai, illetve geometriai tulajdonságaitól függően alakul a spektrum-görbe. Elkülöníthető a talaj a növényektől, a hullámhosszok és felbontás függvényében könnyen megállapítható a vegetációk fajtája, de elkülöníthetünk egymástól növényfajtákat is. Kinyerhetjük az adatokból a növények fiziológiai állapotára vonatkozó információkat (Belényesi et al., 2008).

A sugárzás egy része már a levél felszínéről visszaverődik, míg nagyobb része a levél belsejébe jutva szétszóródik vagy onnan verődik vissza. Fontos a szerepük a különböző pigment molekuláknak, ezek a fényt elnyelik és hasznosítható energiát szolgáltatnak a növényeknek. Fő elnyelési spektrumaik a kék és a vörös, míg közeli infravörös tartományban nagy reflektancia jellemzi a növényeket. Az infravörös visszaverődésben nagy szerepe van a fluoreszcenciának is, mivel a nem használt fényenergia infravörös sugárzás formájában szabadul fel. Ennek köszönhetően távérzékeléssel mérhető a klorofill tartalom, így a növények fotoszintetikus aktivitásáról is képet kapunk. A fotoszintetikus aktivitás szoros összefüggésben van a növények stresszreakcióival, ezt kihasználva megállapíthatjuk a növények egészségi állapotát (Balogh et al., 2016).



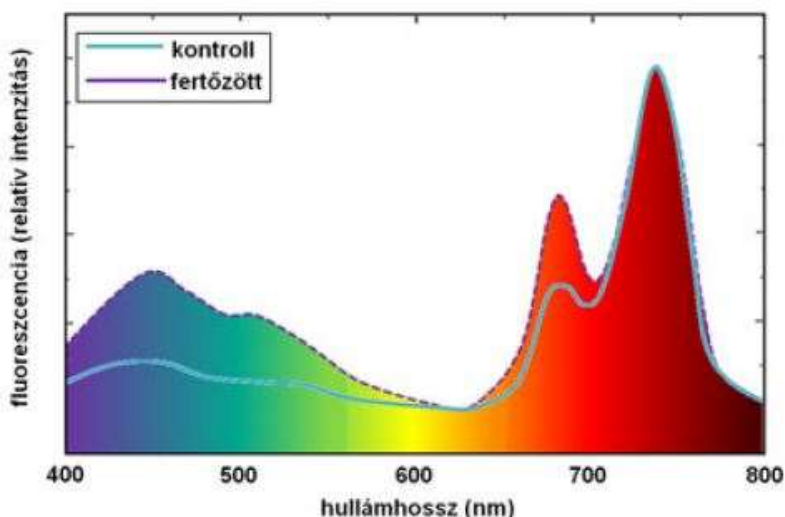
4. Ábra: Egészséges és beteg fa spektrum-görbéje (Balogh et al., 2016).

Jellemzően nem csak egy elektromágneses spektrum hullámhosszai kerülnek rögzítésre, hanem egyszerre több, ezt spektrális lefedettségtől függően multispektrális vagy hiperspektrális méréseknek nevezzük. A multispektrális esetében kevesebb csatornaszám (3-15) általában a látható fény és a közeli- valamint távoli infravörös tartományban van. A hiperspektrális mérések 10-100 (vagy még több) sávban rögzítik az adatokat. A hiper- és multispektrális felvételek felbontását a sávok száma, spektrumtartománya és sávszélessége határozza meg. A több és keskenyebb sáv felvételekre alkalmas hiperspektrális szenzorok több, eddig ismeretlen tulajdonságot is felderítettek (Dobos, 2013). A reflektancia-értékek önmagukban azonban a különféle zavaró tényezők miatt nem alkalmazhatók, ezért kettő vagy több sávot használva vegetációs indexeket képzünk belőlük. Ezek az indexek dimenzió nélküli mérőszámok (Balogh et al., 2016). Az indexekkel még pontosabb képet kaphatunk növényeink és az egész állományunk állapotáról. Különböző stresszhatások sajátos reflektanciát mutatnak bizonyos hullámhosszokon, melyeket feltárva detektálható a növények tápanyagellátottsági szintje. A rengeteg sávból létrehozott különféle vegetációs indexek alkalmasak több tápanyag okozta stressz feltárására, úgy mint a nitrogén, a foszfor, a kén vagy a kálium esetében (Mahajan et al., 2014).

2.4.2. Fluoreszcencia vizsgálatok

A gerjesztett pigment molekula fénykissugárzással történő energialeadását nevezzük fluoreszcenciának. A mérhető fluoreszcenciáért elsősorban a II. fotokémiai rendszer a felelős, melynek P₆₈₀-as klorofillja nem mindig képes leadni a lazító pályára került elektronját, ezért hő vagy fénykissugárzással relaxálódik, így a fluoreszcencia mértéke megnő. A fotoszintetikus aktivitás mérésére széles körben használják a fluoreszcencia adatokat (Tamás, 2013). Egyes klorofill-fluoreszcencia értékek biológiai markerként is használhatók. Azonos stresszek mellett különböző növényeket vizsgálva, megfigyelhető a növények különböző tolerancia mechanizmusai és fényhasznosítási stratégiái (Kalaji et al., 2018). Megfigyelték, hogy a fluoreszcencia és a fotoszintetikus elektrontranszportlánc állapota között igen szoros összefüggés van. A növények megfelelő hullámhosszú gerjesztés hatására fluoreszkálnak. UV gerjesztés hatására kék és zöld tartományban mutatnak emissziós maximumot (440-460nm), illetve a vörös (690nm) és a távoli vörös (740nm) fluoreszcencia megnő. Különböző stresszek hatására ez megváltozik, és stresszre jellemző fluoreszcencia görbék alakulnak ki. A stresszorok közvetve vagy közvetlenül hatnak a fotoszintézisre, így fluoreszcencia mérésekkel felismerhetőek. Ahogy a reflektancia esetében, a legtöbb esetben itt is több sáv eredményeit

használjuk, egymáshoz viszonyított arányait vizsgáljuk. Egyes növényi stresszorok esetében (pl.: nitrogénhiány) a vörös fluoreszcencia csökken, így a F440/F690 arány növekszik. A klorofill destrukció fokozódhat és a bioszintézis lassulhat, így az alacsonyabb klorofilltartalom miatt a 690 nm-nél nagyobb intenzitású hullámhosszokon növekszik a fluoreszcencia. Ez az F690/F740 arány növekedését okozza. Dohány-növény esetében F440/F690 és F690/F740 arányok is csökkennek, ha fotoszintézis gátló herbiciddel kezelik (Tamás, 2013).



5. Ábra: Dohány mozaik vírussal fertőzött dohánylevél fluoreszcenciája az egészségeshez viszonyítva (Tamás, 2013).

Többször tápanyagok esetében is használhatók a fluoreszcencia vizsgálatok, a fluoreszcencia értéke növekszik, ha a növény több nitrogént vagy foszfort tud felvenni. Ezek az értékek szárazságstressz esetén csökkennek, de a tápanyagellátottság közti különbségek megmaradnak (Migliavacca et al., 2017; Perez-Priego et al., 2015). Hőstressz alatt a PS II. maximális kvantum hatékonysága csökken, így az Fm érték is, de a minimum fluoreszcenciát jelentő Fo érték növekedni fog, azaz változhat pl. az Fv/Fm érték. Az Fm vízhiány és gyengébb nitrogénellátottság esetén is kisebb értéket vesz fel, de ezekben az esetekben az Fo változatlan marad (Kalaji et al., 2016).

2.5. A napraforgó jelentősége

A napraforgó meghatározó olajipari növény, hazánkban is nagy mennyiségben termesztik. A KSH adatai szerint 613 000 hektáron termesztettek napraforgót 2020-ban (KSH1, n.d.). Az összes szántóterületnek, mintegy 4 038 900 hektárnak (KSH2, n.d.) több, mint 15%-án. A

tápértéke jó, egyes hibrideknek akár 60% olajtartalma is lehet, de nyersfehérje-tartalma is eléri a 17%-ot. Éppen ezért nem csak a humán ételmezés fontos része, de állatok takarmánykeverékében is nagy szerepe van. Az olaj kinyerése után 100 kg kaszatóból 30 kg olajpogácsa lesz, melynek fehérje tartalma már az 50%-ot is elérheti. Ez rendkívül értékes takarmány az állattenyésztés számára. Érdekes megemlíteni a gyógyászati alkalmazását, amely nem túl jelentős, termesztésének nem az elsődleges célja, de a napraforgószárat hasznosítja, amely a többi iparág számára értéktelen. A napraforgószár vizes kivonatából készül többek között a Helia-D kozmetikum család (Csajbók, 2012). Összeségében elmondható, hogy nagy jelentőséggel bír hazánk és sok más ország mezőgazdaságában, amely főleg annak köszönhető, hogy éghajlati és talajigénye lehetővé tette, hogy széleskörben elterjedjen, valamint sokrétű felhasználása miatt könnyen hasznosítható növény.

3. Anyag és módszer

3.1. Laboratóriumi növénynevelés

A kutatás során használt napraforgó növények nevelése laboratóriumi körülmények között folyt. Csíráztatásuk csíráztató tálcán történt, itt egy hétig fejlődtek, utána üvegedényekbe kerültek, ahol a hetedik hétig tartott a nevelésük. Az üvegedényeket mindig a tápanyaghiányoknak megfelelő receptek alapján tápoldatokkal töltöttük meg. Az oldatokat heti rendszerességgel cseréltük, így mindig a beállításoknak megfelelő koncentrációban jutottak a tápanyagokhoz. Az algásodás elkerülése miatt, alufóliával vontuk be az edényeket. A növénynevelőben optimális hőmérséklet és páratartalom volt, a megvilágítást egyenletes és állandó fényintenzitással biztosítottuk. Ezek a körülmények tették lehetővé, hogy kizárjunk minden esetleges zavaró tényezőt, így biztosak lehettünk abban, hogy a növényeket csak a beállításnak megfelelő stresszhatás éri.

A kísérletek során az alábbi tápanyaghiányokat állítottuk be:

Full – teljes tápoldat (N mennyiség=252 ppm; B mennyiség=0,5076ppm)

N10 – nitrogénhiány (N mennyiség=25,2 ppm; B mennyiség=0,5076ppm)

N50 – nitrogénhiány (N mennyiség=126 ppm; B mennyiség=0,5076ppm)

N150 – nitrogén többlet (N mennyiség=378 ppm; B mennyiség=0,5076ppm)

B10 – bórhiány (N mennyiség=252 ppm; B mennyiség=0,05076 ppm)

B50 – bórhiány (N mennyiség=252 ppm; B mennyiség=0,2538 ppm)

B75 – bórhiány (N mennyiség=252 ppm; B mennyiség=0,3807 ppm)

A hatodik héten végrehajtott mérések után újabb kettő stresszort adtunk a növények egy részéhez. Az egyik csoportnál szárazság stresszt állítottunk be polietilén-glikol segítségével két különböző dózisban. A másik csoportnál hőstresszt alkalmaztunk. A méréseket egy héttel később, a hetedik héten megismételtük. A több tényezős beállításokat az alábbi (1.) táblázat tartalmazza.

1. táblázat: A kísérletekben beállított stresszhatások.

Növények	Full	N10	N50	N150	B10	B50	B75
Stressz kód: 0	A beállított tápoldatnak megfelelő tápanyaghiány stressz, nincs plusz abiotikus stressz						
Stressz kód: 1	PEG100 kezelés: tápoldat ozmotikus potenciálja: -0,148348						
Stressz kód: 2	PEG200 kezelés: tápoldat ozmotikus potenciálja: -0,490673						
Stressz kód: 3	Hőstressz						

A növénynevelés két sorozatban történt összesen 28 növénygel. Minden tápoldat koncentrációval 4 növényt neveltünk, így egyet kontrollnak meg tudtunk hagyni a kettő szárazságstresszel, illetve egy hőstresszel kezelt mellé. A csíráztatás után kiválogattuk a megfelelő állapotú növényeket, majd az edényekbe helyeztük őket.



1-2. kép: A növények az egy hetes csírázás után a csíráztató tálcán. (saját fotó)

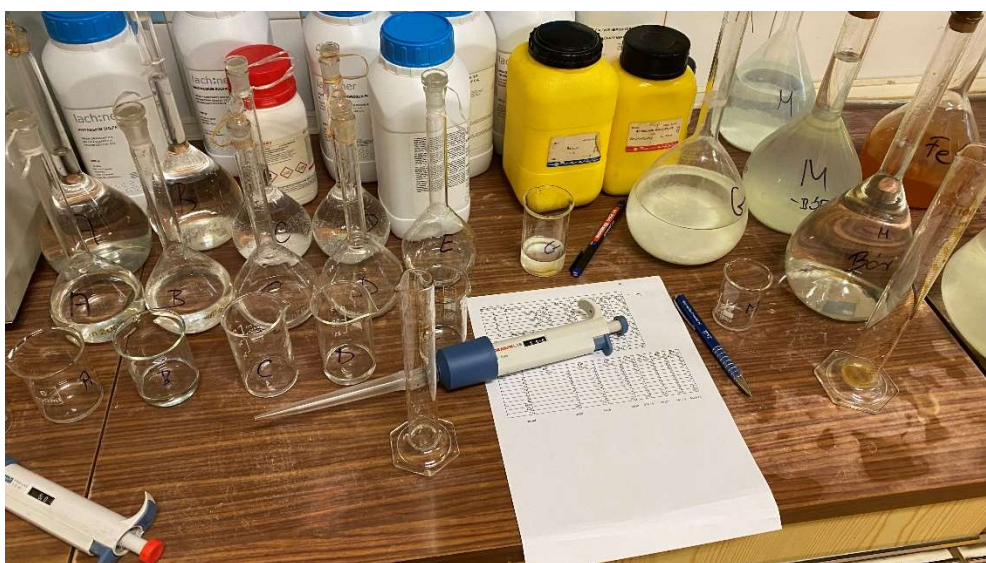
Az edények tetején 3 lyuk található, kettő a gázcserét biztosítja, egyben pedig maga a növény van. A növény tartásáról egy, a szárára tekert szivacs gondoskodik. A tápoldatokat egészen a gyökérnyakig töltöttük, így megközelítőleg 0,7 litert használtunk minden növényhez. A teljes gyökér tápoldatba áztatása elősegítette, hogy a növények megfelelő mennyiségű tápanyagot tudjanak felvenni. Az 'átültetés' után kerültek a növénynevelőbe az edények. A megfelelő körülményeknek és a tápoldatoknak köszönhetően gyors fejlődésnek indultak, növekedésük nem maradt el az egészséges társaikhoz képest. Erős sűrű gyökérzetet fejlesztettek, hajtásaik és leveleik mérete is korukra jellemző volt, de néhány esetben a hiánynak megfelelő tünetek már kezdtek szemmel láthatóvá válni.



3-4. kép: Bal oldalon a hat hetes korban lévő napraforgók a növénynevelőben. Jobb oldalon a hat hetes növények fejlettségi szintje látható. (saját fotó)

3.2. Tápoldat

A fentiekben leírt koncentrációknak megfelelően állítottuk be a tápoldatok tartalmát. A mezőgazdaságban gyakran előforduló hiányokra és többletekre összpontosítottunk, valamint a makroelemek mellett mikroelemek hiánytüneteire is ki kívántuk terjeszteni a kutatást. Így makroelemnek nitrogént választottunk, mikroelemnek pedig bórt. Fontos a tápanyagok pontos keverése, hogy viszonylag fiatal (6-7 hetes korban) is jelentkezzenek már a hiánytünetek. Először a törzsoldatokat kevertük ki a növények számára elengedhetetlen tápanyagokból a megfelelő dózisokban, ezeknek az összetétele a mellékletek 2. táblázatában látható.



5. kép: A törzsoldatok előállítása. (saját fotó)

A törzsoldatokból 5 literes Erlenmeyer lombikokban elkészítettük a tápoldatokat. Ehhez a törzsoldatok megfelelő mennyiségeit beleöntöttük a lombikokba és a tápoldat tisztasága érdekében desztillált vízzel öntöttük fel, hogy pontosan 5 liter oldatunk legyen. A tápoldatok összeállításához szükséges törzsoldatmennyiségek a mellékletek 3. táblázatában vannak szemléltetve.



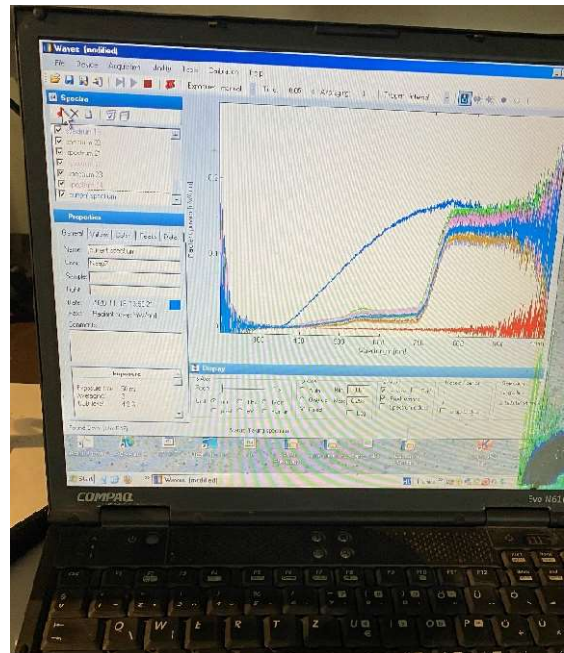
6. kép: A tápoldatok az Erlenmeyer lombikokban. (saját fotó)

A minél nagyobb lombikokra szükség volt, hiszen 28 növényünk egyenként 0,7 literes edényben nevelkedett, melyekben a tápoldatokat eleinte hetente cseréltük. Később szükség volt sűrűbben rátölteni a tápoldatra, mert az intenzív fejlődés miatt a nagyméretű növények hamarabb elhasználták a tápanyagokat.

3.3. Műszerek és mérések

3.3.1. Reflektancia mérések

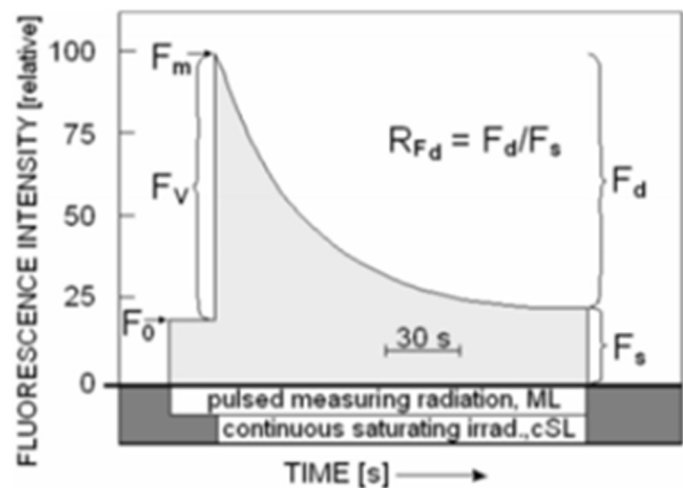
Méréseink során Qmini spektrométert (RGBPhotonics, Németország) használtunk, mellyel egy teljesen sötét (zaj) spektrumot és egy fehér lapról visszaverődő fehér spektrumot vettünk fel. Ezután 250-1050 nm-es tartományban, 0,3 nm-es felbontásban történt a levelek felvételezése. A mérésekhez a növény felső részén lévő leveleket választottuk, ügyelve arra, hogy az már kifejlett levél legyen. A mérést minden növényen a hatodik és a hetedik héten is elvégeztük, a spektrumokat a Waves nevű programmal már mérések közben figyelemmel tudtuk kísérni.



7-8. kép: A reflektancia mérés folyamata, jobb oldalt az aktuális növény (N150-es növény PEG100-as beállításban) reflektancia görbéje látható. (saját fotó)

3.3.2. Fluoreszcencia mérések

A mérésekhez FMS-2 (Hansatech, Németország) fluorométert használtunk. A fluoreszcencia mérése során az előzetesen sötétadaptált leveleket kis intenzitású, modulált fénnel megvilágítva rövid időn belül (30-40 milliomod másodperc) egy lokális maximumot látunk a fluoreszcencián, ezt alapfluoreszcenciának nevezzük, ez az F_0 . Ezután a folyamatos megvilágítás telíti a PS II. elektrontranszportot, így kapjuk meg a maximális fluoreszcenciát, az F_m -et. E kettő különbségéből jön létre a változó fluoreszcencia, ez az F_v . A változó és maximális fluoreszcencia aránya (F_v/F_m) fejezi ki a PS II. reakciócentrumok maximális kvantumhatékonyságát. A mérések során a megvilágítást az F_s érték (steady-state fluoreszcencia) eléréséig folytattuk (3 perc), mivel a terepen mért nap indukálta fluoreszcenciával (SIF) ez hasonlítható össze. A méréseket ebben az esetben is a hatodik és a hetedik héten végeztünk, ügyelve arra, hogy ugyanazt a levelet mérjük be, mint a reflektancia mérések esetében.



6. ábra: A fluoreszcencia mérések főbb paraméterei. Forrás: (Lichtenthaler et al., 2005)

Ezen felül számoltuk az ún. Rfd értéket, a következőképpen:

$$Rfd = \frac{F_m - F_s}{F_s}$$

1. egyenlet



9. kép: A fluoreszcencia mérése és az FMS-2 fluorométer. (saját fotó)

3.3.3. Fotoszintézis mérések

Infravörös gázanalizátoros módszert (CIRAS-2, PPSystems, UK) használtunk a fotoszintetikus CO_2 felvétel mérésére. Fontos, hogy nettó fotoszintézist mértünk, hiszen a kamrában lévő minta nem csak felveszi a CO_2 -t, de leadás (fotorespiráció, mitokondriális légzés) is történik. Nagy

előnye a mérésnek, hogy nem levágott (intakt) növényi részekkel is dolgozhatunk. A méréseket azonos hőmérsékleten, előre beállított fényintenzitás mellett végeztük. A nettó fotoszintézis adatokat sajnos nem tudtuk beilleszteni a PCA elemzésbe, mivel a második sorozat második mérés idején a gázanalizátor lámpájának meghibásodása miatt nem tudtuk ugyanazt a telítési fényintenzitást beállítani, mint az első sorozat mérésénél.



10. kép: Fotoszintézis mérése CIRAS-2 műszerrel. (saját fotó)

3.3.4. Vegetációs indexek

Különböző növekedési indexeket válogattunk ki, melyek hiperspektrális mérések adataiból növényélettani szempontból értékes információkat szolgáltatnak. Ezek az indexek a következők: NDVI, mNDVI, PRI, PSRI, NDRE, MCARI, MCARI/MTVI2. Ezek közül a következő indexeket használtuk fel az adatelemzéshez:

-Módosított vörös él normalizált index (**M**odified red edge Normalized **D**ifference Vegetation **I**ndex = mNDVI₇₀₅, (Li & Guo, 2018).

$$\text{mNDVI}_{705} = \frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705} - 2 * R_{445}} \quad \text{2. egyenlet}$$

-Fotokémiai Reflektancia Index (**P**hotocemical **R**eflectance **I**ndex = PRI, (Devadas et al., 2009).

$$\text{PRI} = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}} \quad \text{3. egyenlet}$$

-(Plant Senescence Reflectancia Index = PSRI, (Devadas et al., 2009)

$$PSRI = \frac{R_{red}-R_{green}}{R_{NIR}} \quad 4. \text{ egyenlet}$$

Módosított Klorofill Abszorpció Reflektancia Index/ Módosított Háromszög Vegetációs index (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index/Modified Triangular Vegetation Index 2) (Cilia et al., 2014):

$$MCARI = R700 - R670 - 0.2 \times (R700 - R550) \times (R700/R670) \quad 5. \text{ egyenlet}$$

$$MTVI2 = \frac{1.5 \times [1.2 \times (R800 - R550) - 2.5 \times (R670 - R550)]}{\{(2 \times R800 + 1)^2 - [6 \times R800 - 5 \times R670]^{0.5}\}^{0.5}} \quad 6. \text{ egyenlet}$$

A hiperspektrális indexek mellett alkalmazunk még egy vegetációs indexet, a Zöld Vegetációs Indexet. Angol rövidítéséből VIGreen (Green Vegetation Index). Eltér a többi általunk használt indextől, mert nem igényel multispektrális mérő eszközöket, hanem egy hétköznapi fényképezőgéppel (esetünkben Canon EOS 350D) készült képekből is megalkotható. A látható vörös és zöld reflektancia arányából enged következtetni a növény 'zöldességére' (Koncz et al., 2015).

$$VIGreen = \frac{R_{green}-R_{red}}{R_{green}+R_{red}} \quad 7. \text{ egyenlet}$$

3.3.5 Pigmenttartalom meghatározás

Levelekből két-két 1 cm²-es korongot levélminta dugófúróval kifúrtunk, majd dörzsmozsárba raktunk. Hozzáadtunk 0,080-0,120 g kalcium-karbonátot, ami megköti a klorofillt roncsoló anyagokat, valamint egy kevés kvarchomokot, hogy segítsük a minták eldörzsölését. 1 ml aceton hozzáadásával eldörzsöltük a mintát és ependorf 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 a mérést. A mérések közben referencia folyadéknak tiszta acetont használtunk (Lichtenthaler & Buschmann, 2001).



11-12. kép: Bal oldalon a spektrofotométer, jobb oldalon a minták előkészítése látható. (saját fotó)

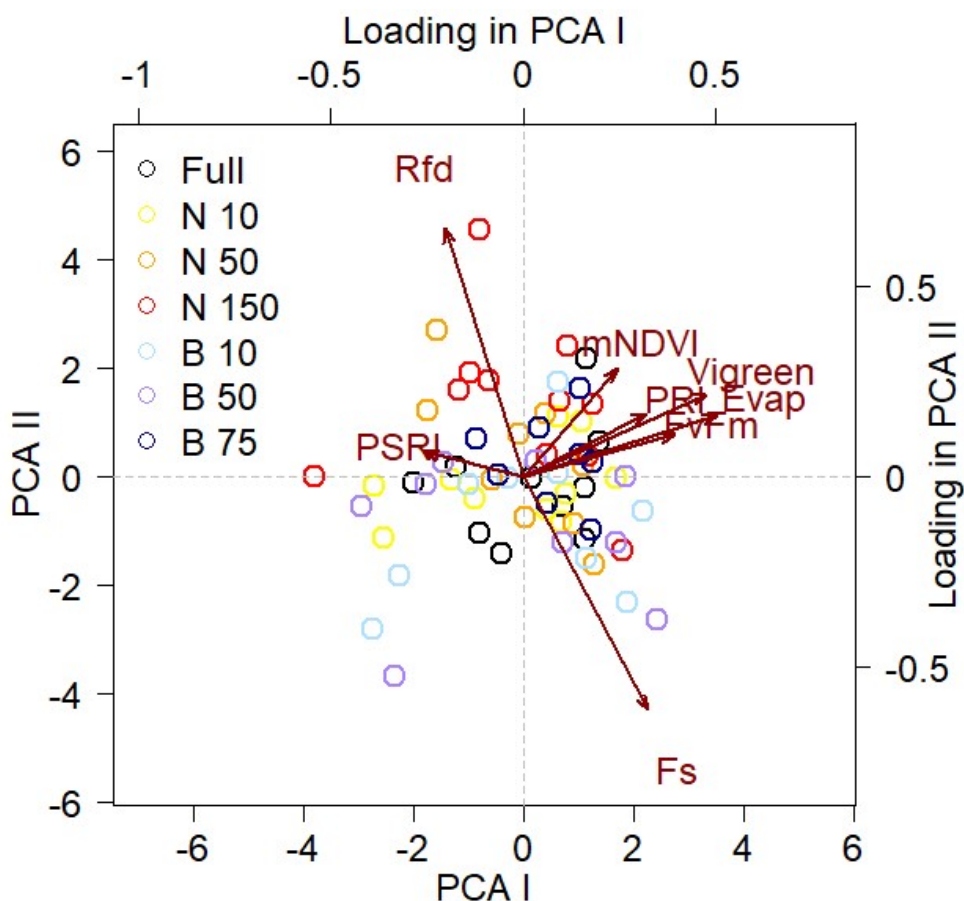
3.3.6 Adatfeldolgozás módszerei

A különböző műszerek különböző file típusokba írják az adatokat, ezeket egy excel fájlba importáltuk, amelyet csv formátumba mentettünk. Ezek a csv fájlok alkalmasak az R Studio programba történő behívásra, ebben történt az adatok feldolgozása és ábrázolása. A főkomponens-analízis (PCA) során stats package-t használtunk (R Core Team, 2021), a denzitás függvények létrehozásához a ggplot2 package-t alkalmaztuk (Wickham, 2016).

4. Eredmények

4.1. Főkomponens-analízis

A kutatás során több tápanyaghiányos kezelést állítottunk be, amelyekben a növényeket később további abiotikus stresszoroknak tettünk ki. Az így kapott különféle kombinációkban többféle mérést is végeztünk. Az áttekinthetőség kedvéért, a főkomponens-analízis (Principal Component Analysis, PCA) segítségével adathalmazunk dimenzióit lecsökkentettük úgy, hogy a jelenlévő varianciát a lehető legjobban megtartsuk és felhasználhassuk a mért változók közötti kapcsolatok elemzéséhez. A főkomponens-analízis a bemenő változókból több új komponens számol és ezek közül kettő mentén jelenítjük meg az adatokat. A két tengely terében jelennek meg a minták, míg az eredeti változókkal való kapcsolat előjelét és annak nagyságát a nyilak iránya és mérete mutatja.

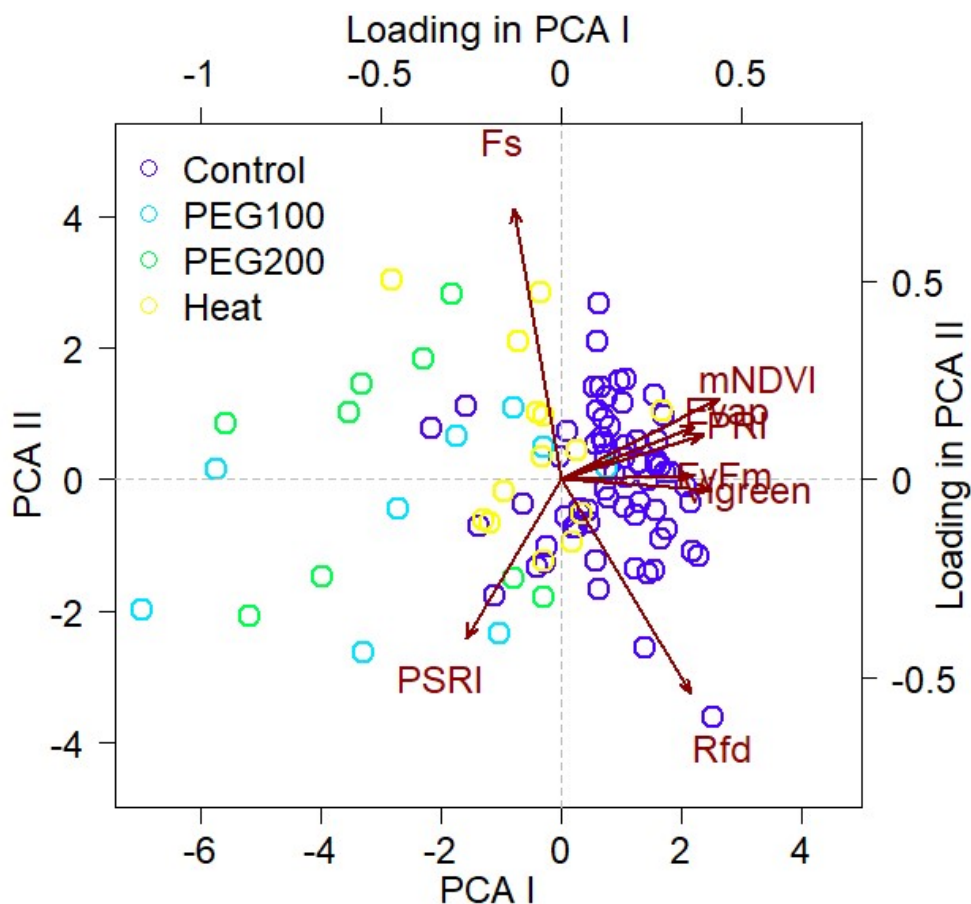


7. ábra: A különböző kezeléseket (tápanyaghiány) kapott minták ábrázolása a főbb változókkal összefüggésben, főkomponens-analízis módszerrel.

A 7. ábrán látható a kezelésekben mért eredmények megjelenítése PCA módszerrel. Mindkét főtengely mentén pozitív irányba esnek az egészséges növények, így a kontroll csoport és a magasabb tápanyagkoncentrációt kapott növények (378 ppm nitrogént kapott csoport, valamint a 0,3807 ppm bórt kapott csoport). Az mNDVI index a növények pigment koncentrációjával, a Vigreen a levélfelület nagyságával mutathat jó kapcsolatot (Koncz et al., 2015; Li & Guo, 2018), így az egészséges növények esetében ezek az értékek magasabbak. A párologtatás (az ábrán Evap) mértéke a fotoszintetikus aktivitással arányosan nő, így a PRI indexszel együtt ez is pozitív irányba mutat. Az Fv/Fm érték egy fluoreszcencia paraméter, amely a fotoszintetikus rendszerek hatékonyságát, azaz az aktuális kvantumhatékonyságot jelöli. Így az az érték szintén az egészséges növényekkel mutat pozitív kapcsolatot. A fluoreszcencia mértékét jelző másik paraméter, az Rfd szintén pozitív irányba esik az első tengely mentén, de a többi változótól a második tengely mentén elkülönül. Ebben az irányban főként a többlet nitrogént kapó növények vannak, hiszen a pigment-mennyiség megnövekedett mértéke miatt a fluoreszcencia mértéke is növekszik. Ezzel a változóval ellentétes az Fs érték, mely az állandó fluoreszcencia (steady-state) mértékét fejezi ki, amely abban az esetben magas, ha a fényenergia nem hasznosul a fotoszintézis során és fluoreszcencia formájában felszabadul. A PSRI index a szenescencia mértékét, azaz a növények sárgasságát, barnaságát mutatja meg, tehát az mNDVI és Vigreen indexekkel ellentétes (Devadas et al., 2009). A sárgult és barna levelek nem (vagy csak nagyon kis mértékben) fotoszintetizálnak és párologtatnak. Az Fs értéktől is külön válik, hiszen a barna, elhalt levelek fluoreszcenciája is lecsökken, vagy teljesen megszűnik.

Az abiotikus stressznek való kitével követően végzett újabb mérések PCA eredményeit a 8. ábra szemlélteti, ahol a stresszhatás alapján csoportosítottuk az eredményeket. Jól látszik, hogy a kontroll csoport, amely csak tápanyaghiány-kezelést kapott, plusz abiotikus stresszt nem, az első főtengely mentén pozitív irányba esik. A vízhiány már jobban elkülönülő csoportokat eredményez, a fotoszintézis üteme lelassult vagy megállt, a fluoreszcencia mértéke nem változott jelentősen, csak erős vízhiánystressz hatására (Kalaji et al., 2016). Szárazságstressz alatt csökkent nap-indukálta fluoreszcenciát mértek gyepen (Perez-Priego et al., 2015). A 8. ábra alapján azok a vízhiányos növények melyek elszáradtak, a PSRI index felé tolódnak, azonban amelyek rendelkeztek még működő zöld szövetekkel a leveleikben, magasabb fluoreszcenciát mutattak, így az Fs érték felé helyezkedtek el. Hő hatására a fotoszintézis üteme csak egy bizonyos pontig képes növekedni, azt elérve károsodnak a fotokémiai rendszerek, így a széndioxid-felvétel csökken, a fluoreszcencia révén bekövetkező energialeadás kerül előtérbe, ez szintén megjelenik az ábrán az Fs irányában. Hőstressz hatására az Fm csökken, de az Fo és Fs növekedhet (Kalaji et al., 2016). Ilyen módon mind az Fs, mind pedig a PSRI értékek

összefüggést mutatnak az abiotikus stresszhatásokkal, de el is különítik a károsodás mértékét: az Fs nagyobb a hosszú távon még nem károsodott, működő szövetekkel rendelkező leveleknél, míg a PSRI nagyobb értékeket vesz fel a már károsodott, elhalt szövetek esetében.

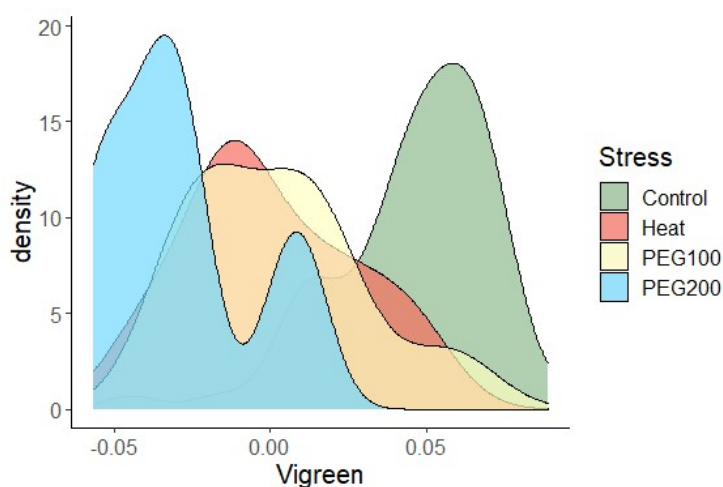


8. ábra: A különböző stresszek ábrázolása a főbb változókkal összefüggésben, főkomponens-analízis módszerrel.
Control=Kontroll; Heat=Hőstressz; PEG100=peg 100-as beállítás vízhiány; PEG200=peg 200-as beállítás vízhiány.

4.2. Denzitás függvények

A részletesebb adatelemzéshez néhány mért változó adatait szeretnénk kiemelni. A 9. ábrán látható, hogy az egyszerű, RGB fotókból származó Vgreen index alakulása stresszhatások alatt. Ez az index légifelvételek alapján is használható növényi vegetációk vizsgálatára (Eng et al., 2019). A kontroll növények esetében mértük a legmagasabb index értékeket. Az enyhébb vízhiány és hő hatására végbemenő változások hasonló görbét eredményeztek, jól elkülöníthetően a kontrolltól, azonban egymástól kevésbé. Erős vízhiány esetén viszont a többi

stressztől is teljesen eltérő görbét kapunk, így nemcsak a stresszhatás tényére következtethetünk, hanem annak okára is.



9. ábra: Vigreen index sűrűségfüggvénye a stresszhatások esetében. Control=Kontroll; Heat=Hőstressz; PEG100=peg 100-as beállítású vízhiány; PEG200=peg 200-as beállítású vízhiány.

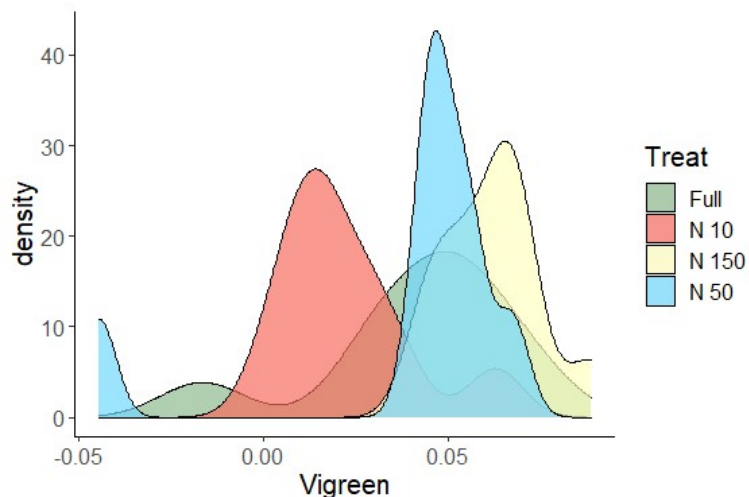
A Vigreen adatok átlagértékein jól látszik a nagyságrendbeli különbség a stressztényezők hatása előtt és alatt (4. táblázat). A Stressz előtt oszlopban lévő adatok is eltérnek egymástól a tápanyaghiány következtében, látható a kevés nitrogént kapott csoport (N 10) rosszabb állapota. Hozzáadott stresszhatás után minden érték lecsökkent, negatív értéket vettek fel, mert a képletben szereplő green érték, ami a zöld tartományban visszavert sugárzást jelenti, nagyobb értékben csökken stressz hatására, mint a red érték, ami a visszavert sugárzás vörös tartományát jelenti. Nem meglepő módon a legalacsonyabb Vigreen értéket az N 10-es csoport mutatta erős vízhiány esetén.

4. Táblázat: A Vigreen index értékek átlagai és szórása a kezelések előtt és alatt.

Vigreen	Stressz előtt	peg100-as beállítású vízhiánystressz	peg200-as beállítású vízhiánystressz	Hőstressz
Full	0.050 (± 0.011)	-0.010 (± 0.011)	-0.029 (± 0.040)	-0.028 (± 0.018)
N 10	0.015 (± 0.012)	-0.020 (± 0.059)	-0.045 (± 0.008)	-0.016 (± 0.016)
N 50	0.052 (± 0.022)	-0.003 (± 0.032)	-0.032 (± 0.013)	0.014 (± 0.021)
N 150	0.059 (± 0.010)	-0.008 (± 0.004)	-0.015 (± 0.027)	0.021 (± 0.015)
B 10	0.054 (± 0.033)	-0.017 (± 0.017)	-0.010 (± 0.001)	0.021
B 50	0.052 (± 0.038)	0.012	-0.033	0.002
B 75	0.055 (± 0.021)	-0.022	-0.043	-0.011

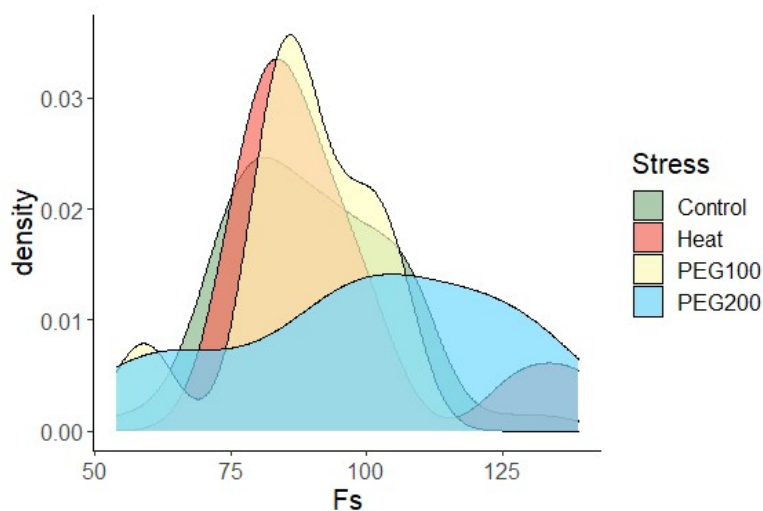
Ha a mérési adatokat a nitrogén-koncentrációk alapján bontjuk, akkor is hasonlóan hatékonyak bizonyul ez az index (10. ábra). A nagy hiánnyal nevelt N 10 mutatja a legalacsonyabb értékeket, míg az N 50 a kontrollhoz hasonló, de valamivel az alatt maradó

értékeket produkál, és a többlet nitrogént kapó N 150 a kontrollnál is magasabb értékeket vesz fel. A VIgreen index tehát megfelelően alkalmazható a tápanyagellátottság megállapítására a nitrogén esetében (Zhao et al., 2005).



10. ábra: VIgreen index alakulása a nitrogén koncentráció függvényében.

A fluoreszcencia paraméterek közül az Fs érték (11. ábra), a szántóföldi körülmények között is mérhető fluoreszcencia érték (tartós megvilágítás hatására létrejövő fényadaptált állapot, steady-state) az erősen vízhiányos állapotú növények esetében mutatott jelentős eltérést (magasabb értékeket) a többi kezeléstől.



11. ábra: Az Fs érték változása a stresszhatások alatt. Control=Kontroll; Heat=Hőstressz; PEG100=peg 100-as beállítású vízhiány; PEG200=peg 200-as beállítású vízhiány.

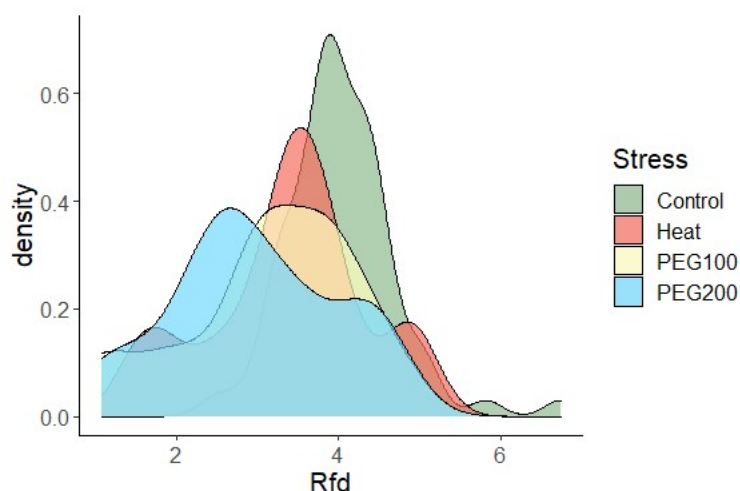
Ezt tapasztaltuk a PCA esetében is, ahol szintén megmutatkozott az erős vízhiány és az Fs pozitív kapcsolata (8. ábra). A fluoreszcencia mértéke a fotoszintetikus rendszerek hatékonyságának csökkenése miatt nő, a hő és enyhe vízhiány esetében (Kalaji et al., 2016). A teljes vízhiány ugyanakkor bizonyos esetekben a szövetek és a fotokémiai rendszerek károsodásához vezet, ezzel együtt a fluoreszcencia mértéke is csökken, majd megszűnik.

Az Fs a stresszhatások alatt nagyobb értéket vett fel és minél erősebb a vízhiány, a legtöbb esetben annál nagyobb Fs érték a jellemző. A bór hiányos kezelések esetében - főleg, ahol nagy hiány van (B 10, B 50) - az Fs érték nem növekedett a stresszhatások alatt, hanem csökkenő tendenciát követett (5. táblázat). A bór hiánya, hasonlóképpen a teljes vízhiányhoz, olyan mértékű károsodásokat okoz a növényi szövetekben, főleg a osztódó szövetekben (merisztéma), az alapszövet sejtjeiben (parenchima) és a szállítószövetekben, amely a fotokémiai rendszerek leállításához, így a fluoreszcencia csökkenéséhez, majd teljes megszűnéséhez vezetett (Pais, 1980).

5. Táblázat: Az Fs értékek átlagai és szórása a kezelések előtt és alatt.

Fs	Stressz előtt	peg100-as beállítású vízhiánystressz	peg200 beállítású vízhiánystressz	Hőstressz
Full	84.625 (±6.466)	85(±46.669)	120 (±11.314)	78.5 (±4.243)
N 10	81.625 (±17.194)	97	129 (±16.263)	113.5 (±3.536)
N 50	77.429 (±18.473)	105	96 (±0.707)	86 (±12.728)
N 150	81.875 (±19.159)	93	105 (±4.950)	85.5 (±13.435)
B 10	101.857 (±12.5)	90(±2.121)	60 (±32.527)	99.5
B 50	104.25 (±15.958)	87	89	84.5
B 75	89.625 (±21.534)	70	99.5	105

A fluoreszcencia értékek közül még az Rfd is széleskörűen alkalmazott paraméter a stresszhatások detektálására (Lichtenthaler & Buschmann, 2001). Kísérletünkben a kontroll különvált a többi növénytől, itt a legmagasabb az Rfd értéke. A hő és enyhe vízhiány nem váltak el egymástól, de az erős vízhiány elkülöníthető, ott a legalacsonyabb Rfd értékek jelennek meg (12. ábra).



12. ábra: Az Rfd változásai a stresszhatások alatt. Control=Kontroll; Heat=Hőstressz; PEG100=peg 100-as beállítású vízhiány; PEG200=peg 200-as beállítású vízhiány

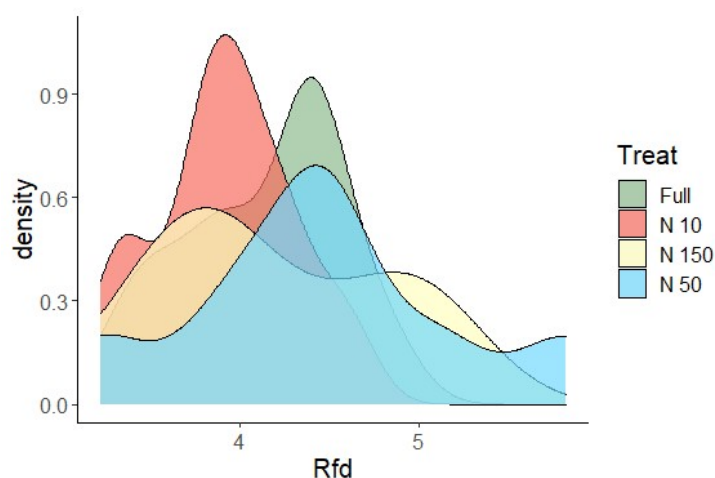
A 6. táblázatban szereplő értékek átlagain látjuk, hogy a stressz alatt álló növények Rfd értékei milyen mértékben csökkentek. Már az enyhe vízhiány is jelentősebb csökkenést eredményez a kezelés előtti növényekhez képest, míg több esetben is (N 10, B 75) közel felére vagy még tovább csökken az Rfd az erős vízhiány hatására. Hőhatásra a legkisebb értékeket a legkisebb koncentrációjú tápanyagot kapott csoportok mutatják (N 10, B 10). A stressz előtti erősen bórhiányos kezelések (B 10, B50) is kisebb Rfd értékkel rendelkeznek a bórhiány okozta csökkent kvantumhatékonyság és kisebb intenzitású elektrontranszport miatt (Kastori et al., 1995).

6. Táblázat: Az Rfd értékek átlagai és szórása a kezelések előtt és alatt.

Rfd	Stressz előtt	peg100-as beállítású vízhiánystressz	peg200-as beállítású vízhiánystressz	Hőstressz
Full	4.095(±0.657)	4(±1.232)	2.7(±1.423)	3.630(±0.072)
N 10	4.062(±0.684)	3.186	2.628(±0.034)	2.538(±0.107)
N 50	4.634(±0.499)	2.962	3.398(±1.041)	3.878(±0.372)
N 150	4.296(±1.126)	2.464	3.257(±0.350)	3.540(±1.346)
B 10	3.734(±0.561)	3.656(±0.577)	4.533(±1.734)	2.544
B 50	3.584(±0.456)	3.908	3.539	3.827
B 75	4.298(±0.780)	2.848	1.612	3.664

Az Rfd esetében a nitrogén-ellátottság is könnyen felismerhető, a tápanyagellátottság szintjei elkülönülnek. Az N 10 értékek jóval a kontroll alatt maradnak, míg az N 50 szinte a kontroll szintjén van, de attól még elkülöníthető. A többlet nitrogént kapott N 150 csoport görbéje a magasabb Rfd értéken lokális maximumot mutat, tehát nem egységesen reagálnak a növények

pozitív vagy negatív irányban, hanem nagyobb szórást mutatnak a kontrollhoz és a többi stresszhez képest is (13. ábra).

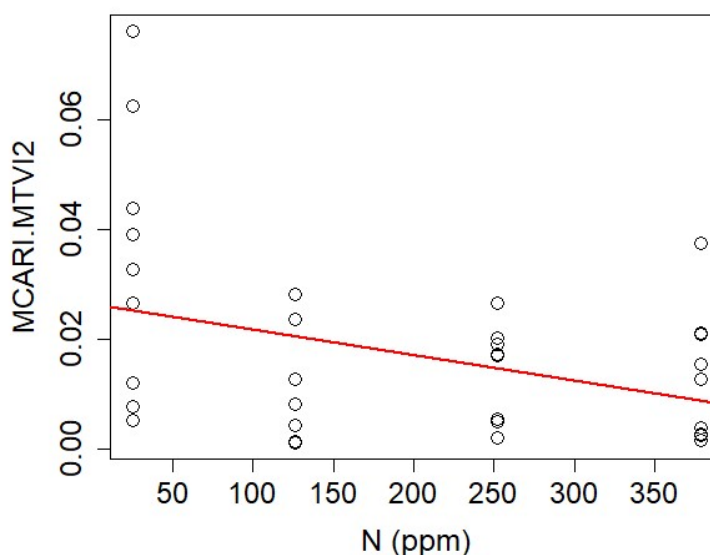


13. ábra: Az Rfd változásai nitrogén koncentráció függvényében.

4.3. A nitrogén és a vegetációs indexek összefüggése

Mivel a kísérlet egyik fontos kérdése a tápanyaghiány detektálhatósága volt, ezért vizsgáltuk a tápanyaghiány és az egyes indexek kapcsolatát. A nitrogénellátottságra leginkább érzékeny vegetációs indexnek az MCARI/MTVI2 bizonyult. A nitrogén szint emelkedésével az index értéke csökken (Cilia et al., 2014). A 14. ábrán látható lineáris regresszió mutatja meg az összefüggést a növények nitrogén szintje és az MCARI/MTVI2 index között. A nitrogénhiányos kezeléseink esetében az index értéke magas, azonban folyamatosan csökken a többlet nitrogénnel kezelt növényeinkig.

Fontos, hogy az alábbi (14. ábra) csak azokat a növényeket veszi alapul, melyeket további stressz nem ért. Ezeket a beállításokat az eddig is alkalmazott vízhiány és hőstressz mellett vizsgálva már nem kapunk ilyen egyértelmű eredményt, különösen a vízhiány, (mindkét kezelés), szünteti meg az MCARI/MTVI2 index-szel való összefüggést, azonban hőstressz esetében ugyanúgy alkalmas a nitrogén szintek elkülönítésére. (7. táblázat)



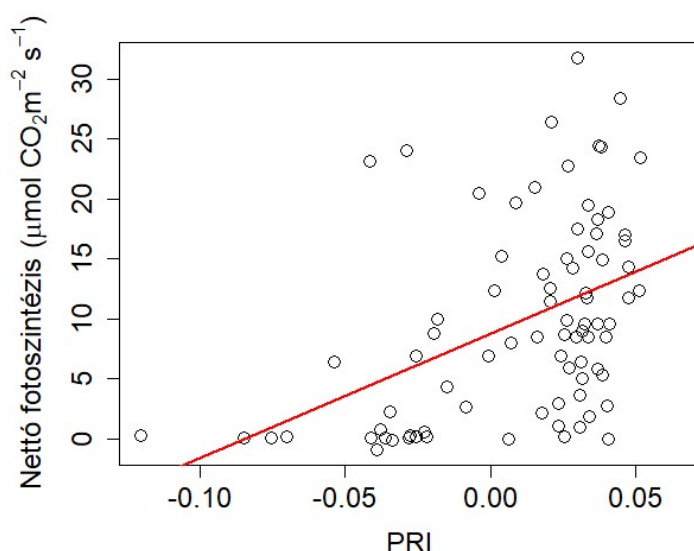
14. Ábra: Az MCARI/MTVI2 index alakulása nitrogénellátottság függvényében. A lineáris regresszió egyenlete: $MCARI/MTVI2 = 2.629e-05 + (-4.634e-05) \cdot N$; $r^2 = 0.1372$; $p\text{-érték} = 0.2402$.

7. Táblázat: Az MCARI/MTVI2 index értékek átlagai és szórása a kezelések előtt és alatt.

Mcari/Mtvi2	Stressz előtt	peg100-as beállítású vízhiánystressz	peg200-as beállítású vízhiánystressz	Hőstressz
Full	0.011(±0.012)	0.134(±0.014)	0.084(±0.017)	0.035(±0.024)
N 10	0.030(±0.021)	0.093(±0.120)	0.112(±0.138)	0.035(±0.013)
N 50	0.011(±0.014)	0.112	0.016(±0.028)	0.025(±0.009)
N 150	0.010(±0.011)	0.112(±0.034)	0.197(±0.002)	0.014(±0.010)
B 10	0.024(±0.012)	0.010(±0.071)	0.018(±0.025)	0.030
B 50	0.014(±0.060)	0.048	0.205	0.013
B 75	0.018(±0.055)	0.065	0.068	0.023

4.4. A fotoszintézis és a vegetációs indexek összefüggése

A nettó fotoszintézis esetében szintén megvizsgáltuk az egyes indexekkel adott kapcsolatokat, ezek közül a PRI index bizonyult a legjobbnak. A PRI index a fotokémiai reflektanciát veszi figyelembe. Nitrogénhiány és szárazságstressz esetében is pontos élettani információkat szolgáltat napraforgó növényekről (Peñuelas et al., 1994). Ez az érték a fotoszintézis intenzitásával együtt növekszik, így alkalmas a fotoszintetikus apparátusok aktuális hatásfokát kimutatni (15. ábra). Egészséges növények esetében a nettó fotoszintézis értéke magas, míg a stresszhatások alatt álló növények csökkent fényenergia hasznosítása révén ez az érték alacsonyabb. A PRI index tehát a nettó fotoszintézis mértékén keresztül képet ad a növények pillanatnyi állapotáról, lehetővé teszi a stresszelt növények felismerését (Devadas et al., 2009).



15. Ábra: A nettó fotoszintézis és a PRI index összefüggése. A lineáris regresszió egyenlete: $\text{Nettó fotoszintézis} = 8,7831 + 103,9702 \cdot \text{PRI}$; $r^2 = 0,2003$; $p\text{-érték} = 2.214e-05$

Az index követi a nitrogénellátottság mértékét, azzal arányosan növekszik, valamint a vízhiányok esetében kivétel nélkül, minden tápanyaghiányos csoportban lecsökken a negatív tartományba. A csökkenés oka a megnövekedett visszaverődés az 581 nm (a látható szín sárgásbarna tartománya) hullámhosszon az 570 nm (a látható szín zöld tartománya) hullámhosszával szemben. A hőstressz nincs ilyen nagy hatással a PRI változásaira, de itt is észrevehető a csökkenése a legtöbb csoportban (8. táblázat).

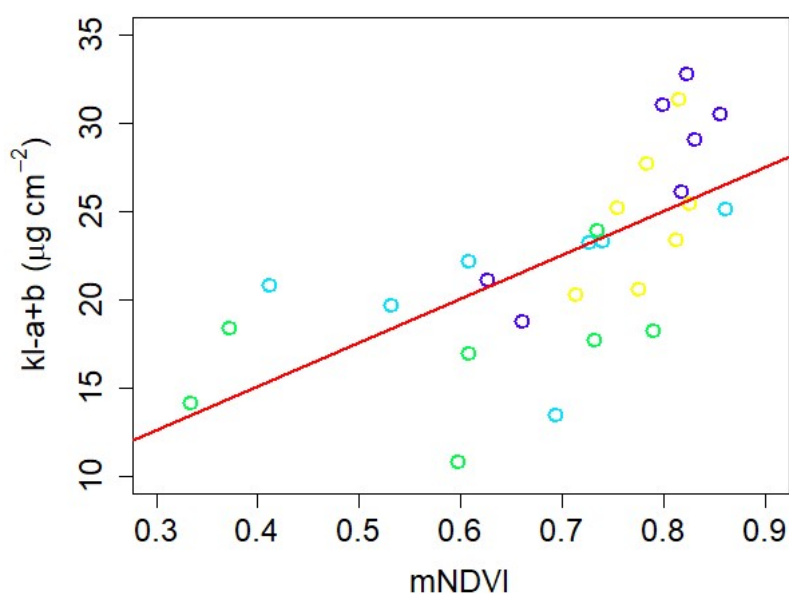
8. Táblázat: A PRI index értékek átlagai és szórása a kezelések előtt és alatt.

PRI	Stressz előtt	peg100-as beállítású vízhiánystressz	peg200-as beállítású vízhiánystressz	Hőstressz
Full	0.032(±0.166)	-0.0567(±0.036329)	-0.038(±0.025)	-0.004(±0.024)
N 10	0.019(±0.010)	-0.028(±0.027996)	-0.057(±0.116)	0.020(±0.059)
N 50	0.025(±0.007)	-0.028	-0.00011(±0.040)	-0.002(±0.067)
N 150	0.039(±0.010)	-0.027(±0.06662)	-0.079(±0.076)	0.022(±0.056)
B 10	0.038(±0.021)	-0.038(±0.034503)	-0.036(±0.044)	0.020
B 50	0.030(±0.035)	-0.012	-0.038	0.012
B 75	0.032(±0.037)	-0.030	-0.046	0.028

4.5. A pigmenttartalom és a vegetációs indexek összefüggése

A klorofill a és b tartalom változásainak megfigyelésére az mNDVI index bizonyult a legalkalmasabbnak. A pigmenttartalom változása már azelőtt bekövetkezik, hogy a növényeken szemmel látható tünetek jelennének meg, így a klorofill tartalom vizsgálata gyakorlati

szempontból is nagyon fontos. Az mNDVI index terepi körülmények között is jól mérhető adat, többféle vegetáción is szignifikáns az összefüggés a klorofill-tartalommal (Chen et al., 2007). Magasabb értékei magasabb klorofill a/b tartalmat jelentenek (16. ábra), ami a fotoszintézis megfelelő működését jelzi. Ezáltal könnyen elválasztható lehet az egészséges és tápanyaghiányos növény.



16. Ábra: A pigmenttartalom (klorofill A és B) és az mNDVI index összefüggése. A regressziós egyenes egyenlete: $mNDVI = 0,327894 + 0,016540 \cdot \text{Pigment.tartalom}$; $r^2 = 0,4085$; $p\text{-érték} = 0,0002509$

A klorofill a és b pigmenttartalom vízhiány esetén csökken minden vizsgált csoportban, azonban a hőstressz nem minden esetben idéz elő nagy mértékű csökkenést. A nitrogén tartalom növekedése a pigmenttartalom növekedésével jár együtt, nem csak a kezelések előtt, hanem az enyhe vízhiány és a hőstressz alatt is. Bórhiány esetében a koncentráció különbségeket nem követi, de a kezelések hatására ugyanúgy csökken, mint a nitrogén kezelések csoportjaiban (9. táblázat).

9. Táblázat: A pigment tartalom értékei a kezelések előtt és alatt.

Pigment (Klorofill A+B)	Stressz előtt	peg100-as beállítású vízhiánystressz	peg200-as beállítású vízhiánystressz	Hőstressz
Full	31.04	20.80	23.91	31.35
N 10	21.10	19.68	16.94	20.30
N 50	26.15	22.19	18.23	20.59
N 150	30.55	23.26	14.17	23.41
B 10	29.06	25.11	17.75	27.71
B 50	32.79	23.32	18.39	25.19
B 75	18.80	13.48	10.82	25.47

5. Összefoglalás

A hiperspektrális távérzékelés egyre szélesebb körben alkalmazott adatgyűjtési mód. Az így nyert adatok pontossága és a mérések egyszerűsége, valamint kis időigénye együttesen segítették elő az elterjedését. A távérzékelés jelentése, hogy a mérő műszernek és a mért növénynek nem kell közvetlen, fizikai kapcsolatban lenniük, így az távolról, sok esetben egyszerre több növényről történik a mérés. A fenntarthatóság szükségességét ma már a mezőgazdaságban is előtérbe helyezik, melynek lehetőségét a precíziós mezőgazdaságban kell keresni. A precíziós mezőgazdaság a táblát nem homogén egésznek tekinti, hanem minden ponton eltérő tulajdonságokkal rendelkező heterogén területnek. Ezért fontos, hogy méréseinkkel növény szinten tudjunk adatokat kinyerni és így a mezőgazdasági beavatkozásokat – legyen az agrotechnikai vagy agrokémiai – nem a tábla egészén, csupán az érintett területén kell elvégezni. A fenntarthatóság másik alappillére a kemikáliák csökkentése. Csak a szükséges vegyszerek a minimálisan szükséges mennyiségben legyenek kijuttatva. Egyik fontos lépés a megelőzés, hiszen, ha akkor észrevesszük a kezdődő problémát, mikor az még szemmel nem látható, akkor kevesebb vegyszerrel, csak az adott területen megelőző kezeléseket tudunk alkalmazni. Ehhez kívánunk hozzájárulni méréseinkkel, ahol tápanyaghiányokat, illetve különböző tápanyagkoncentrációjú tápoldatokban nevelt növények abiotikus stresszre adott válaszait próbáltuk feltárni hiperspektrális távérzékelés és fluoreszcencia mérések segítségével. Különös figyelemmel a nitrogén koncentrációkra, a környezetvédelmi szempontból fontos nitrát direktíva miatt, illetve nagy figyelmet fordítottunk a mezőgazdaságban egyre inkább kutatott fluoreszcencia és reflektancia adatok együttes alkalmazására. Többféle mérést végeztünk, reflektancia méréseket, fluoreszcencia méréseket, fotoszintézis méréseket, valamint pigmenttartalom méréseket. A reflektancia adatokból többféle vegetációs indexet alkottunk, a fluoreszcencia adatokból kiválogattuk a leghasznosabbakat, míg a fotoszintézis és pigment tartalom mérések a kezelések növényélettani hátterére világítottak rá, melyeket összefüggésbe hoztunk a vegetációs indexekkel. A vegetációs indexek közül a VIgreen index eredményesnek bizonyult az abiotikus stresszek felismerésében és szétválasztásában, továbbá a nitrogénellátottság meghatározására. A nitrogénellátottság szintjét az alkalmazott vegetációs indexek közül a legpontosabban az MCARI/MTVI2 indexszel sikerült meghatározni. A fotoszintézis mértékével leginkább a PRI index korrelált, az mNDVI index pedig a pigment tartalommal mutatott szoros összefüggést. Több fluoreszcencia paramétert megvizsgálva arra jutottunk, hogy az Fs érték alkalmas lehet a

vízhiánystressz felismerésére, míg az Rfd érték jól meghatározza az abiotikus stresszek közötti különbségeket és jó kifejezője a növények nitrogén szintjének. A változók közti összefüggések vizsgálatára főkomponens-analízis módszert használtunk, az így kapott eredmények alkalmasnak bizonyultak a tápanyag ellátottság kimutatásához és az abiotikus stresszek felderítéséhez. A méréseket 6-7 heteskorban végeztük, így a tünetek a kezelések többségében szemmel még nem volt látható a méréseink azonban megfelelően kimutatták és a feltételezett eltéréseket igazolták. A fluoreszcencia és a reflektancia együttes mérése a növényi működés pontosabb megfigyelését teszi lehetővé a jövőben, ezt adataink is bizonyítják. A kutatásunk következő lépéseként terepi mérésekkel kívánjuk összevetni a laborban mért adatainkat, hogy a gyakorlati alkalmazásáról is képet kapjunk, miként működnek a különböző mérések együtt, szántóföldi körülmények között.

6. Irodalom jegyzék

- Allaga, J., & Bódis, J. (2014). *Növénytan-Növényélettan*.
- Antal, J., Nyárai Horváth, F., Simits, K., & Varga, A. (2000). *Növénytermesztők zsebkönyve*.
- Balogh, J., Fóti, S., Gecse, B., Hidy, D., Kertész, P., Nagy, Z., Papp, M., & Pintér, K. (2016). *Növény Ökológia*.
- Belényesi, M., Kristóf, D., & Magyari, J. (2008). *Térinformatika elméleti jegyzet*. Szent István Egyetem.
- Birkás, M. (2017a). *Földművelés és földhasználat*. Mezőgazda Kiadó.
- Birkás, M. (2017b). *Talajművelési ABC*. Mezőgazda Lap- és Könyvkiadó Kft.
- Bratek, Z., Fodor, F., Király, I., Nyitrai, P., Parádi, I., Rácz, I., Rudnóy, S., Solti, Á., Szigeti, Z., & László, T. (2013). *A növényi anyagcsere élettana*.
https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0073_novenyi_anyagcsere/ch03s02.html
- Chen, J. C., Yang, C. M., Wu, S. T., Chung, Y. L., Charles, A. L., & Chen, C. T. (2007). Leaf chlorophyll content and surface spectral reflectance of tree species along a terrain gradient in Taiwan's Kenting National Park. *Botanical Studies*, 48(1), 71–77.
- Cilia, C., Panigada, C., Rossini, M., Meroni, M., Busetto, L., Amaducci, S., Boschetti, M., Picchi, V., & Colombo, R. (2014). Nitrogen Status Assessment for Variable Rate Fertilization in Maize through Hyperspectral Imagery. *Remote Sensing*, 6(7), 6549–6565.
<https://doi.org/10.3390/rs6076549>
- Csajbók, J. (2012). *Szántóföldi növények termesztése és növényvédelme*.
<http://www.agr.unideb.hu/ebook/szantofoldinovenyek/index.html>
- Devadas, R., Lamb, D. W., Simpfendorfer, S., & Backhouse, D. (2009). Evaluating ten spectral vegetation indices for identifying rust infection in individual wheat leaves. *Precision Agriculture*, 10(6), 459–470. <https://doi.org/10.1007/s11119-008-9100-2>
- Dobos, A. C. (2013). *Precíziós növénytermesztés*.
https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop412A/2011-0085_precizios_novenytermesztes/index.html
- Eng, L. S., Ismail, R., Hashim, W., & Baharum, A. (2019). The Use of VARI, GLI, and VIgreen Formulas in Detecting Vegetation In aerial Images. *International Journal of Technology*, 10(7), 1385–1394. <https://doi.org/https://doi.org/10.14716/ijtech.v10i7.3275>
- Guan, K., Berry, J. A., Zhang, Y., Joiner, J., Guanter, L., Badgley, G., & Lobell, D. B. (2016).

- Improving the monitoring of crop productivity using spaceborne solar-induced fluorescence. *Global Change Biology*, 22(2), 716–726.
<https://doi.org/10.1111/gcb.13136>
- Kalaji, H. M., Jajoo, A., Oukarroum, A., Brestic, M., Zivcak, M., Samborska, I. A., Cetner, M. D., Łukasik, I., Goltsev, V., & Ladle, R. J. (2016). Chlorophyll a fluorescence as a tool to monitor physiological status of plants under abiotic stress conditions. *Acta Physiologiae Plantarum*, 38(4). <https://doi.org/10.1007/s11738-016-2113-y>
- Kalaji, H. M., Rastogi, A., Živčák, M., Brestic, M., Daszkowska-Golec, A., Sitko, K., Alsharafa, K. Y., Lotfi, R., Stypiński, P., Samborska, I. A., & Cetner, M. D. (2018). 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.
<https://doi.org/10.1007/s11099-018-0766-z>
- Kastori, R., Plesničar, M., Panković, D., & Sakač, Z. (1995). Photosynthesis, chlorophyll fluorescence and soluble carbohydrates in sunflower leaves as affected by boron deficiency. *Journal of Plant Nutrition*, 18(9), 1751–1763.
<https://doi.org/10.1080/01904169509365021>
- Koncz, P., Balogh, J., Papp, M., Hidy, D., Pintér, K., Fóti, S., Klumpp, K., & Nagy, Z. (2015). Higher soil respiration under mowing than under grazing explained by biomass differences. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 103(2), 201–215.
<https://doi.org/10.1007/s10705-015-9732-3>
- KSH1. (n.d.). https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0012.html
- KSH2. (n.d.). https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0008.html
- Li, Z., & Guo, X. (2018). Non-photosynthetic vegetation biomass estimation in semiarid Canadian mixed grasslands using ground hyperspectral data, Landsat 8 OLI, and Sentinel-2 images. *International Journal of Remote Sensing*, 39(20), 6893–6913.
<https://doi.org/10.1080/01431161.2018.1468105>
- 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, 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>
- Mahajan, G. R., Sahoo, R. N., Pandey, R. N., Gupta, V. K., & Kumar, D. (2014). Using

- hyperspectral remote sensing techniques to monitor nitrogen, phosphorus, sulphur and potassium in wheat (*Triticum aestivum* L.). *Precision Agriculture*, 15(5), 499–522.
<https://doi.org/10.1007/s11119-014-9348-7>
- Major, I. (1987). *Mindennapi termőföldünk*. Mezőgazdasági Könyvkiadó Vállalat.
- Márkus, B. (2010). *Térinformatika I., A térinformatika alapfogalmai, kialakulása, fejlődése*.
https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0027_TEI1/ch01s03.html
- Migliavacca, M., Perez-Priego, O., Rossini, M., El-Madany, T. S., Moreno, G., van der Tol, C., Rascher, U., Berninger, A., Bessenbacher, V., Burkart, A., Carrara, A., Fava, F., Guan, J.-H., Hammer, T. W., Henkel, K., Juarez-Alcalde, E., Julitta, T., Kolle, O., Martín, M. P., ... Reichstein, M. (2017). Plant functional traits and canopy structure control the relationship between photosynthetic CO₂ uptake and far-red sun-induced fluorescence in a Mediterranean grassland under different nutrient availability. *New Phytologist*, 214(3), 1078–1091. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/nph.14437>
- Ördög, V., & Molnár, Z. (2011). *Növényélettan*.
https://regi.tankonyvtar.hu/hu/tartalom/tamop425/0010_1A_Prez_02-Novenyélettan/adatok.html
- Pais, I. (1980). *Mikrotápanyagok szerepe a mezőgazdaságban*.
- Peñuelas, J., Gamon, J. A., Fredeen, A. L., Merino, J., & Field, C. B. (1994). Reflectance indices associated with physiological changes in nitrogen- and water-limited sunflower leaves. *Remote Sensing of Environment*, 48(2), 135–146.
[https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257\(94\)90136-8](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/0034-4257(94)90136-8)
- Perez-Priego, O., Guan, J., Rossini, M., Fava, F., Wutzler, T., Moreno, G., Carvalhais, N., Carrara, A., Kolle, O., Julitta, T., Schrumpf, M., Reichstein, M., & Migliavacca, M. (2015). Sun-induced chlorophyll fluorescence and photochemical reflectance index improve remote-sensing gross primary production estimates under varying nutrient availability in a typical Mediterranean savanna ecosystem. *Biogeosciences*, 12(21), 6351–6367. <https://doi.org/10.5194/bg-12-6351-2015>
- R Core Team. (2021). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*.
<https://www.r-project.org/>
- Tamás, L. (2013). *Növényélettani vizsgáló módszerek*.
- Tuba, Z., & Csintalan, Z. (2009). *Mövényélettan*.
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>
- Zhao, C., Liu, L., Wang, J., Huang, W., Song, X., & Li, C. (2005). Predicting grain protein

content of winter wheat using remote sensing data based on nitrogen status and water stress. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 7(1), 1–9. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jag.2004.10.002>

7. Mellékletek

2. táblázat: Törzsoldatok receptjei

Stock solutions					
	Macronutrients	Mol wt	Conc. of stock M	stock ml	g in stock
A	KNO ₃	101.11	1	500 ml	50.56
B	Ca(NO ₃) ₂ x 4 H ₂ O	236.15	1	500 ml	118.08
C	NH ₄ H ₂ PO ₄	115.08	1	500 ml	57.54
D	MgSO ₄ x 7 H ₂ O	246.48	1	250 ml	61.62
E	K(H ₂ PO ₄)	136.09	1	250 ml	34.02
G	CaSO ₄ x 2 H ₂ O	172.17	1	250 ml	43.04
M	Micronutrient stock solution				
	MnCl ₂ · 4H ₂ O	197.91	0.011	1000 ml	2.18
	ZnSO ₄ · 7H ₂ O	287.54	0.004	1000 ml	1.15
	CuSO ₄ · 5H ₂ O	249.68	0.0008	1000 ml	0.20
	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ x 4H ₂ O	1235.86	0.0005	1000 ml	0.62
	H ₃ BO ₃	61.83	0.047	1000 ml	2.91
Fe	Iron stock solution				
	Fe-EDTA	367.05	0.0068	1000 ml	2.50

3. táblázat: Tápanyagokhoz szükséges törzsoldat mennyiségek

	full	N10	N50	N150	B10	B50	B75
stock	ml / 5liter	ml / 5liter	ml / 5liter	ml / 5liter	ml / 5liter	ml / 5liter	ml / 5liter
A	30	3	15	50	30	30	30
B	20	2	10	32.5	20	20	20
C	20	2	10	20	20	20	20
D	5	5	5	5	5	5	5
E	0	25	15	0	0	0	0
G	0	20	10	0	0	0	0
M	5	5	5	5	0	0	0
M-B	0	0	0	0	5	5	5
Bór	0	0	0	0	0.5	2.5	3.75
Fe	100	100	100	100	100	100	100
víz ml	4820	4838	4830	4787.5	4819.5	4817.5	4816.25