

A tápanyag-, hő- és vízhiánystressz vizsgálata reflektancia és fluoreszcencia mérések alapján napraforgó növényeken

¹BENE KRISTÓF - ¹BESENYEI ÁGOTA - ¹MÉSZÁROS ÁDÁM - ^{1,2}FÓTI SZILVIA -
¹DE LUCA GIULIA - ¹BALOGH JÁNOS

¹MATE Növénytermesztési-tudományok Intézet, Gödöllő

²HUN-REN-MATE Agroökológiai Kutatócsoport, Gödöllő

Összefoglalás

A kísérlet során többféle adatgyűjtést alkalmaztunk, reflektancia méréseket, fluoreszcencia méréseket, fotoszintézis méréseket, valamint pigmenttartalom méréseket. A reflektancia spektrumokból vegetációs indexeket számoltunk, valamint a fluoreszcencia adatokból kiválogattuk a számunkra leghasznosabbakat. A fotoszintézis és pigmenttartalom mérések adatait összefüggésbe hoztuk a vegetációs indexekkel. Az indexek közül a Vigreen index eredményesnek bizonyult az abiotikus stresszek felismerésében és szétválasztásában, továbbá a nitrogénellátottság meghatározásában. A fotoszintézis mértékével leginkább a PRI index korrelált, az mNDVI index pedig a pigmenttartalommal mutatott szoros összefüggést.

Több fluoreszcencia paramétert megvizsgálva arra jutottunk, hogy az F_s -érték alkalmas lehet a vízhiánystressz felismerésére, különösen, ha mérését reflektancia mérésekkel párhuzamosan végezzük, amelyekből a szenescenciára érzékeny indexet (PSRI) lehet számítani.

Ez a megfigyelés terepi körülmények között is hasznosítható lehet, hiszen a rövidtávú vízhiánystressz növelte, míg a hosszú távú csökkentette (a pigmentátlóság csökkenése miatt) a fluoreszcencia (F_s) mértékét.

Kulcsszavak: napraforgó, reflektancia, fluoreszcencia, stressz, tápanyaghiány

Analysis of nutrient, heat and water deficit stress by reflectance and fluorescence measurements in sunflower plants

¹K. BENE - ¹Á. BESENYEI - ¹Á. MÉSZÁROS - ^{1,2}SZ. FÓTI -
¹DE LUCA GIULIA - ¹J. BALOGH

¹MATE Institute of Crop Production Sciences, Gödöllő

²HUN-REN-MATE Agroecological Research Group, Gödöllő

Summary

During the experiment we used several types of data collection, reflectance measurements, fluorescence measurements, photosynthesis measurements and pigment content measurements. We calculated vegetation indices from the reflectance spectra and selected the most useful ones from the fluorescence data. Photosynthesis and pigment content measurements were correlated with vegetation indices. Among the indices, the VIgreen index proved to be effective in detecting and partitioning abiotic stresses and in determining nitrogen supply. The PRI index correlated best with the level of photosynthesis and the mNDVI index showed a strong correlation with pigment content.

By examining several fluorescence parameters, we conclude that the F_s value can be useful for detecting water stress, especially when measured in parallel with reflectance measurements from which the sensitivity to senescence index (PSRI) can be calculated.

This observation may also be useful in field conditions, as short-term water deficit stress increases, while long-term stress decreases (due to loss of pigmentation) fluorescence (F_s).

Keywords: sunflower, reflectance, fluorescence, stress, nutrient deficiency

Bevezetés

A szántóföldi körülmények között élő növényeket többféle abiotikus stresszhatás éri, melyek vizsgálatára egyre szélesebb körben alkalmazható a

távérzékelés. Nagy mennyiségű információt tudunk gyűjteni, azonban ennek értelmezése nem mindig egyszerű feladat. Jelen kísérletben olyan természetes körülmények között is mérhető reflektancia és fluoreszcencia paraméterekkel foglalkoztunk laboratóriumi környezetben, melyek a növények stresszválaszait nem-invazív módon detektálják.

Ha a növényt stresszhatás éri, a fotoszintetikus fényelnyelés az első között változik, így a visszavert és a növényzet által kibocsátott sugárzás vizsgálata lehet a kulcs a betegségek és egyéb növényt érő negatív hatások felismerésében (Balogh et al. 2016), mert ezek részaránya párhuzamosan szintén módosul, és a stresszre jellemző sajátos spektrum jön létre.

A fotoszintetikus apparátus állapotának jellemzésére és a stresszállapot leírására gyakran használják a fotoszintetikus elektrontranszportot jellemző klorofill-a fluoreszcencia paramétereket és ezek arányait (Kalaji et al. 2016). A fluoreszcencia mértéke többlet tápanyagok hatására (pl. nitrogén, foszfor) növekszik, és a tápanyagellátottság közti különbségek abban az esetben is megmaradnak, ha a növényt szárazságstressznek tesszük ki (Perez-Priego et al. 2015, Migliavacca et al. 2017). Hő hatására a PS II reakció centrum maximális fluoreszcenciája (F_m) csökken, de a minimum fluoreszcenciája (F_o) növekszik, így ez megváltoztatja az F_v/F_m értékét is, mely PSII maximális kvantumhatékonyságát jellemzi, és értékének változásaiból következtetni tudunk a növény fotoszintetikus kapacitására. Gyengébb nitrogénellátottság és vízhiány mellett az F_m kisebb értéket vesz fel, míg az F_o változatlan marad, ami szintén az F_v/F_m paraméter változásával jár (Kalaji et al. 2016). A fluoreszcencia mérések alkalmasak lehetnek a növényi produkció vizsgálatokhoz, s ezáltal hozamtérképek felállításához is (Guan et al. 2016). Másrészt, a növényi produkció jól jellemezhető a fotoszintetikus CO_2 felvétel mértékével, így a levél vagy állomány szintű gázcsere mérése is gyakori eszköze a stresszhez kapcsolódó vizsgálatoknak (Migliavacca et al. 2017).

Reflektancia vizsgálatokkal a növényzet által visszavert sugárzást mérjük, mely származhat közvetlenül a levélfelületről, de a sugárzás a levélbe jutva, annak belső részeiről is visszaverődhet. A visszaverődés mértékét és minőségét elsősorban a fény elnyeléséért felelős pigmentmolekulák határozzák meg. A fény abszorpciója a kék és a vörös, míg a visszaverődés nagyrészt a zöld és a közeli infravörös hullámhossz-tartományban történik. A hiperspektrális mérések jellemzője, hogy több és keskenyebb sávot mérnek egyszerre, így eddig pl.

multispektrális felvételek számára ismeretlen tulajdonságokat is felderítenek (Dobos 2013). Önmagukban ezek a reflektancia eredmények nehezen alkalmazhatók, így kettő vagy több sávot felhasználva vegetációs indexeket képzünk belőlük (Balogh et al. 2016), melyek így már alkalmasak lehetnek például a tápanyaghiány okozta stresszek feltárására (Mahajan et al. 2014).

A napraforgót hazánkban 613 000 hektáron termesztik (KSH), ami az összes termőterület (KSH2) több mint 15%-a. Egyes hibridek olajtartalma eléri a 60%-ot, a nyersfehérje-tartalom meghaladhatja a 17%-ot is. A napraforgónak ezért nemcsak a humánélelmiszerben, hanem a takarmányozásban is kiemelkedő a szerepe. Jelentős elterjedését jó alkalmazkodóképességének köszönheti. Hazánk termőterületeinek mintegy 90%-a alkalmas jövedelmező napraforgó termesztésre (Antal et al. 2000). A napraforgó tenyészidőszakában gyakori a szárazság- és hőstressz, valamint érzékeny a bórhiányára, melyet az erre jellemző klorózis kísér, így ennek megfelelően a jelen kutatásban vízhiányt és hőstresszt alkalmaztunk egészséges és tápanyaghiányos növényeken.

Célunk a két vizsgálati módszer – a fluoreszcencia és reflektancia mérések – együttes alkalmazása volt laboratóriumi körülmények között nevelt napraforgó növényeken. Vizsgálatunkban különböző tápanyagok hiányát állítottuk be többféle koncentrációban, majd a beállítások után további hő- és szárazságstressznek tettük ki a növényeket. A vizsgálat tárgya az volt, hogy a beállított stresszhatások hogyan jelennek meg a napraforgó növények terepen is mérhető fluoreszcencia és reflektancia paramétereiben, valamint, hogy az alkalmazott non-invazív mérések mennyire érzékenyek és/vagy specifikusak ezen stresszhatások (korai) kimutatására.

Anyag és módszer

Kutatásunkban a Syngenta Bacardi típusú napraforgóját használtuk. A növénynevelés két ismétlésben, ismétlésenként 28 növényrel történt héthetes korig, heti rendszerességű tápoldatcserével. A tápoldat egy Hoagland tápoldat volt (Lincoln et al. 2015), amelyben az N és B mennyiségeket módosítottuk a kezelések szerint (1. táblázat). A nevelés egész folyamata növénynevelőben zajlott, ez biztosította az optimális körülményeket, azaz a megfelelő hőmérsékletet, páratartalmat, illetve megvilágítást (22 °C, 60%, napi 12 óra megvilágítás). A beállított tápanyaghiányok a következők voltak.

1. táblázat. A tápoldatok nitrogén- és bórtartalma

Növény (1)	Kezelés (2)	N mennyiség (3)	B mennyiség (4)
Full	Teljes tápoldat (5)	252,0 ppm	0,5076 ppm
N10	Nitrogénhiány (6)	25,2 ppm	0,5076 ppm
N50	Nitrogénhiány (6)	126,0 ppm	0,5076 ppm
N150	Nitrogéntöbblet (7)	378,0 ppm	0,5076 ppm
B10	Bórhány (8)	252,0 ppm	0,05076 ppm
B50	Bórhány (8)	252,0 ppm	0,2538 ppm
B75	Bórhány (8)	225,0 ppm	0,3807 ppm

Table 1. Nitrogen and boron content of nutrient solutions. (1) Crop, (2) Treatment, (3) Amount of N, (4) Amount of B, (5) Whole nutrient solution, (6) Nitrogen deficiency, (7) Nitrogen surplus, (8) Boron deficiency

A hatodik héten két további stresszhatás került bevezetésre, két különböző mértékű szárazságstressz, valamint hőstressz. A vízelvonás polietilén-glikol (PEG 6000) kezeléssel történt. A műszeres méréseket hathetes korban a stresszhatás előtt, és héthetes korban a stresszhatás után is elvégeztük. Minden tápoldat-koncentráció beállítás nyolc növényt tartalmazott (összesen 54 növény). A csoportokból kettő növény kontroll maradt, kettő enyhe szárazságstresszben részesült (a tápoldat ozmotikus potenciálja -0,15 MPa, PEG 100), kettő pedig erősebb szárazságstresszben (a tápoldat ozmotikus potenciálja -0,49 MPa, PEG 200), valamint a maradék kettő növényt három napig hőstressznek tettük ki. A hőstressz beállítás során figyelembe vettük a természetes körülményeket, ennek megfelelően a nappali órákban, naponta négy órán keresztül 40 °C-nak, a fennmaradó időben 27–40 °C közötti hőmérsékletnek, míg éjszaka 27 °C-nak tettük ki a növényeket. A hőstressz beállításához Memmert HPP410 klímakamrát használtunk.

Az elvégzett mérések

Fluoreszcencia paraméterek vizsgálatához a használt műszer egy FMS-2 (Hansatech, Németország) fluorométer volt. Előzetes sötétadaptáció után (20 perc) a következő fluoreszcencia-paramétereket mértük: alapfluoreszcencia (F_0), maximális fluoreszcencia (F_m). Három perc megvilágítás után a terepi

körülmények között mérhető nap indukálta fluoreszcenciához (SIF) nagyon hasonló, ún. steady-state fluoreszcenciát (F_s) mérhettünk. A mért paraméterek segítségével számítottunk még Rfd (fluorescence decrease ratio, ami a nettó fotoszintézissel korrelál) értéket, a következőképpen:

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

A fotoszintetikus CO₂ felvétel és transzspiráció mérések infravörös gázanalizátoros módszerrel (CIRAS-2, PPSYSTEM, UK), mindig azonos hőmérsékleten, előre beállított fényintenzitás mellett (1500 μmol foton m^2/s) történtek.

A reflektancia mérésekhez Qmini spektrométert (RGBPhotonics, Németország) használtunk. A beállított mérési tartomány 250–1050 nm, a felbontás 0,3 nm volt. A növények legfelső kifejlett leveleinek mérését a stressz előtt (6. héten) és stressz után (7. héten) is elvégeztük. A vizsgálathoz a Waves programot használtuk, a megvilágítást egy ASD Illuminator lámpával (Malvern Panalytical, USA) biztosítottuk. A mért reflektancia spektrumok adatait felhasználva hiperspektrális vegetációs indexeket számoltunk, melyek a következők voltak.

- Módosított vörös él normalizált index (Modified red edge Normalized Difference Vegetation Index = mNDVI) (Li és Guo 2018):

$$mNDVI = \frac{R_{750} - R_{705}}{R_{750} + R_{705} - 2 * R_{445}}$$

- Fotokémiai Reflektancia Index (Photochemical Reflectance Index = PRI) (Devadas et al. 2009):

$$PRI = \frac{R_{531} - R_{570}}{R_{531} + R_{570}}$$

- Növényi szenescencia index (Plant Senescence Reflectance Index = PSRI) (Devadas et al. 2009):

$$PSRI = \frac{R_{red} - R_{green}}{R_{NIR}}$$

- Módosított Klorofill Abszorpciós Reflektancia Index és Módosított Háromszög Vegetációs Index (Modified Chlorophyll Absorption in Reflectance Index/Modified Triangular Vegetation Index 2) (Cilia et al. 2014):

$$MCARI = R700 - R670 - 0.2 \times (R700 - R550) \times (R700/R670)$$

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

- Alkalmaztunk még Zöld Vegetációs Indexet (VIGreen), amely annyiban tér el a többitől, hogy nincs szükség multi- vagy hiperspektrális mérőműszerekre, hanem egy hagyományos fényképezőgéppel (Canon EOS 350D) készült képből is létrehozható. A látható fény tartományából a vörös és zöld reflektancia arányából számítható (Koncz et al. 2015):

$$VIGreen = \frac{R_{green} - R_{red}}{R_{green} + R_{red}}$$

A méréseket minden esetben a lehető legfelső, de már kifejlett levélen végeztük. A kísérlet végén a mért levelekből mintákat vettünk, és meghatároztuk a fotoszintetikus pigmentek mennyiségét (klorofill-a és -b, összkarotinoid tartalom). A pigmenttartalom meghatározásához 1 cm²-es korongokra vágunk dugófúróval a levéllemezből. Dörzsmozsárba helyeztük a mintát, majd hozzáadtunk 0,08–0,12 g kalcium-karbonátot, illetve az eldörzszölés segítése érdekében kvarchomokot, valamint 1 ml tiszta acetont (≥99%). Eppendorf csőben az így kapott mintát 2 ml jelzésig acetonnal hígítottuk, majd 4 °C-on 5 percig 10 000 fordulat/perc fordulaton centrifugáltuk. Az így kapott pigmentoldatokat szűkített küvetába pipettáztuk, majd spektrofotométerrel (Shimadzu UV1601) 470, 645 és 662 nm-en fotometráltuk (Lichtenthaler és Buschmann 2001).

A növényeket tömegállandóságig szárítva hajtás és gyökér biomasszát határoztunk meg.

Adatfeldolgozás

Az adatok feldolgozása R programban történt, főkomponens-analízis (PCA) során stats package (R Core Team 2021), a denzitás függvények esetében ggplot2 package felhasználásával (Wickham 2016).

Vizsgálati eredmények

Az 1. ábrán látható a kezelésekben mért eredmények megjelenítése PCA módszerrel. Mindkét főtengety mentén pozitív irányba esnek az egészséges növények, így a kontroll csoport és a magasabb tápanyagkoncentrációt kapott növények (N150 csoport, valamint a B75 csoport). Az mNDVI index a növények pigment koncentrációjával, a Vigreen a levélfelület nagyságával mutat jó kapcsolatot (Koncz et al. 2015, Li és Guo 2018), melynek következtében az egészséges növények esetében ezek az értékek magasabbak.

1. ábra. A tápanyaghiány alapján bontott eredmények főkomponens-analízis módszerrel ábrázolva

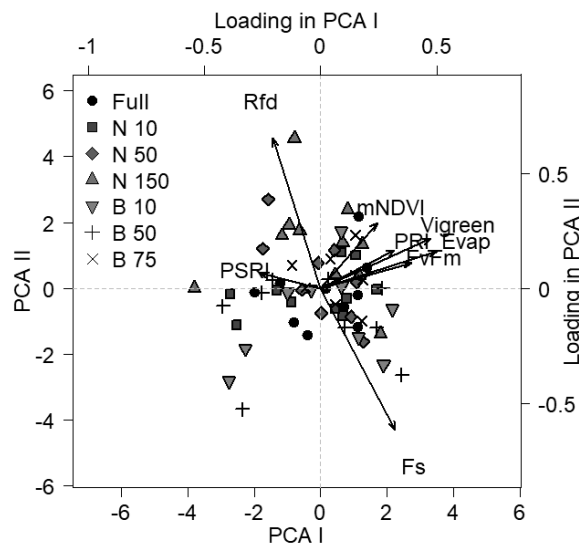


Figure 1. Results broken down by nutrient deficiency, plotted using principal component analysis.

A párologtatás (az 1. ábrán Evap) mértéke a fotoszintetikus aktivitással arányosan nő, így a PRI indexszel együtt ez is pozitív irányba mutat. Az F_v/F_m érték a fotoszintetikus rendszerek hatékonyságát jellemzi, 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 mutat az y-tengelyen, az x-tengelyen viszont negatív irányba, szemben a többi eredménnyel. Ebben az irányban főként a többletnitrogént kapó növények vannak, hiszen a megnövekedett pigmentmennyiség miatt a fluoreszcencia mértéke is növekszik. Ezzel a változóval ellentétes az F_s érték, mely az állandó fluoreszcencia (steady-state) mértékét fejezi ki. A PSRI index a szeneszcencia mértékére, azaz a növények csökkent pigmenttartalmára érzékeny, tehát az mNDVI és Vgreen indexekkel ellentétes irányba mutat (Devadas et al. 2009). A sárgult és barna levelek nem (vagy csak nagyon kis mértékben) fotoszintetizálnak, és párologtatnak. Emiatt a PSRI az F_s értéktől is különvállik, hiszen a barna, elhalt levelek fluoreszcenciája is lecsökken, vagy teljesen megszűnik.

A 2. ábrán a stresszhatás alapján csoportosítottuk az eredményeket. Jól látszik, hogy a kontroll csoport – amely csak tápanyaghiány-kezelést kapott, plusz abiotikus stresszt nem – az első főtengey 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 a napfény-indukálta fluoreszcencia mértéke szintén csökkent (Perez-Priego et al. 2015). A 2. ábra alapján azok a vízhiányos növények, melyek jelentős mennyiségű vizet veszítettek, a klorofilltartalom csökkenése miatt a PSRI index felé tolódnak, azonban azok, amelyek még több működő zöld szövettel rendelkeztek a leveleikben, magasabb fluoreszcenciát mutattak, így az F_s érték felé helyezkedtek el. Hő hatására a fotoszintézis üteme csak egy bizonyos pontig képes növekedni, azt elérve károsodnak a fotokémiai rendszerek, a széndioxid-felvétel csökken, és a fluoreszcencia révén bekövetkező energialeadás kerül előtérbe, mely szintén megjelenik a 2. ábrán az F_s irányában. Hőstressz hatására az F_m csökken, de az F_0 és F_s növekedhet (Kalaji et al. 2016). Ilyen módon mind az F_s , mind pedig a PSRI értékek összefüggést mutatnak az abiotikus stresszhatásokkal, de el is különítik a károsodás mértékét: az F_s nagyobb a hosszú távon még nem károsodott, működő szövetekkel rendelkező leveleknél, míg a PSRI nagyobb értékeket vesz fel a már károsodott, elhalt szövetek esetében.

2. ábra. A stresszhatások alapján bontott eredmények főkomponens-analízis módszerrel

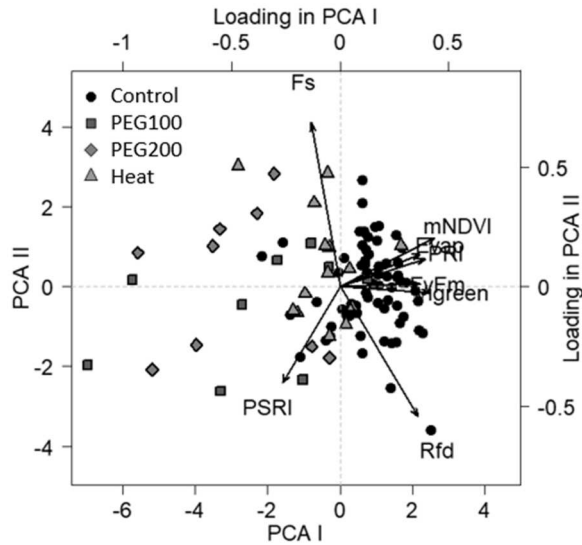


Figure 2. Results disaggregated by stress effects using principal component analysis.

Denzitás függvények

A további adatelemzéshez néhány mért változó eloszlását szeretnénk kiemelni. A 3. A) ábrán látható az egyszerű, RGB fotókból származó VIgreen index alakulása stresszhatások alatt. Ez az index légifelvétel 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 eloszlást 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.

Ha a mérési adatokat a nitrogén-koncentrációk alapján bontjuk, akkor is hasonlóan hatékonyan bizonyul ez az index (3. B) ábra). A nagy N-hiánnyal nevelt N10 mutatja a legalacsonyabb értékeket, míg az N50 a kontrollhoz hasonló, de valamivel az alatt maradó értékeket produkál, és a többletnitrogént kapó N150

a kontrollnál is magasabb értékeket vesz fel. A Vgreen index tehát megfelelően alkalmazható a nitrogénellátottság megállapítására (Zhao et al. 2005).

3. ábra. A) Vgreen index sűrűségfüggvénye a stresszhatások esetében, B) Vgreen index alakulása a nitrogén-koncentráció függvényében

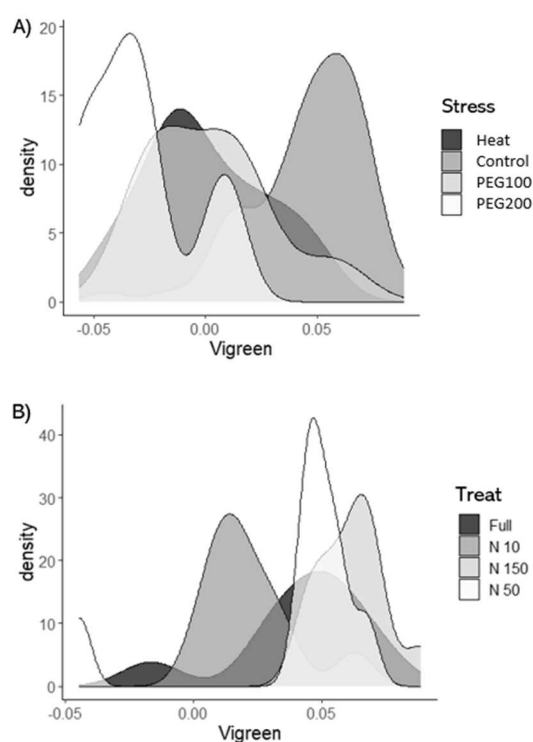


Figure 3. A) Density function of Vgreen index for stress effects, B) Evolution of Vgreen index as a function of nitrogen concentration.

A Vgreen adatok átlagértékein jól látszik a nagyságrendbeli különbség a stressztényezők hatása előtt és alatt (2. táblázat). A stressz előtti adatok is eltérnek egymástól a tápanyaghiány következtében, a kevés nitrogént kapott csoportnak (N10) rosszabb az állapota. Hozzáadott stresszhatás után minden érték lecsökkent, esetleg negatívba fordult, mert a képletben szereplő, a zöld tartományban visszavert sugárzás nagyobb mértékben csökken stressz hatására,

mint a red, azaz a visszavert sugárzás vörös tartománya. Nem meglepő módon a legalacsonyabb VIgreen értéket az N10-es csoport mutatta erős vízhiány esetén.

2. táblázat. A VIgreen index értékek átlagai és szórása a kezelések előtt és után

VIgreen	Stressz előtt (1)	PEG100-as beállítású vízhiánystressz (2)	PEG200-as beállítású vízhiánystressz (3)	Hőstressz (4)
Full	0,050 (±0,011)	-0,010 (±0,011)	-0,029 (±0,040)	-0,028 (±0,018)
N10	0,015 (±0,012)	-0,020 (±0,059)	-0,045 (±0,008)	-0,016 (±0,016)
N50	0,052 (±0,022)	-0,003 (±0,032)	-0,032 (±0,013)	0,014 (±0,021)
N150	0,059 (±0,010)	-0,008 (±0,004)	-0,015 (±0,027)	0,021 (±0,015)
B10	0,054 (±0,033)	-0,017 (±0,017)	-0,010 (±0,001)	0,021
B50	0,052 (±0,038)	0,012	-0,033	0,002
B75	0,055 (±0,021)	-0,022	-0,043	-0,011

Table 2. Means and standard deviations of VIgreen index values before and after treatments. (1) Before stress, (2) Water deficiency stress of PEG100, (3) Water deficiency stress of PEG200, (4) Heat stress

A fluoreszcencia paraméterek közül az F_s (4. 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.

Ezt tapasztaltuk a PCA esetében is, ahol szintén megmutatkozott az erős vízhiány és az F_s pozitív kapcsolata (2. ábra). A fluoreszcencia mértéke a fotoszintetikus rendszerek hatékonyságának csökkenése miatt nő a hőkezelés 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 a fénykibocsátás megszűnik. Az F_s a stresszhatások alatt nagyobb értéket vett fel, és az erősebb vízhiány a legtöbb esetben nagyobb F_s értékkel párosult. A bórhiányos kezelések esetében – főként, ahol nagy hiány van (B10, B50) – az F_s érték nem növekedett a stresszhatások alatt, hanem csökkenő tendenciát

követett. 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 vezet (Pais 1980).

4. ábra. Az F_s érték változása a stresszhatások alatt

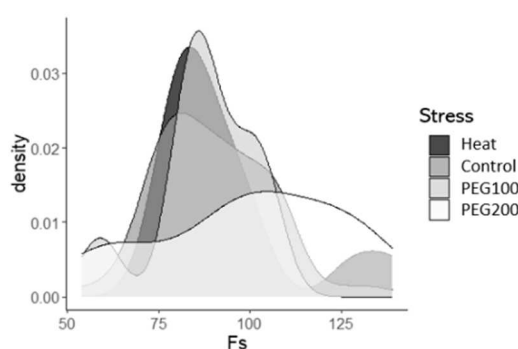


Figure 4. Changes in F_s under stress effects.

A fluoreszcencia értékek közül még az R_{fd} is széleskörűen alkalmazott paraméter a stresszhatások detektálására (Lichtenthaler és Buschmann 2005). Kísérletünkben a kontroll különvált a többi növénytől, itt a legmagasabb az R_{fd} értéke. A hő és enyhe vízhiány nem válik el egymástól, de az erős vízhiány elkülöníthető, ott a legalacsonyabb R_{fd} értékek jelentek meg. Az R_{fd} esetében a nitrogén-ellátottság is könnyen felismerhető. Az N_{10} értékei jóval a kontroll alatt maradnak, míg az N_{50} szinte a kontroll szintjén van, de attól még elkülöníthető. A többletnitrogént kapott N_{150} csoport magasabb R_{fd} értéken lokális maximumot mutat, tehát nem egységesen reagálnak a növények pozitív vagy negatív irányba. Már az enyhe vízhiány is jelentősebb csökkenést eredményez a kezelés előtti állapothoz képest, míg több esetben is (N_{10} , B_{75}) közel felére vagy még tovább csökken az R_{fd} az erős vízhiány hatására. Hőhatásra a legalacsonyabb értékeket a legkisebb koncentrációjú tápanyagot kapott csoportok mutatják (N_{10} , B_{10}). A bórhiányos kezelések (B_{10} , B_{50}) is kisebb R_{fd} értékkel rendelkeznek a bórhiány okozta csökkent

kvantumhatékonyság és kisebb intenzitású elektrontranszport miatt (*Kastori et al.* 1995).

Vegetációs indexek

Mivel a kísérlet egyik fontos kérdése a tápanyaghiány detektálhatósága volt, ezért vizsgáltuk a tápanyaghiány és az egyes indexek kapcsolatát. 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 a napraforgó növényekről (*Peñuelas et al.* 1994). Ez az érték a fotoszintézis intenzitásával együtt növekszik, így alkalmas a fotoszintetikus apparátusok aktuális hatásfokának a kimutatására. A nettó fotoszintézis és a PRI index lineáris regressziós egyenlete:

$$\text{Nettó fotoszintézis} = 8,7831 + 103,9702 * \text{PRI}; r^2 = 0,2003; P < 0,001.$$

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, és lehetővé teszi a stresszelt növények felismerését (*Devadas et al.* 2009). 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 klorofilltartalom vizsgálata gyakorlati szempontból is nagyon fontos. Az mNDVI index terepi körülmények között is jól mérhető adat, többféle vegetáción is szignifikáns az összefüggés a klorofilltartalommal (*Chen et al.* 2007). Magasabb értékei jellemzően magasabb klorofill-a/-b tartalmat jelentenek (5. ábra), ami a fotoszintézis hatékonyabb működését jelzi.

A regressziós egyenes egyenlete:

$$\text{mNDVI} = 0,327894 + 0,016540 * \text{Pigmenttartalom}; r^2 = 0,4085; P < 0,001.$$

A klorofill-a és -b pigmenttartalom vízhiány esetén csökken minden vizsgált csoportban, azonban a hőstressz nem minden esetben idéz elő nagymértékű csökkenést. A nitrogéntartalom növekedése a pigmenttartalom növekedésével jár együtt, nemcsak a kezelések előtt, hanem az enyhe vízhiány és a hőstressz alatt is. Bórhány esetében a pigmenttartalom a koncentráció különbségeket nem követi, de a kezelések hatására ugyanúgy csökken, mint a nitrogénkezelések csoportjaiban.

5. ábra. A pigmenttartalom (klorofill-a és -b) és az mNDVI index összefüggése

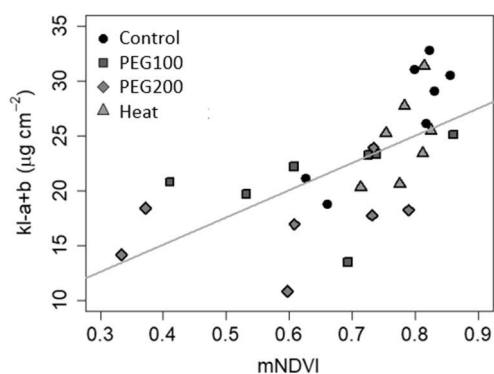


Figure 5. Relationship between pigment content (chlorophyll-a and -b) and mNDVI index.

IRODALOM

- 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. Növényökológia.
- 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>

- 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 növényteresztés. 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.-Lukasik, 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>
- 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.-Knapp, M.*: 2005. How to correctly determine the different chlorophyll fluorescence parameters and the chlorophyll fluorescence decrease ratio RFd of leaves with the PAM fluorometer. *Photosynthetica*. 43: 379-393. <https://doi.org/10.1007/s11099-005-0062-6>
- Lincoln, T.-Zeiger, E.-Møller, I. M.-Murphy, A.*: 2015. *Plant physiology and Development*. 761.

- 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>
- 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>
- 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/>
- 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>

A szerzők levelezési címe - Address of the authors:

Bene Kristóf - Besenyei Ágota - Mészáros Ádám -
Dr. Fóti Szilvia - De Luca Giulia - Dr. Balogh János
MATE Növénytermesztési-tudományok Intézet
Gödöllő
Páter Károly u. 1.
H-2100

Dr. Fóti Szilvia
HUN-REN-MATE
Agroökológiai Kutatócsoport
Gödöllő
Páter Károly u. 1.
H-2100