

MAGYAR AGRÁR- ÉS ÉLETTUDOMÁNYI EGYETEM
KAPOSVÁRI CAMPUS

NÖVÉNYTERMESZTÉSI-TUDOMÁNYOK INTÉZET

AGRONÓMIA TANSZÉK

**Abiotikus stresszhatások mint a hő és a nitrogénhiány
összefüggésének vizsgálata kukorica (*Zea mays* L.) juvenilis
fenológiai fázisában nem-invazív képalakító technikák
felhasználásával.**

TDK DOLGOZAT

Készítette:

Furián Norbert

SED2FX

Osztatlan agrármérnök szakos hallgató

Konzulensek:

Dr. Hoffmann Richárd

egyetemi docens

Dr. Jócsák Ildikó

egyetemi adjunktus

Kaposvár
2025.

Tartalomjegyzék

Oldal

1.	Bevezetés.....	4
1.1.	Vizsgált téma aktualitása	4
2.	Célkitűzés	5
3.	Szakirodalmi áttekintés	5
3.1.	Kukorica eredete, származása	5
3.2.	A kukorica jelentősége a világban és Hazánkban	6
3.3.	Kukorica legfontosabb „stresszorai”	6
3.3.1.	A nitrogénhiány hatása a kukorica korai fejlődésére	7
3.3.2.	A hőstressz negatív hatása a kukoricára	8
3.4.	Növényi stressz detektálása in- vivo, nem-invazív rendszerekkel.....	10
3.4.1.	Késleltetett fluoreszcencia	10
3.5.	A homok és a kőzetgyapot, mint termesztőközegek a kísérletes növénynevelésben	11
3.5.1.	Sárga homok termőközeg jellemzői.....	11
3.5.2.	Kőzetgyapot termesztőközeg jellemzői.....	12
4.	Anyag és módszer	12
4.1.	A kísérletben felhasznált anyagok, növénynevelés módszere	12
4.2.	Kezelések	13
4.3.	Adatgyűjtés és feldolgozásának módszertana.....	16
5.	Eredmények és értékelésük	18
5.1.	A két vizsgált termesztőközeg összehasonlítása.....	18
5.1.1.	Különböző tápoldatokkal kezelt növénycsoportok magasságváltozásának elemzése	18
5.1.2.	Biofoton-emisszió mérés eredményeinek kiértékelése a közeghatást vizsgálva ..20	
	A vizsgált termesztőközegekben nevelt növénycsoportok kiindulási fotonemisszió értéke	21
	Hoagland tápoldattal kezelt termőközegben nevelt növények fotonemisszió értékeinek lefutása a mérés második percétől	22
	Nitrogénmentes tápoldattal kezelt termőközegben nevelt növények fotonemisszió értékeinek lefutása a mérés második percétől	24
	Ioncserélt vízzel öntözött termőközegben nevelt növények fotonemisszió értékeinek lefutása a mérés második percétől	26
	A közegek hatásainak értékelése	27
5.2.	Hőstressz hatásának vizsgálata homok tápközegben	28

5.2.1.	Elemtartalom vizsgálat kiértékelése	28
5.2.2.	Biofoton emisszió eredményeinek alakulása hőstressz hatására homok nevelőközegben	30
	Hőkezelt és kontrollcsoportok kiindulási biofoton emisszió értéke	30
	Hoagland tápoldattal kezelt csoport fotonemisszió értékeinek összehasonlítása indukált hőstressz hatását követően a mérés második percétől.....	31
	Nitrogénmentes tápoldattal kezelt csoport fotonemisszió értékeinek összehasonlítása indukált hőstressz hatást követően a mérés második percétől.....	32
	Ioncserélt vízzel öntözött csoport fotonemisszió értékeinek összehasonlítása indukált hőstressz hatást követően a mérés második percétől	33
	A hőstressz hatásainak értékelése	34
	Eredményekből fakadó gyakorlati szempontú javaslatok	35
6.	Összefoglalás	35
7.	Irodalomjegyzék	39
8.	Köszönetnyilvánítás	41

1. Bevezetés

1.1. Vizsgált téma aktualitása

Napjaink mezőgazdasági termelésének sikerességét egyre nagyobb mértékben befolyásolják a szélsőséges abiotikus tényezők. Bár Hazánk teljes területére a mérsékelt kontinentális éghajlat jellemző, a klímaváltozás hatására egyre gyakrabban fordulnak elő szélsőséges időjárási jelenségek, amelyek komoly kihívást jelentenek a hazai mezőgazdaság számára. Az éves átlaghőmérséklet emelkedése a tavaszi és a nyári hónapokban az egyes növényekre nézve termés csökkentő hatást gyakorolhat a számukra okozott hőstressz miatt. Az éghajlatváltozással összefüggésben az esőzések időbeli és térbeli eloszlása is egyre szélsőségesebbé válik. Gyakoriak a hosszabb száraz időszakok, melyeket hirtelen lezúduló, nagy intenzitású záporok, zivatarok követhetnek. Az időszakos vízhiány következtében a növények fejlődése és növekedése jelentős károkat szenved.

Az aszály Magyarország egyik legnagyobb kihívása a mezőgazdaságban. A tavaszi és a nyári hónapokban jelentkező hosszú szárazságok, a korábbi évekhez képest jóval melegebb periódusok nagyban befolyásolják a realizálható terméshozamot, különösen a csapadékra érzékeny növényekét, mint például a kukorica. Emellett az extrém hőmérsékleti ingadozások és a hőhullámok intenzitása is nőtt. Ez nemcsak a növények asszimilációját befolyásolja, hanem fokozza a különböző növénybetegségek és kártevők terjedését is. A jövőben a nemesítőházaknak és a gazdálkodóknak együtt kell válaszokat találni a problémákra, különben a Kárpát-medencében kétségessé válhat a kukorica jelenlegi volumenben történő termesztése.

De miért ilyen fontos számunkra ennyire ez a kultúra? Termőterülete a 2023-ban 771 ezer hektár volt (KSH, 2024), ami az ország teljes szántóterületének még így is 18,5%-át lefedi. Jelentős gazdasági szereppel bír Magyarországon, elsősorban az állattenyésztés és az élelmiszeripar alapanyagaként vált fontossá. A magyar kukorica egy része belföldön kerül felhasználásra, főként abraktakarmányként, de emellett jelentős részét exportálják. A kukorica exportja elsősorban az EU-n belüli országok felé irányul, ahol a magyar kukorica jó hírneve előnyös helyzetbe hozhatja kereskedőket és ezen keresztül a hazai termelőket. Bár a kukorica egy jövedelmező kultúrának számít, a piaci ingadozások és a kedvezőtlen időjárási körülmények jelentős kockázatot fognak jelenteni a termesztés szempontjából. A tendencia már látható, sajnos az utóbbi években a hazai kukorica termőterület csökkenését tapasztalhatjuk.

2. Célkitűzés

A kísérlet kezdetekor célul tűztük ki egy olyan gazdasági haszonnövény vizsgálatát, amely mellett, hogy nagy gazdasági jelentőséggel bír, termesztetőségére jelentős hatást gyakorolnak az abiotikus környezeti tényezők. Éppen ezért esett a választásunk a kukoricára, mint a hazánkban és a világon is az egyik legnagyobb területen termesztett gazdasági haszonnövényre, melynek fajlagos nitrogén igénye magas és a hőstressz jelentős termés kiesést képes okozni akár már a korai fejlődés időszakában. **A vizsgálatok középpontjában a nem-invazív képalkotó technikákkal történő megközelítés állt.**

Célunk volt megvizsgálni, hogy

- **a különböző termesztőközegek hogyan befolyásolják juvenilis állapotban a tápanyaghiány indukálta stresszválaszokat kukoricában?**
- **az indukált hőstressz és a tápanyaghiány milyen hatást gyakorol juvenilis állapotban a homok termesztő közegben nevelt kukoricanövényekre?**

Célunk volt továbbá, hogy

- **újszerű megközelítésben a késleltetett fluorszcencia első szakaszának kibontásával, minél részletesebb információkat kapjunk a növények állapotáról és a késleltetett fluoreszcencia lecsengéséről, amire korábban még nem volt példa.**

3. Szakirodalmi áttekintés

3.1. Kukorica eredete, származása

A kukorica a pázsitfűfélék családjába tartozik (Bocz, 1996). Egyéves, egyszikű, váltivarú és egylaki növény, amely bojtos mellékgyökérzettel rendelkezik (László et al., 1994). A *Zea* nemzetségen belül egyetlen fajként a *Zea mays* L. van jelen, vad alakja nem ismert. A kutatók többsége úgy véli, hogy a kukorica ősei közé tartozhat a gammafű (*Tripsacum dactyloides* L.) és a teosinte (*Euchlaena mexicana* Schrad). Feltételezések szerint a fejlődés korai szakaszában nem volt elkülönülő nemű, és virágzata hasonlított a kalászos gabonákéhoz. Abiotikus stressz hatására kukoricánál gyakran megfigyelhetők olyan egyedek, ahol a címer virágzata és termése hasonlít a búzáéhoz, a címerben szemtermést hoz. A fejlődés későbbi szakaszában a kukorica egyik átmeneti formája a pelyvás kukorica (*Zea mays* v. *tunicata*) lehetett, melynél a csövön minden szemet pelyva fed (Bocz, 1996). A kukorica kizárólag termesztett formában ismert, és rendkívül sokoldalúan hasznosítható. A régészeti leletek alapján a kutatók

egyetértene abban, hogy a kukorica Amerikából származik, de a géncentrum pontos helyéről eltérnek a vélemények (Győrffy, 1965). Egy mikroszatellit-alapú tanulmány azt mutatja, hogy az összes létező Kolumbusz előtti kukorica változat a *Z. mays ssp. parviglumis*-ből származik, a hozzávetőlegesen 9000 évvel ezelőtti, egyetlen háziasítási esemény révén, a dél-mexikói Balsas folyó középső vízgyűjtő területéről (Matsuoka, 2005).

3.2. A kukorica jelentősége a világban és Hazánkban

A kukorica jelentőségét és sokoldalú felhasználhatóságát jól mutatja, hogy globálisan az egyik legnagyobb termesztési területtel (kb. 201,53 millió hektár) és jó termésátlaggal (kb. 6,04 t/ha) rendelkező növény. A termelés tekintetében a vezető országok az Egyesült Államok, Kína és Brazília, amelyek együtt a világ kukoricatermésének több mint 50%-át adják, jelentősen hozzájárulva a világ takarmány- és az élelmiszerellátáshoz (USDA, 2024). A nagy volumenű termelismennyiség elérését az éghajlat, a megfelelő talajszerkezet és az alkalmazott agrotechnika is segíti (Ács, 2005).

A kukorica hazánkban évtizedek óta a kalászos gabonák mellett a legnagyobb területen termesztett növény; vetésterülete korábban stabilan 1,1-1,2 millió hektár környékén alakult, azonban a 2021-es évektől folyamatos csökkenést mutat. A kukorica vetésterülete 2023-ban 771 ezer hektárra esett vissza, ami negatív rekordnak számít az elmúlt évtizedekhez képest. A 2021-ben rögzített 1.055.000 hektár vetésterület a szántó művelési ág közel 25%-át tette ki, míg 2023-ban ez az érték csupán 18,5% volt. Bár a kukorica vetésterülete évről évre ingadozik, ilyen mértékű csökkenés rég nem volt látható Magyarországon (KSH, 2024). A vetésterület csökkenéséhez hozzájárult a műtrágyaárak hektikus mozgása is, különös tekintettel a termésmennyiség szempontjából leginkább meghatározó tápelemet a nitrogént tartalmazó műtrágyákra (MAS, UAN, Karbamid) (KSH, 2023).

Korábban a vetésforgó és az időjárási viszonyok okozták a termőterület kisebb-nagyobb ingadozásait, azonban napjainkban a csökkenés elsősorban a trendszerűen jelentkező, negatív klimatikus tényezőknek tulajdonítható. Ezek az időjárási anomáliák egyre nagyobb hatással vannak a mezőgazdaságra, hozzájárultak a vetésterület visszaeséséhez (Kovács, 2021).

3.3. Kukorica legfontosabb „stresszorai”

A víz és a nitrogén (N) fontos erőforrások, amelyek korlátozzák a kukorica növekedését és fejlődését és végső soron befolyásolják a termés hozamot. A nitrogén vagy más tápelemek felvehetősége korlátozottá válik, különösen akkor, amikor a növény intenzív növekedésben van, gyakran hozamcsökkenés lehet az eredménye már juvenilis 4-6 leveles állapotban is. Más tényezők is stresszt okozhatnak a kukoricánövényeknek, ami szintén korlátozza a növekedést

és csökkenti a terméshozamot. A hőmérséklet- és vízhiány okozta stressz befolyásolja a tápanyagok elérhetőségét és növelik a kártevőkkel szembeni fogékonyságot is (Nleya, 2016).

3.3.1. A nitrogénhiány hatása a kukorica korai fejlődésére

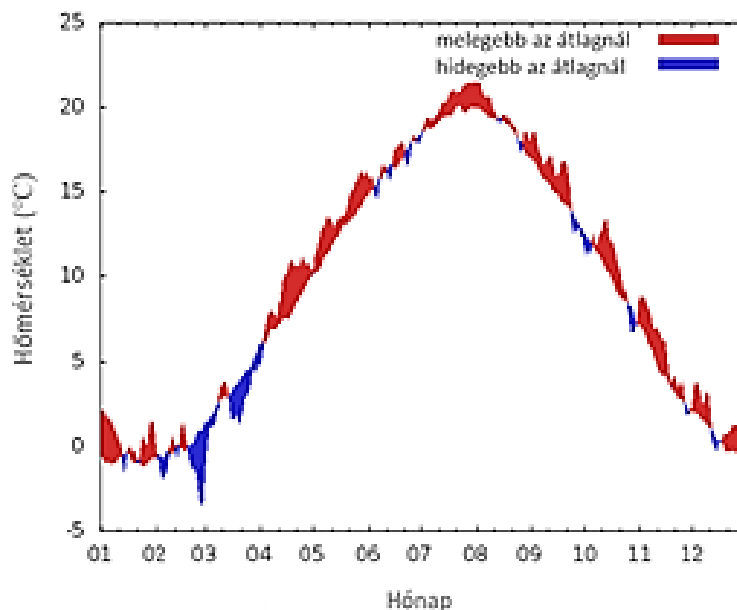
A nitrogén alapvető fontosságú makroelem, ezért hiánya már a kukorica a korai fejlődési szakaszában negatív következménnyel járhat, mivel ezen elem kulcsfontosságú a fehérjék, aminosavak és nukleinsavak szintéziséhez (Leghari és mtsai. 2016). A nitrogénhiány jelentősen csökkenti a sejtosztódás és a sejtnövekedés ütemét, ami lelassítja mind a gyökér-, mind a hajtásnövekedést. Ennek eredményeként a fiatal kukoricanövények lényegesen kisebbek lesznek, és nem képesek megfelelően kifejlődni, ami hátrányosan befolyásolja a későbbi növekedési szakaszokat is (Urban és mtsai., 2021). A nitrogénhiány korai jelei közé tartozik a levelek sárgulása, a klorózis, ami a csökkent mértékű fehérjeszintézis jele és következménye különös tekintettel a korai fejlődésre, az intenzív vegetatív növekedési időszakában. Ekkor a növény klorofill szintje csökken, ami először az idősebb leveleken jelenik meg, mivel a nitrogén mobilizálható, azaz a reutilizálható elem. (Gastal és Lemaire, 2002). Nitrogénhiány esetén a gyökerek növekedése jelentősen lelassul, ami csökkenti a növény tápanyagfelvevő képességét, különösen a nitrogén a foszfor és a kálium esetében (Marschner, 2012). A gyökérrendszer fejlődésének szempontjából a nitrogénhiány elsőként az oldalgyökerek növekedését veti vissza (Wang és mtsai, 2022), ami hosszú távon rontja a kukoricanövény stressztűrő képességét és csökkenti terméshozamát, mivel a sekélyebb és gyengébb gyökérzet nem képes megfelelően ellátni a növényt vízzel és tápanyagokkal. A nitrogénhiány által okozott lassabb növekedés - melynek gyakori kísérőtünete a levélklorózis - a kukorica fejlődési szakaszainak késleltetését is eredményezi. (Leghari et al., 2016). A késleltetett virágzás és termésérés csökkenti a termés mennyiségét és minőségét, ami különösen fontos a termelés szempontjából.

Mivel a fehérjeszintézishez és a fotoszintézishez szükséges vegyületek előállítása nitrogént igényel, a nitrogén közvetlen hatással van a kukoricanövények biomassza- termelésére. Növeli a növényállomány magasságát, az asszimilációs felületet, valamint elősegíti a sugárzási energia hatékonyabb felhasználását a nagyobb levélfelületnek köszönhetően. A nitrogén növeli a fotoszintézis sebességét és hatékonyságát. A növelt nitrogénellátással megváltoznak a transzspirációs folyamatok, ami végső soron a magasabb terméshozamban realizálható (Anda, 1987). Ez a kedvező hatás még akkor is megfigyelhető, ha a talaj jó nitrogén szolgáltató képességű, mint például csernozjom, vagy a réti talajok. Azonban a nitrogén érvényesülését a növényfaj mellett, a fajta/hibrid sajátosságai továbbá a talaj tulajdonságain kívül a klimatikus tényezők is nagymértékben befolyásolják (Bocz, 1974). A nitrogénellátás elhagyása vagy a nem

megfelelő mennyiség alkalmazása sokkal nagyobb termésvesztést eredményez, mint más tápelemek ellátottságának hiánya, például a foszforé (P) (Harmati, 1995).

3.3.2. A hőstressz negatív hatása a kukoricára

A kukorica egyik leglényegesebb abiotikus stresszora a hőstressz, ami ugyan elsősorban a nyári időszakban jelentkezik, azonban a szélsőségesen magas hőmérsékletű napok száma szinte minden évszakban egyre növekszik (1. ábra).



1. ábra

Az európai felszíni középhőmérséklet napi anomáliái 2018-ban, az 1981-2010-es időszakhoz viszonyítva.

Adatok forrása: Copernicus Éghajlatváltozási Szolgálat (C3S)/KNMI.

<https://climate.copernicus.eu/dry-and-warm-spring-and-summer> Letöltve: 2024.10.13.

A kukorica optimális hőmérsékleti tartománya 25-30 °C között van, és a 35 °C feletti hőmérséklet már jelentős hőstresszt jelent a növény számára, tehát egy szűk hőmérsékleti ablak választja el a növekedést a hőstressztől, és az optimális növekedést biztosító hőmérsékleti tartomány gyakran átfedésben van a hőstresszt okozó hőmérsékleti tartományokkal (Li és Howell, 2021). A korai növekedési szakaszban, mint a levélképződés a 41,3 °C feletti hőmérséklet a hajtásnövekedésben, a 40,1 °C pedig a gyökernövekedésben már súlyos, akár visszafordíthatatlan károsodást okozhat (Sánchez és mtsai., 2014). A hőstressz által indukált változások összetettségét támasztották alá azon génexpressziós vizsgálatok, amelyek során hőtűrő és hőérzékeny beltenyésztett kukorica vonalakon végzett transzkriptóma analízis

eredmények alapján 607 hőre reagáló gént azonosítottak, amelyek közül 39 esetben azonosítottak a hőtürésben szerepet játszó géneket (Frey és mtsai., 2015).

A hőstressz citoplazmatikus hőstresszválaszt indukál, amelyben a hősokk transzkripciós faktorok a hősokkfehérjéket (HSP) kódoló gének egy csoportját aktiválják. Ezek a fehérjék megvédik a növényt a sejtszintű károsodásoktól, és segítenek megőrizni a sejtek stabilitását a hőstressz idején. Az antioxidáns rendszerek szintén aktiválódnak, hogy megvédjék a növényt az oxidatív stressztől. Ezek a mechanizmusok azonban energiaigényesek, ami tovább csökkenti a növekedési potenciált, mivel a növény jelentős energiaforrásait a stresszkezelésre fordítja a növekedés és fejlődés helyett (Bita & Gerats, 2013).

A magas hőmérséklet fokozza a transzspirációt, ami gyors vízvesztést eredményez, különösen akkor, ha a vízellátás nem megfelelő. A túl magas hőmérséklet gyorsan növekedési visszaesést okozhat a kukoricánál a vegetatív szakaszban. A fotoszintézis a magas hőmérséklet egyik legérzékenyebb célpontja. A kukorica C4-es fotoszintézis típussal rendelkező növényként általában ellenállóbb a magas hőmérséklet okozta stresszel szemben, mivel speciális szöveti szerkezetének köszönhetően a CO₂ beépítése, a Calvin ciklusban oxigén hiányában megy végbe, ami azt eredményezi, hogy a fotoszintézis kulcsenzime a ribulóz-1,5-biszfoszfát karboxiláz/oxigenáz (RUBISCO) enzim oxigénmentes környezetben tud működni, ezért a C4-es növényekben a fotorespiráció jelensége nem okoz csökkenést a szervesanyag beépítésben magas hőmérséklet esetén sem. Azonban 35 °C felett már gátolttá válik a RUBISCO enzim működése, ami következményeként a fotoszintézis hatékonysága csökken, ami közvetlenül befolyásolja a növény növekedési potenciálját és a biomassza-felhalmozást (Boyer, 1982).

A túl magas hőmérséklet emellett fokozza a transzspiráció sebességét, amely a növény vízvesztését eredményezi. Ha a víz utánpótlása nem megfelelő, vízstressz alakul ki, amely a sejtnövekedést és a tápanyagfelvételt is akadályozza. A transzspiráció növekedése a magas hőmérséklet mellett kimerítheti a növény vízkészleteit, így csökkentve a turgornyomást, ami korlátozza a sejtek növekedését és rontja a növény anyagcseréjét (Hatfield & Prueger, 2015).

A hőstressz megzavarja a növényi hormonok, például az auxinok és gibberellinek szintézisét, amelyek alapvető szerepet játszanak a növény növekedési folyamatainak szabályozásában. Ez késleltetheti a levél- és szárfejlődést, ami késlelteti a virágzás kezdetét is. A fejlődés késleltetése közvetlenül befolyásolja a termékenyülés időzítését és végül a termés hozam csökkenéséhez vezethet (Leghari et al., 2016).

3.4. Növényi stressz detektálása in- vivo, nem-invazív rendszerekkel

A növényi stresszfolyamatok roncsolásmentes nyomonkövetése az elmúlt évtizedekben jelentős technológiai fejlődésen ment keresztül, amelyek közül a biofoton emisszió mérése egy korszerű, innovatív és nem-invazív képalkotó eljárás, amellyel vizualizálható és jellemezhető a növények stresszállapota. Minden élő szervezet spontán, alacsony szintű biolumineszcenciát bocsát ki, amely stressz hatására fokozódhat (Flor-Henry, 2004). A növényi sejtekben zajló fotoszintetikus és oxidatív biokémiai folyamatok során ultragyenge fotonkibocsátás figyelhető meg, amelyet összefoglalóan biofoton emisszióknak nevezünk (Yan, 2005). Ez a kibocsátás azért tekinthető "ultragyengének", mert a mögöttes folyamatok—mint például a fotoszintetikus rendszerben tapasztalható késleltetett fluoreszcencia vagy az oxidatív folyamatokhoz kapcsolódó ultragyenge lumineszcencia—során olyan alacsony intenzitású a fotonkibocsátás, hogy ennek kimutatásához nagyon érzékeny eszközökre, például alacsony hőmérsékleten működő CCD (charge-coupled device) kamerákra van szükség. A jelenleg elérhető nagy érzékenységű képfeldolgozó technológiáknak köszönhetően megbízhatóbb és részletesebb, valós idejű információkat szerezhetünk a vizsgált növényi részek metabolikus aktivitásáról és oxidatív állapotáról (Jócsák és mtsai., 2024).

3.4.1. Késleltetett fluoreszcencia

Amikor növények fotoszintéziséhez szükséges fényforrás megszűnik, a fotoszintetikus elektrontranszport láncban felhalmozódott, fel nem használt energia felszabadul. Ezt a jelenséget késleltetett fluoreszcenciának (delayed fluorescence, DF) nevezzük, amely a fotoszintetikus apparátus állapotát tükrözi. Ez a folyamat akkor is megfigyelhető, amikor a vizsgálni kívánt növényt sötét kamrába helyezzük. Ilyenkor az elektronok egy része visszatér a reakcióközpontba, ahol a klorofill molekulák gerjesztett állapotba kerülnek és fotonokat—például vörös lumineszcenciát—bocsátanak ki. Számos kutatás kimutatta, hogy a késleltetett fluoreszcencia segítségével in vivo módszerekkel meghatározható a növények állapota és a stressz detektálása. Ez különösen fontos a növényi stresszreakciók korai felismerésében és monitorozásában.

Vizsgálatok kimutatták, hogy a DF kezdeti értékei és csökkenési kinetikája felhasználható a növények in vivo homeosztatikus állapotának meghatározására és a stresszszintek becslésére is (Bodmer, és Gerhardt, 2000; Lukács és mtsai, 2022). Bodmer és Gerhardt (2000) munkájában a DF lecsengési kinetikája egy stressznek kitett *Chlorella spp.* esetében volt jellegzetesen eltérő a stresszmentes kultúrához képest. Nemcsak a DF gyorsabb lecsengési dinamikája, hanem kezdeti értékének nagysága is különbözik a stresszmentes és a

stresszállapotban lévő növények esetében: a stresszállapotú növények alacsonyabb kiindulási DF értékeket mutattak vetésfehérítő (*Oulema melanopus* L.) által károsított búzanövényeken (Lukács és mtsai. 2022), de különböző cink ellátottságú kukoricanövényeken is kimutatható volt a kezdeti DF csökkenése akkor, amikor az alkalmazott cink koncentráció (2000 μM) által kiváltott oxidatív folyamatok már, az esszenciális tartományt meghaladva, toxicitásra utaltak (Jócsák és mtsai., 2024).

3.5. A homok és a kőzetgyapot, mint termesztőközegek a kísérletes növénynevelésben

A termesztőközeg feladata, hogy segítségével biztosítani lehessen a növények számára a tápanyagokat, vizet, oxigént, elegendő teret a fejlődéshez minimálisra csökkentve a betegségek kockázatát. Néha a termesztőközeg úgy tűnik, hogy elegendő vizet biztosít a párologtatáshoz, mégis a növények hervadnak. Ennek az ellentmondásnak az egyik oka, hogy a közeg teljesen telített vízzel. Ez a víz csökkenti az oxigénellátást a növények gyökerei számára, így azok kevésbé képesek felvenni a vizet és a tápanyagokat. A növényi gyökereknek mind vízre, mind oxigénre szükségük van a fejlődéshez (Olle, 2012). Egy másik fontos tényező, amely befolyásolja a növényeket, a hőmérséklet. Ugyanis a különböző területekről származó növények gyökerei különböző optimális hőmérsékleti tartományokhoz alkalmazkodtak (Landis, 1990).

3.5.1. Sárga homok termőközeg jellemzői

A homok az egyik legkönnyebben hozzáférhető anyag, és viszonylag olcsó is. A homok összetétele széles skálán változik. Amikor azt mérlegeljük, hogy egy adott homok közeg alkalmas lehet-e, figyelembe kell venni a homok származási helyét és a homokszemcsék méretét. Például egyes folyami homokok apró szemcseméretükkel komoly negatív hatást gyakorolhatnak azáltal, hogy túlzottan nehezítik őket, és nem javítják a szellőzést vagy vízelvezetést. Azok az ültetvények, amelyek szilikátos (gránitból vagy palaeredetű) homokhoz jutnak hozzá, képesek lehetnek a helyi homokot szervesetlen összetevőként felhasználni. A mészkőből (például korallból vagy mészkőből) származó homokok magas kalcium-karbonát (CaCO_3) tartalmúak lehetnek és veszélyesen magas pH-értéket mutathatnak. A termesztők megvizsgálhatják a homokot, ha egy csepp hígított savat vagy akár erős ecetet adnak hozzá—ha pezsgő reakció következik be, az a CaCO_3 jelenlétére utal. Ha lehet, jobb elkerülni a korallalapú talajok vagy homokok használatát, de ha mégis szükséges, nagy mennyiségű szerves anyagot kell hozzáadni, hogy tompítsuk a hatásait. Előfordulhat, hogy egyes növények, amelyek a helyi mészkő talajhoz alkalmazkodtak, nem szenvednek a magasabb pH-tól, ha a homokot mértékkel használják (Landis, 1990).

A homokot a porozitás növelésére használják, de a kis homokszemcsék beékelődhetnek a meglévő pórusokba, és csökkenthetik a szellőzést és vízelvezetést. Általában a 0,002 és 0,010 hüvelyk (0,05–0,25 mm) közötti méretek túl kicsik, és eltömíthetik a vízelvezető porusokat, valamint csökkenthetik a szellőzést (Wilkerson, 2011). A nagyobb (közepes vagy durva) szemcsék inkább alkalmasak a porozitás növelésére. Az általános ajánlás az, hogy a homokot mossuk át (hogy eltávolítsuk a sótartalmat, ha van) és sterilizáljuk vagy pasztörizáljuk, mielőtt a termesztőközegbe kevernénk (Miller és Jones, 1995). A legkomolyabb hátránya a homok termesztőközegben való használatának az a súlya, amely kezelési problémákat okoz, és növeli a szállítási költségeket (Gordon, 2004).

3.5.2. Kőzetgyapot termesztőközeg jellemzői

A kőzetgyapot az egyik legkedveltebb termesztőközeg különösen zöldségtermesztésben, mert alapvetően kémiai és biológiai szinten semleges, így mentes minden potenciális kártevőtől, kórokozótól és gyomnövénytől. Továbbá a kőzetgyapot gyakran öntözhető, mivel szabadon lefolyik belőle a víz, így biztosítható a levegő és a víz optimális aránya az egész tenyészidőszakban (Bussell és McKennie, 2004). Alkalmazásuk hátránya lehet, hogy szervesetlen anyagként, biológiailag nem lebomló, ami környezeti aggodalomra ad okot (Olle, 2012).

4. Anyag és módszer

Kísérleteink során egyrészt a homok és kőzetgyapot termőközegek tápanyagszolgáltató képességének összehasonlítását, másrészt a hőstressz hatását vizsgáltuk kukoricanövényeken. A kísérletre 2024. június 5.-e és július 18.-a között került sor. A kőzetgyapot és homok termesztőközegben a tápanyaghiány hatását vizsgáltuk. Megfigyeltük a homokhoz képest a kőzetgyapotban jelentkező markánsabb tápanyaghiány jelentette stresszhatásokat. Ezzel párhuzamosan homokban nevelt kukoricanövényeket tettünk ki nem csak a tápanyaghiány, hanem a magas hőmérséklet okozta stresszhatásoknak is.

4.1. A kísérletben felhasznált anyagok, növénynevelés módszere

A kísérlet beállítása a homok és kőzetgyapot termesztőközeg beszerzésével kezdődött. Homok esetében eredetéből adódóan a lehető legalacsonyabb tápanyagtartalomra törekedtünk, így az építkezés során használatos sárga bányahomokra esett a választás. Ezt a helyszínhez közeli építőanyag kereskedésben vásároltuk. A homokot átmostuk, szikkasztottuk, majd 120 mm átmérőjű 100 mm méretű műanyag cserepekbe töltöttük, amit később a vetés követett. A kőzetgyapot kockákat (Gordan Delta gyártmányú) egy kertészeti árukat forgalmazó kereskedésben vásároltuk. Méretük 75x75x65mm volt. A kőzetgyapot tápkockák közepében a

szükségesnél sokkal nagyobb mélyedés volt, ezért a tápkocka alsó talp részéből vágunk le egy darabot, majd raktuk bele a nyílásba, így csökkentve a „vetésmélységet” a homokkal megegyező 1-2 cm-es mélységre. A szemek szabadon, takarás nélkül kerültek be a tápkockába.

A kísérletbeállítás második lépése a hibridvetőmag beszerzése volt. A vetőmagot saját részről, családi gazdaságunkból biztosítottam. Kísérletünkben RAGT Mexini névre keresztelt hibridkukorica vetőmagot használtunk. Tenyésztőjét tekintve egy közép-kései érésű hibrid, 480-490-es FAO számmal. Nagy kezdeti fejlődési erély jellemzi, továbbá a nemesítési munka eredménye a jó stressztűrőképessége és a relatív alacsony termőhelyigény (jobb sűrítettség), mely tényezők kiemelkedő fontosságúak. A vetőmag felületét Redigo M, Fortify és Korit 420 FS csávázószerekkel kezelték még a fémzárolást megelőzően. A vetőmag jó csíráképségét alapul véve kizárólag a szükséges 30 cserépbe, illetve 15 tápkockába vetettünk, oda is egy-egy szemet 1-2 cm mélységbe.

A cserepeket és közetgyapot kockákat a kísérlet teljes időtartamán keresztül, kétnaponta öntöztük.

A kísérlet beállítására a MATE Kaposvári Campusán található klímakamrában került sor. A klímakamra egy Aquaterra Kft. (8200 Veszprém, Wartha Vince street 1/2.) által forgalmazott „POL-EKO K 1200 Top Plus” típusú eszköz volt. A klímakamra használatával ismételtetővé tehattük a kísérletet és kiküszöbölhettük a kísérlet szempontjából hátrányos tényezőket, mint az ingadozó hőmérséklet és páratartalom.

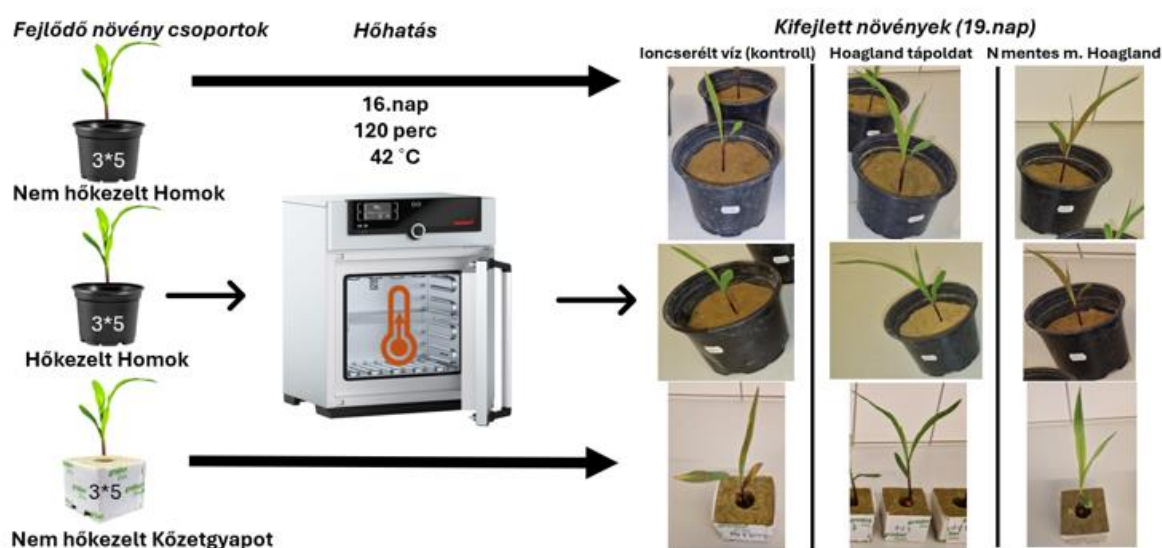
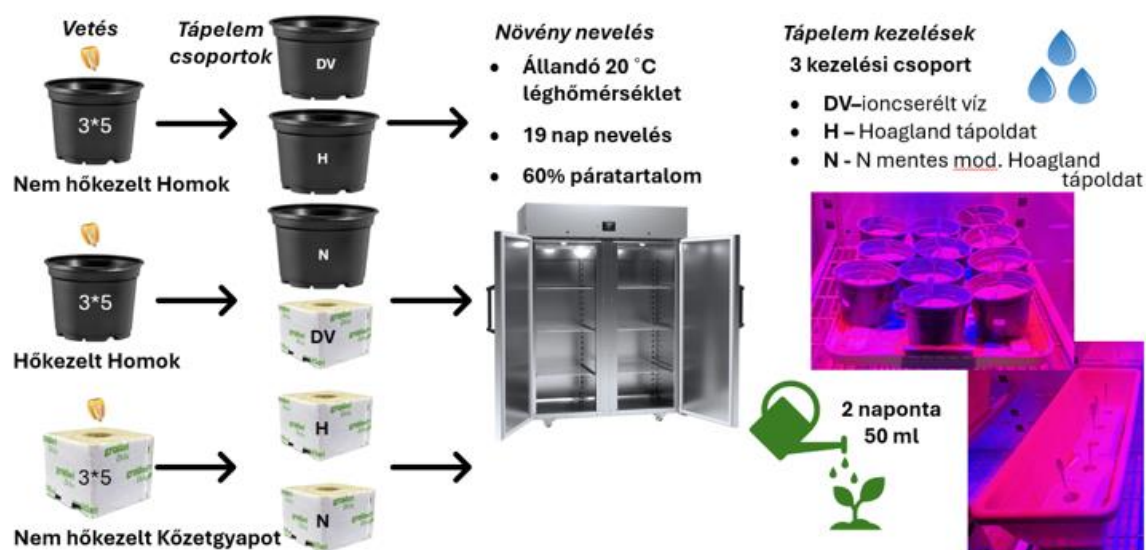
4.2. Kezelések

A homokban nevelt növényeket három különböző tápanyagellátottsági csoportra különítettük el, mindegyik csoportba 10 növény tartozott. A közetgyapotban nevelt növényeket szintén három különböző tápanyagellátottsági csoportra különítettük el, mindegyik csoportba 5 növény tartozott. A három-három külön csoportot különböző tápoldattal öntöztük. Létrehoztunk egy tápanyaggal teljes mértékben ellátott csoportot, egy nitrogénhiányos csoportot és egy kontroll, ioncserélt vízzel öntözött csoportot.

A kezelési csoportokat az alábbi táblázatban (1.táblázat) szemléltettem a könnyebb átláthatóság és érthetőség kedvéért.

Alapkísérlet		Tápanyagellátottsági kísérlet					
Jelölés		DV		H		N	
Stresszhatás		teljes tápanyaghiány		Kontroll		N tápanyaghiány	
Kezelés		10db H* +5db K*		10db H + 5db K		10db H + 5db K	
Kísérlet 1		Termőközeg kísérlet					
		10	5db	10	5db	10	5db
Termőközeg		cserép	kőzetgyapot	cserép	kőzetgyapot	cserép	kőzetgyapot
		homok*	tápkocka*	homok	tápkocka	homok	tápkocka
Kísérlet 2		Hőkezelés kísérlet					
Indukált		5db		5db		5db	
hőstresszhatás		hőkezelt	-	hőkezelt	-	hőkezelt	-

1.táblázat: kezelési csoportok



2.ábra: a kísérlet beállításának menete, kezelések

A tápanyag terén teljes mértékben ellátott csoportot a korábban paradicsom zöldségnövény (*Solanum lycopersicum*) hajtátott termesztésére kifejlesztett Hoagland oldattal öntöztük.

Hoagland tápoldat összetétele			N-mentes tápoldat összetétele		
Tápsó	Moláris koncentráció	Koncentráció (mg/l)	Tápsó	Moláris koncentráció	Koncentráció (mg/l)
N (NO₃)	14 mM	196,1	N (NO₃)	-	-
N (NH₄)	1 mM	14	N (NH₄)	2 µM	0,03
P	1 mM	31	P	1 mM	31
K	6 mM	234,6	K	6 mM	234,6
Ca	4 mM	160,3	Ca	4 mM	160,3
Mg	2 mM	48,6	Mg	2 mM	48,6
Na	-	-	Na	-	-
S(SO₄)	2,05 mM	65,6	S(SO₄)	4,56 mM	146
Cl	-	-	Cl	-	-
Fe	45 µM	2,51	Fe	45 µM	2,51
B	45 µM	0,49	B	45 µM	0,49
Cu	1 µM	0,06	Cu	1 µM	0,06
Zn	1 µM	0,07	Zn	1 µM	0,07
Mn	10 µM	0,55	Mn	10 µM	0,55
Mo	1 µM	0,1	Mo	1 µM	0,1

2.táblázat: A Hoagland tápoldat és a módosított nitrogénmentes Hoagland tápoldat összetétele

A nitrogénhiányos csoportnál használt oldathoz szintén a Hoagland oldat összetételéből indultunk ki, azonban a nitrogéntartalmú vegyületket (CaNO₃ és KNO₃) módosítottuk két olyan vegyületre, aminek nincs nitrogéntartalma (K₂SO₄ és Ca-acetát). A tápoldatok pontos összetételét a 2.táblázatban ismertettem részletesebben. A harmadik tápanyagcsoporttól minden hozzáadott tápanyagot megvontunk, ioncserélt vízzel öntöztük. A három csoportot a tápoldat rövidített nevével és egy „0” számmal, mint nem hőkezelt csoport neveztük el. Ez alapján a későbbiekben H0 (Hoagland homok tápközeg), N0 (nitrogénmentes módosított Hoagland homok tápközeg) és DV0 (ioncserélt víz, homok tápközeg), jelölésű növények tartoznak majd ebbe a csoportba. A homokhoz hasonlóan, a kőzetgyapoton nevelt csoportokat szintén a három tápoldat típusa alapján neveztük el. Itt viszont a csoportmegnevezéseket követően egy „K” jelölést tettünk, utalva a kőzetgyapot termőközegre. A három csoport H0K

(Hoagland kőzetgyapot tápközeg), N0K (nitrogénmentes módosított Hoagland kőzetgyapot tápközeg) és DV0K (ioncserélt víz, kőzetgyapot tápközeg) jelöléssel szerepel a későbbiekben.

A cserepek a vetést követően két naponta 50 ml tápoldattal vagy ioncserélt vízzel voltak öntözve. A klímakamra hőmérséklete továbbra is 20 °C-on állt. Majd 3-4 leveles fenológiai fázisban végeztük el a hőkezelést. A hőstresszt egy Mammert UN30 (Mammert GmbH + Co. KG, Aeussere Rittersbacher Strasse 38 D-91126 Schwabach) típusú szárítókamrában (3.ábra) 120 perc időtartamban, 42 °C hőmérséklet jelentette.



3.ábra: Mammert UN30 szárítókamra

A három homokban nevelt csoport növényeinek felét, tettük ki hőstressznek, azaz öt növényt csoportonként, így összesen 15 növényt ért hőstressz. A hőkezelt csoport növényeit szintén a tápoldat rövidített nevével neveztük el, viszont a korábban írt „0” helyett „H” betűvel jelöltük. A három hőkezelt csoport a HH (Hoagland homok tápközeg, hőkezelt), NH (nitrogénmentes módosított Hoagland homok tápközeg, hőkezelt), és DVH (ioncserélt víz, homok tápközeg, hőkezelt) jelöléssel lesz említve a későbbiekben. A két közegen nevelt, mindhárom növénycsoport növényein a vetéstől számított 19. napon laboratóriumi vizsgálatokat végeztünk el. Az összes mért adat, mint kísérletünk alapját adó késletetett fluoreszcencia mérés is ezen a napon történt. A kísérlet beállításának minden részletét a 2. ábrán szemléltettem.

4.3. Adatgyűjtés és feldolgozásának módszertana

Növénymagasság mérés: a homoktalaj és a kőzetgyapot termőközeg összehasonlítását a biofoton-emisszió mérésén túl a 19. napon mért növénymagassággal is alátámasztottuk. A növénymagasságot a leghosszabb levél végén kifeszített állapotban mértük meg.

Biofoton emisszió mérés: a biofoton emisszió méréséhez a Berthold Technologies GmbH & Co.KG, 75323 Bad Wildbad, Germany által forgalmazott NightShade® LB 985 in vivo Plant Imaging System elnevezésű készüléket alkalmaztuk (4.ábra). A műszer alapja a fényt tökéletesen kizáró váz, melyben egy termoelektronikusan hűtött, lassú letapogatású NightOwlcam típusú CCD kamera szolgáltatja az információt (5.ábra). Mivel a kültéri világítás zavaró hatása nincs jelen, ezért az érzékeny kamera képes felvenni a növényi szövetek által sötét közegben hasznosítatlanul visszasugárzott fény mennyiségét, így az utolsó fénybehatástól eltelt idő alapján lumineszcencia és fluoreszcencia monitorozását is lehetővé teszi a műszer. A berendezés vezérlését az IndiGo® 2.0.5.0 szoftver segítségével végeztük.



4. ábra: Berthold NightShade® LB 985 képalkotó rendszer



5.ábra: NightShade rendszer által használt CCD kamera rendszer

A mérések során törekedtünk a növények egyenkénti mérésére, ezért a növények teljes felületét 15+1 percen keresztül mértük, minden egyes perc végén nyertük ki az adatokat. Egy növény mérése minden esetben 10 másodperc megvilágítással kezdődött. Majd a második perctől a tizennegyedik percig a képkészítést követően már nem volt beállított megvilágítás, így az összes kép sötétben készült a fotoszintetikus apparátus gerjesztése nélkül. A tizenötödik

percben készült el az utolsó felvétel, azaz percenként mértük a kisugárzott fotonok relatív mennyiségét.

A mért értékeket területegységre normalizáltuk és cps/mm² (count per second/mm²) -ban kerületek kifejezésre. A mért adatokon az első percekben még exponenciális csökkenés figyelhető meg, majd ezt követően jelenik meg a késleltetett biolumineszcencia. A kezdeti biofoton-kibocsátás intenzitásából következtethetünk arra, hogy milyen mértékben hatott a stressz a növényekre. A magasabb kezdeti intenzitásból lehet arra következtetni, hogy a növényeket ért negatív stresszhatás kevésbé befolyásolta a vizsgált növényeket. Ez a kezdeti szakasz tehát a növény egészségi állapotáról ad információt.

Elemtartalom vizsgálata: a nem-invazív mérés végeztével a homok közegben nevelt csoportot felszámoltuk, majd gyökérzetével együtt továbbítottuk a MATE Egyetemi Laborközpont Agrártudományi Szakterület Kaposvári Campus akkreditált laboratóriumába, ahol teljes növényanalízist kértünk.

A kísérletekről összegyűjtött adatokat Microsoft Excel 16.0 szoftver segítségével táblázatban rendszereztem, majd segítségével ábrákat készítettem.

Az eredmények minden esetben statisztikai elemzésen estek át, beleértve a többtényezős ANOVA-t, és a Duncan-tesztet. A statisztikailag igazolható különbségeket betűkkel jelöljük: ha szignifikáns eltérések mutatkoznak, különböző betűjelek szerepelnek, míg azonos betűjellel ellátott értékek nem tekinthetők különbözőnek..

Az összes gyűjtött adat kiértékelt eredményeit részletesebben az Eredmények és értékelésük fejezetben tárgyalom.

5. Eredmények és értékelésük

5.1.A két vizsgált termesztőközeg összehasonlítása

5.1.1. Különböző tápoldatokkal kezelt növénycsoportok magasságváltozásának elemzése

Dolgozatom ezen részében a kőzetgyapot termőközegen nevelt és a homok termőközegen nevelt növények átlagmagasságának értékeit fogom elemezni. Három- három különböző tápanyagellátottságú csoportot vizsgáltunk, kettő termőközegen. A kísérlet ezen részén kizárólag a homok tápközegen és a kőzetgyapot termesztőközegen nevelt növényeket vizsgáltuk.

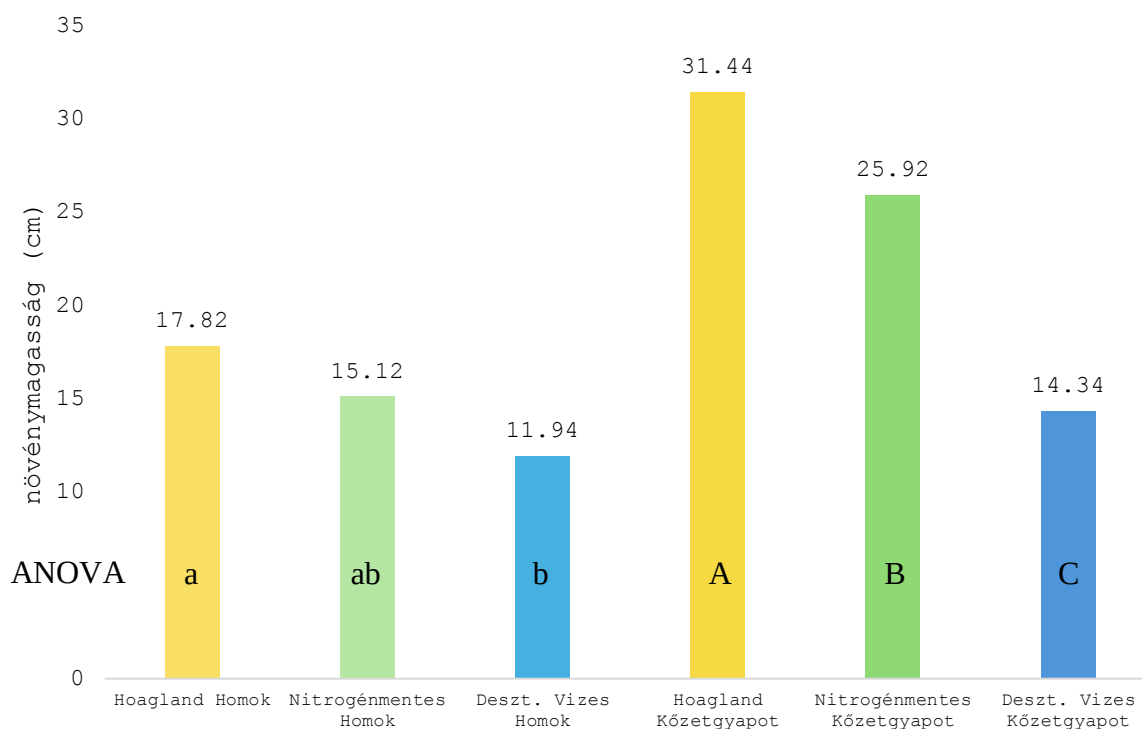
Közeghatás vizsgálata különböző tápoldattal kezelt növénycsoportok között

Sig. (2-tailed)	F	t
Hoagland Homok - Hoagland Kőzetgyapot		
0,000	0,148	-5,920
Nitrogénmentes Homok – Nitrogénmentes Kőzetgyapot		
0,002	2,470	-4,417
Deszt. vizes Homok – Deszt. vizes Kőzetgyapot		
0,287	0,294	-1,141

3.táblázat: A három tápoldattal kezelt növénycsoport magasságának statisztikai elemzése.

A fejezet első részében a közeghatást vizsgálom, mely a közegek közötti növénymagasság eltérését tárgyalja. A 3.táblázaton látható, hogy az a két tápközeg esetében jelentős növénymagasság különbség tapasztalható. A kőzetgyapoton nevelt növények magassága a Hoaglandos kezelések esetében közel duplája, míg a nitrogénmentes tápoldaton nevelteknél másfélszerese volt a homokon neveltekéhez képest, mely eltérések statisztikailag is igazolhatónak bizonyultak. Az Ioncserélt vízzel kezelt közegcsoportok között viszont már nem jelentkezik jelentős különbség. A két közegcsoport magassága között csupán 1,14 cm különbség van. Statisztikailag ezen csoport adatainak átlagolt 0,287-as T-próba értéke megegyezőnek tekinthető. Látható, hogy nem mindegy mely tápközeget válasszuk a növénynevelés során. A homokban a növények vontatottabban fejlődnek, aminek oka nagy valószínűség szerint a tömör, levegőtlen „talajállapot”.

Tápanyaghatás vizsgálata különböző közegekben



6.ábra: Növénymagasság kimutatása a különböző tápközegű csoportoknál

A 6. ábra oszlopdiagrammján látható eredményeket ANOVA teszttel értékeltük, külön a homok termőközegre és a kőzetgyapot termőközegre. Azonos tápközegben a tápanyaghatást vizsgálva megállapítható, hogy a tápanyagellátottság a növénymagasságra jelentős hatást gyakorolt.

A homok termőközeg magasságértékein látható, hogy a Hoagland tápoldattal és a N-mentes tápoldattal kezelt növénycsoportok átlagmagassága egymással statisztikailag megegyezőnek tekinthetők, míg az Ioncserélt vízzel kezelt növénycsoport értékei különböznek mind a Hoagland csoport, mind a Nitrogénmentes csoport növényeinek átlagmagasságától.

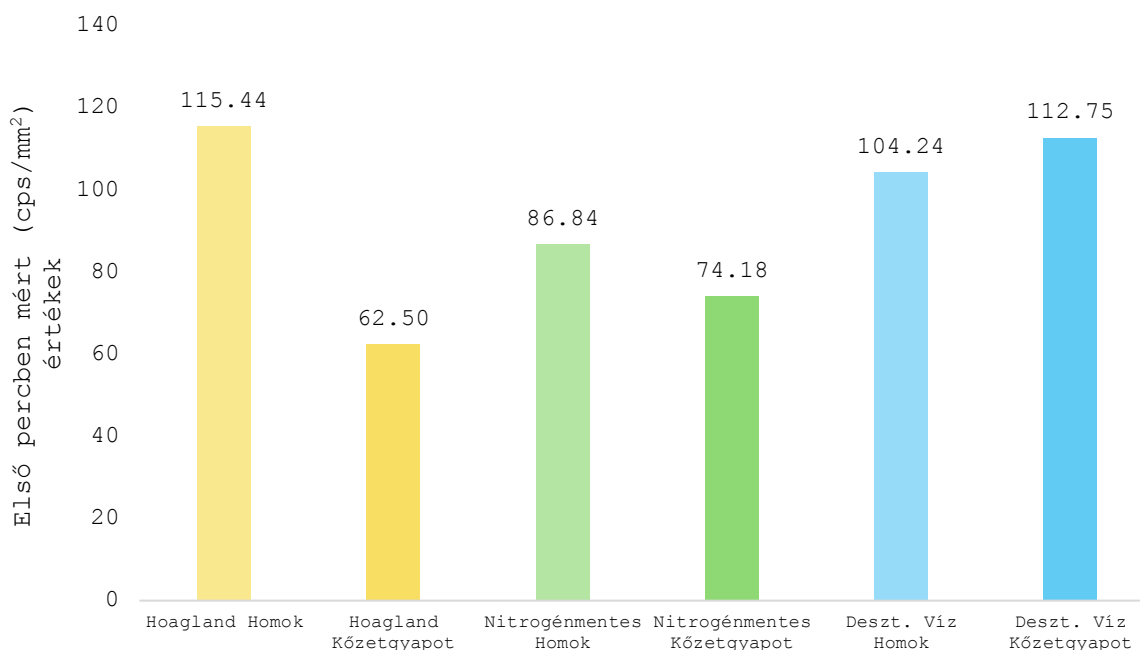
A kőzetgyapot termesztőközeg átlagértékeiről elmondható, hogy mindhárom kezelési csoport egymástól különbözik. Az Ioncserélt vízzel kezelt növények csoportja a másik két kezeléstől szignifikánsan különbözött. Kőzetgyapotban a növénymagasságot vizsgálva egyértelműen kimutatható, hogy a tápoldat összetétele meghatározó a növények növekedése és fejlődése szempontjából. A nitrogénhiány markáns depresszív hatást gyakorol a növénymagasságra, visszavetve ezen növények kezdeti növekedési erélyét. A termesztőközeg nagyobb hatást gyakorolt a növények fejlődésére, mint egy kritikus tápelem, a nitrogén megvonása.

5.1.2. Biofoton-emisszió mérés eredményeinek kiértékelése a közeghatást vizsgálva

A vizsgálati megközelítés fókuszában a nem-invazív lehetőségek közül a biofoton emisszió alapuló késleltetett fluoreszcencia kezdeti szintjét és lecsengésének első 15 percét vettük górcső alá. Ezen szakasz információt szolgáltat a fotoszintetikus elektrontranszport lánc állapotáról, ami közvetve következtetni enged a növény fotoszintetikus aktivitására is (Hennecke és Brück, 2012). A vizsgált lecsengési szakaszon belül a részletesebb eredmények reményében három szakaszt különítettünk el és ábrázoltunk: az első perc értékeit (7., 17. ábra), mivel azok több nagyságrenddel meghaladják az azt követő értékeket és direkt információt szolgáltatnak az elektrontranszportlánc működéséről, illetve a 2-4 perc, 5-8 perc, valamint a 9-15. percek értékeit, amelyek a lecsengés dinamikáját jellemzik.

A vizsgált termeszőközegekben nevelt növénycsoportok kiindulási fotonemisszió értéke

A 7. ábra a vizsgált, különböző tápközegekben nevelt csoportok kiindulási biofoton-emisszió értékeit mutatja a mérés első percében.



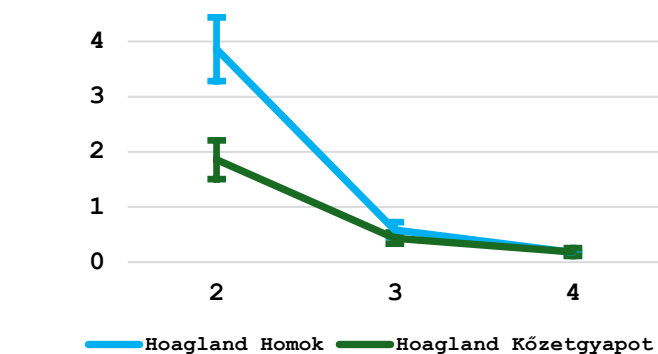
7. ábra: Kiindulási fotonemisszió értékek a termőközegek összehasonlításakor

A különbség a Hoagland oldattal öntözött növények esetében volt a legszembetűnőbb, hiszen itt kaptuk a legnagyobb és legkisebb értéket is, legmagasabb volt a homoktalajban nevelt növény 115,44 cps/mm²-es értéke, míg legalacsonyabb a kőzetgyapotban nevelt növény biofoton-emissziója 62,50 cps/mm² mért értékkel. Ehhez képest a nitrogénmentes oldattal kezelt csoportok egymáshoz egészen közeli, szinte megegyező értékeket mutattak. Azonban fontos megemlíteni, hogy az előbbi csoportok esetén ugyan csak megközelítőleg 12 cps/mm² eltérés volt az értékek között, mégis a homokon nevelt növény esetében jelentkezett a magasabb érték a kőzetgyapottal szemben. Egymáshoz viszonyítva hasonlóképpen alakultak az eredmények az ioncserélt vízzel öntözött csoportok esetében is, azonban az itt kapott értékek sokkal magasabbak voltak, mint az előbbi esetben. Emellett a két érték (104,24 cps/mm² a homok és 112,75 cps/mm² a kőzetgyapot talajú növény esetén) statisztikailag megegyezőnek tekinthető.

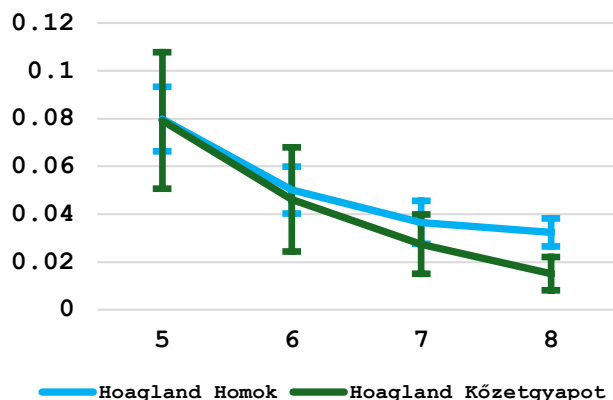
Igen szembetűnő tehát, hogy a legmagasabb fotonemisszió értéket az első percben a Hoagland tápoldattal öntözött, homoktalajban nevelt kukoricánövény adta. Meglepően ettől alig eltérő adatot kaptunk az ioncserélt vízzel öntözött, kőzetgyapot táptalajú növény fotonemisszióját tekintve. Továbbá ennek úgynevezett kontrollcsoportja, tehát ioncserélt vízzel öntözött, homoktalajban nevelt növényünk esetében sem csökkent jelentősebben a mért érték. A nitrogénmentes tápoldattal nevelt növények esetében kapott értékek hasonlóak voltak, nem

haladták meg a desztilláltvizes csoportokét. Azonban az előbbinek a párja, amelynél a tápoldat azonos, de természetközegként kőzetgyapotot használtunk a második legkisebb értéket képviseli a Hoagland tápoldattal öntözött, kőzetgyapot tápközegű csoport után.

Hoagland tápoldattal kezelt termőközegben nevelt növények fotonemisszió értékeinek lefutása a mérés második percétől



8.ábra: 2-4 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása



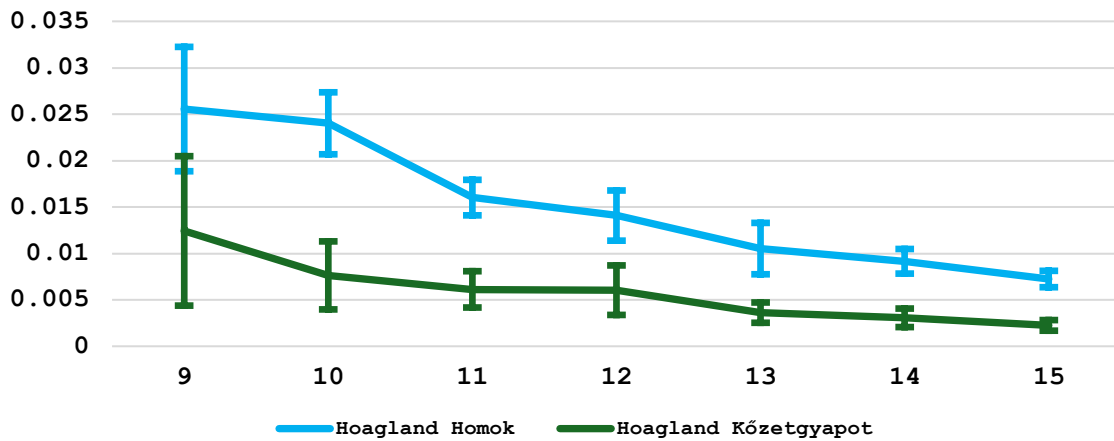
9.ábra: 5-8 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása

Perc	Sig. (2-tailed)	F	t
HO-HOK			
1	0,027	1,351	2,775
2	0,014	4,33	3,234
3	0,363	1,416	0,973
4	0,932	0,523	-0,089
5	0,986	0,662	0,019
6	0,874	1,232	0,165
7	0,559	0,134	0,614
8	0,089	0,148	1,975
9	0,233	0,103	1,305
10	0,011	0,005	3,461
11	0,007	0,087	3,804
12	0,061	0,101	2,233
13	0,036	2,618	2,584
14	0,006	0,077	3,944
15	0,001	0,661	5,16

4.táblázat:

Hoagland tápoldattal kezelt növények csoportja közötti statisztikai elemzés

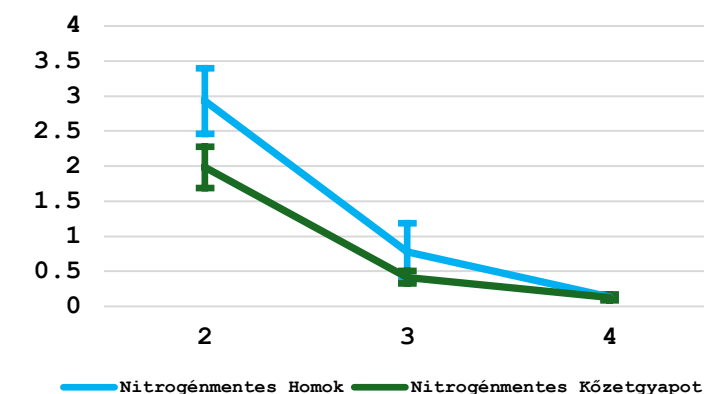
A 4. táblázat a homokban és a kőzetgyapot kockán nevelt kukoria növények fotonemisszióját hasonlítja össze statisztikailag, a mérés második percétől minden egyes percben. A vonaldiagrammokon jól látható a kibocsátott lumineszcencia értékek lefutása a mérés teljes idejében. A mérés első két percében (7-8.ábra) a két különböző közegekben nevelt növény között szignifikáns eltérés mutatható ki a mért biofoton-emisszió tekintetében. Jól látható, hogy az ezt követő percekben a két különböző tápközeg mért adatai statisztikailag nem különböztek egymástól.



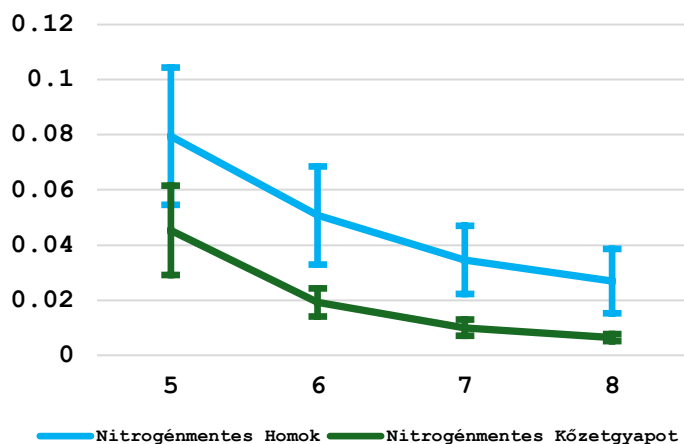
10.ábra: 9-15 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása

Érdekes, hogy a 10. perctől a mérés végéig azonban ismét statisztikailag is igazolható a különbség az egyes percekben mért értékpárok között (10.ábra). Az utolsó hat percből a 12. percben kapott statisztikai érték 0,061 volt ami ugyan már megegyezőnek számítana, azonban szakmai szempontból figyelemreméltó. A különbözőség oly mértékben jelentős volt ebben a periódusban, hogy a mérés 15 percében már szinte teljesen eltérő(99,9%-ban), adatokat kaptunk (4. táblázat).

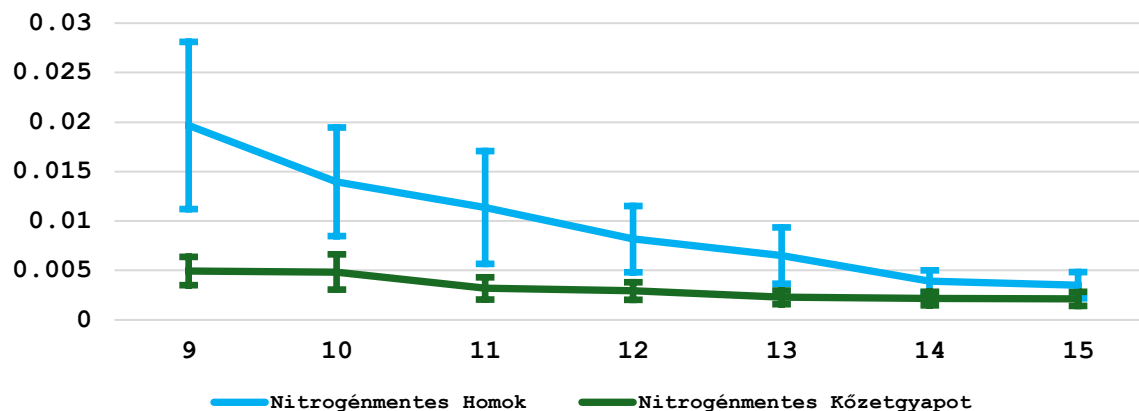
Nitrogénmentes tápoldattal kezelt termőközegben nevelt növények fotonemisszió értékeinek lefutása a mérés második percétől



11. ábra: 2-4 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása



12. ábra: 5-8 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása



13. ábra: 9-15 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása

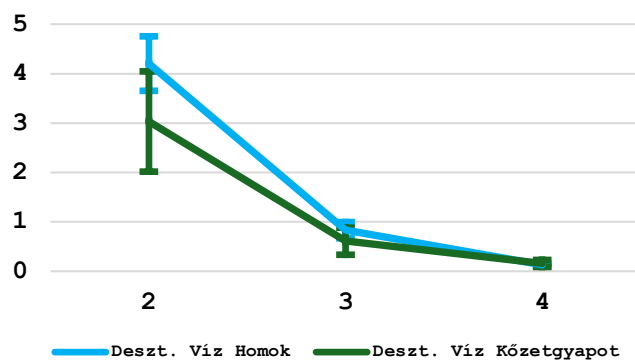
Perc	Sig. (2-tailed)	F	t
1	0,395	0,457	0,905
2	0,105	2,554	1,863
3	0,361	6,02	0,977
4	0,881	0,026	0,156
5	0,252	3,096	1,248
6	0,097	27,052	1,916
7	0,065	30,111	2,182
8	0,088	222,187	1,983
9	0,093	66,015	1,946
10	0,12	29,616	1,771
11	0,155	36,176	1,594
12	0,132	9,091	1,705
13	0,147	14,728	1,628
14	0,189	0,799	1,456
15	0,348	2,71	1,005

5. táblázat: N- mentes mod. Hoagland tápoldattal kezelt növények csoportja közötti statisztikai elemzés

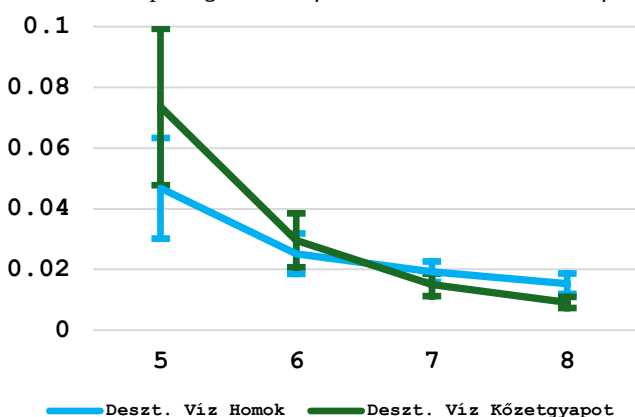
Az 5. táblázat adatai a nitrogénmentes tápoldattal kezelt, homoktalajban nevelt és az ugyanezen tápoldattal kezelt, azonban kőzetgyapot táptalajú kukoricanövény mért biofotonemissziós értéke párok közti statisztikai elemzést mutatja be. A biofotonemisszió értékek változása a mérés időtartama alatt szemléletesen csak a vonalábrákon látható (11.-12.-13. ábra)

Összességében elmondható, hogy a mérés teljes időtartamában a két vizsgált csoport között statisztikailag megegyező értékeket kaptunk. Abban azonban mégis elkülönülnek, hogy milyen mértékű volt az egyezés mértéke a mérés egyes perceiben. A mérés egészét tekintve igen szembetűnő, hogy a mérés első és utolsó percében mért fotonemisszió értékek közel azonos mértékben (39,5% és 34,8%) egyeznek meg a két vizsgált csoport esetében (5. táblázat) Tovább vizsgálva azonban a kapott értékeket láthatjuk, hogy a 4. percben szinte azonosak a két csoport értékei, ezzel egyidőben itt kaptuk a legnagyobb mértékű, 88,1%-os egyezőséget a két csoport között. Az 5. percben mért adatok közti egyezés azonban már jóval csekélyebb mértékű volt. A 6. és 9. perc közötti adatok egyezés csekély mértékűnek tekinthető a két csoport fotonemissziója között olyannyira, hogy a 7. percben kapott értékek közötti 6,5%-on már szignifikánsak tekinthető. A két kezelés biofoton-emissziós görbéinek lefutását vizsgálva arra lehet következtetni, hogy a különbség az elemszám növelésével nagy valószínűséggel a 6-11 perc közt statisztikailag igazolható lett volna, rámutatva a két természetközeg közti jelentős különbségre.

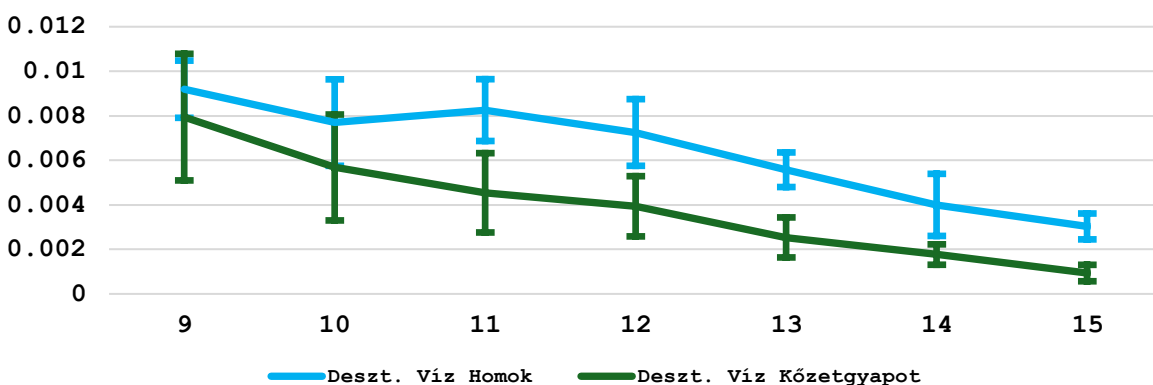
Ioncserélt vízzel öntözött termőközegben nevelt növények fotonemisszió értékeinek lefutása a mérés második percétől



14. ábra: 2-4 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása



15. ábra 5-8 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása



16. ábra: 9-15 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása

perc	Sig. (2-tailed)	F	t
		DV0-DV0K	
1	0,717	0,433	-0,376
2	0,289	0,965	1,135
3	0,457	0,71	0,781
4	0,679	1,761	-0,43
5	0,357	1,707	-0,977
6	0,67	0,346	-0,443
7	0,363	0,227	0,964
8	0,109	6,443	1,803
9	0,665	3,154	0,449
10	0,484	0,166	0,734
11	0,103	0,688	1,839
12	0,103	0,028	1,838
13	0,021	0,044	2,861
14	0,128	31,808	1,698
15	0,009	3,902	3,400

6. táblázat: Desztillált vízzel öntözött növények csoportja közötti statisztikai elemzés

Az összehasonlítás hasonlóan az előbbiekhöz itt is a homokban és a kőzetgyapotban nevelt növénycsoportok között történt, azonban ebben az esetben az öntözés a növények nevelése során ioncserélt vízzel történt. Az első 12 percben (14.-15.-16. ábra) a kapott értékek alapján megállapítható, hogy a görbék lefutása nagyon hasonló, az érékpárok közt a 12. percig a két kezelés tekintetében statisztikailag igazolható különbség nincs. Látható azonban az is, hogy a 11. és 12. percben jóval kisebb mértékű (mindkét percben 10,3%-os) egyezés volt kimutatható (6. táblázat). A következő 13. percben mért adatok már szignifikáns különbséget

mutattak. A 14. percben ugyanakkor ismét egyezőséget találtunk a két különböző tápközegben nevelt növény fotonemisszióját tekintve. A mérés utolsó percében viszont megint jelentős mértékű (99,1%) eltérést tapasztalhatunk a csoportok között, tehát még nagyobb mértékben, mint korábban a 13. percben.

A közegek hatásainak értékelése

A fejezetben bemutatott eredményeink alapján a késleltetett fluoreszcencia vizsgált értékei statisztikailag szignifikánsan elkülönültek a két alkalmazott növénynevelési közeg tekintetében, Hoagland tápoldatos öntözés mellett, aminek háttérében a két közeg hatásaként értelmezhető eltérő növényi növekedés állhat. A kőzetgyapotban nevelkedett növények nagyobbak voltak, a fényképek eredményei alapján (2. ábra) a növények egy előrehaladottabb fejlettségi fázisban voltak. Ezt támasztják alá a mért növénymagasság értékek (6. ábra), amelyek jelen kísérletben szignifikáns különbséget adtak a kőzetgyapotos nevelési közeg javára, mind a Hoagland tápoldattal öntözött homoktalajon, mind a nitrogénmentes homoktalajon, mind pedig a desztillált vizes öntözési kombinációk tekintetében. Az eredmények háttérében a homoktalaj kísérleti körülmények közötti, öntözés hatására bekövetkezett tömörödése állt (Landis, 1990 és Wilkerson, 2011), szemben a kőzetgyapot porózus, szerkezetével, ami ezáltal megfelelő oxigéntartalmat biztosított a csírázási folyamatok megindulásához (Olle, 2012) és az azt követő kezdeti gyökérnövekedéshez is, ami a vegetatív fejlődés dinamikáját intenzívebbé tette a vizsgált juvenilis szakaszban. Mindez megmutatkozott a késleltetett fluoreszcencia értékekben is: a homokban nevelkedett növények DF értékei magasabbak voltak a kőzetgyapotban nevelkedetteknél, ami intenzívebb fotoszintézisre utal az utóbbi esetben. Ennek háttérében a csíranövények leveleinek fejlődési dinamikája állhat, mivel a sziklevel fejlődés után kialakuló első lomblevelek kezdetben egy intenzív sejtosztódási szakasszal indítják fejlődésüket, amit egy merisztemoid osztódási szakasz követ, végül pedig a sejtosztódás az adott levélben teljesen leáll, majd a fejlődés a levél sejteinek megnyúlásos növekedésével ér véget, amely eredményeként kialakul a kifejlett levél (Gonzalez és mtsai., 2012). Ez fotoszintetikus szempontból azt jelenti, hogy egységnyi felületre eső sejtek, illetve az azokban található kloroplasztiszok száma a levél intenzív sejtosztódási szakaszának végén a legmagasabb. Mivel a késleltetett fluoreszcencia regisztrálása is területegységenként történik, az egységnyi levélterületre eső kibocsátott fotonmennyiség is magasabb a nagyobb sejtsűrűségű növényekben (Guo és Tan., 2013), jelen esetben a homoktalajokon neveltek esetében. Guo és Tan (2013) megállapítása szerint az klorofill koncentráció és a kibocsátott késleltetett fluoreszcencia intenzitása egymással szoros, egyenes arányos összefüggésben áll.

5.2.Hőstressz hatásának vizsgálata homok tápközegben

5.2.1. Elemtartalom vizsgálat kiértékelése

Az elemtartalom vizsgálatot kizárólag a homok csoporton végeztük el, mind a nem hőkezelt és hőkezelt növényeken. Ezzel vizsgálva, hogy a homok közegen jelentkező tápanyaghiány mennyire befolyásolja a hőkezelés hatása a felvett tápelemek mennyiségét. Mivel a növények tömege alig érte el az egy grammot, csak átlagminta képzésére és vizsgálatára nyílt módunk, statisztikai elemzés ezért ebben az esetben nem történt.

Minta jele	DV0	DVH	H0	HH	N0	NH
Sz. anyag tartalom%	92,7	93,3	93,6	93,0	92,4	92,8
N (m/m%)	1,63	1,65	2,20	2,59	1,40	1,26
P (m/m%)	0,36	0,34	0,50	0,38	0,32	0,36
K (m/m%)	0,79	1,00	2,27	1,77	3,12	2,54
Ca (m/m%)	0,84	0,95	1,48	1,11	0,84	0,86
Mg (m/m%)	0,32	0,36	0,57	0,44	0,32	0,34
Cu (mg/kg)	15,7	17,5	26,5	32,1	15,1	15
Zn (mg/kg)	61,4	35	79,3	75,9	80,6	38,2
Mn (mg/kg)	50,5	57,8	52,2	52,8	51,8	51,6
B (mg/kg)	8,24	9,04	16,5	18,3	11,1	9,76
Fe (mg/kg)	1055	932	845	987	1070	1027
Na (mg/kg)	1409	969	1465	2408	720	878

7. táblázat: A vizsgált csoportok tápelemtartalma

A 7. táblázat adatain jól látszik, hogy nem mindegyik tápelem esetén jelentkezik eltérés. Mivel a homoktalaj egy természeteshez közelebb álló tápközeg, ezért bizonyos elemek, mint például a talajban kevésbé mozgékony foszfor, az ioncserélt vizes atmoszféra követően is jelen lehetnek a közegben, a növény képes lehet azt fel is venni.

Az eredményekről szembetűnő, hogy a zöld színnel kiemelt elemek kizárólag a tápanyagutánpótlás tényét vagy annak elmaradását támasztják alá, nem látható jelentős különbség hőkezelés hatására. Ezen tápelemek a nitrogén, a kalcium, a magnézium, a réz és a bór. Egy-egy kezeléspár esetében (hőstresszelt és nem hőstresszelt növények) csak a Hoaglandos kezeléspárok közt találtunk a nitrogén (17%) és a kalcium (33%) esetében releváns a kezelésekkel összefüggő jelentősebb eltéréseket.

A nitrogén tápelemt vizsgálat szembetűnő a három csoport közötti különbség. A legnagyobb nitrogéntartalom a Hoagland tápoldattal kezelt csoportnál jelentkezett. A 2,4 m/m% átlagérték közel másfélszerese az ioncserélt vízzel kezelt 1,63 m/m% értékének, továbbá

egy tömegszázalékkal nagyobb a nitrogénnel kezelt csoport értékénél. Hőkezelés hatására a nitrogénnel ellátott Hoagland csoportnál nitrogéntartalom növekedést láthatunk, azonban a nitrogénhiányos csoportnál a hőstressz nitrogéntartalom csökkenést eredményezett.

A kalcium esetében szintén a Hoagland oldattal kezelt növénycsoport hozta a legmagasabb 1,3 m/m% átlagértékeket. Viszont a nitrogéntől eltérően az ioncserélt vizes és a nitrogénmentes tápoldattal öntözött növénycsoport jelentős eltérést egymáshoz képest nem mutatott. Érdeemes megfigyelni, hogy a kalciumtartalomban a Hoagland-dal kezelt csoportok közt hő hatására jelentős különbség alakul ki.

A magnézium esetében a nitrogénéhez hasonló tendenciát tapasztaltunk. A Hoagland tápoldattal kezelt csoport kevésbé kiugró, de ugyanúgy magasabb értékeket kaptunk. A másik két tápoldattal kezelt csoport az eddigiekhez képest kevésbé tér el a Hoagland tápoldattól, értékük közel azonos, csupán egy tizeddel tér el egymástól. Az ioncserélt vízzel kezelt csoport magnéziumtartalma gyakorlatilag azonosnak tekinthető, a különbség mindössze 0,02 m/m% volt.

A réz esetében a legnagyobb mennyiséget a Hoagland kezeléseknél kaptunk, majd követi az ioncserélt vízzel kezelt csoport és a legkevesebb réztartalommal a nitrogénhiányos tápoldattal kezelt csoportot rendelkezett. A három kezelés közötti különbség leginkább a nitrogéntartalomnál tapasztalt tendenciákat követi. A különbségek szembeötlők, Hoagland csoportok átlagos réztartalma 29,3 mg/kg, majd ezt követik tömegben az ioncserélt vizes csoportoké 16,6 mg/kg-mal és a legalacsonyabb pedig a nitrogénhiány indukált csoportok átlagértéke volt, 10,43 mg/kg.

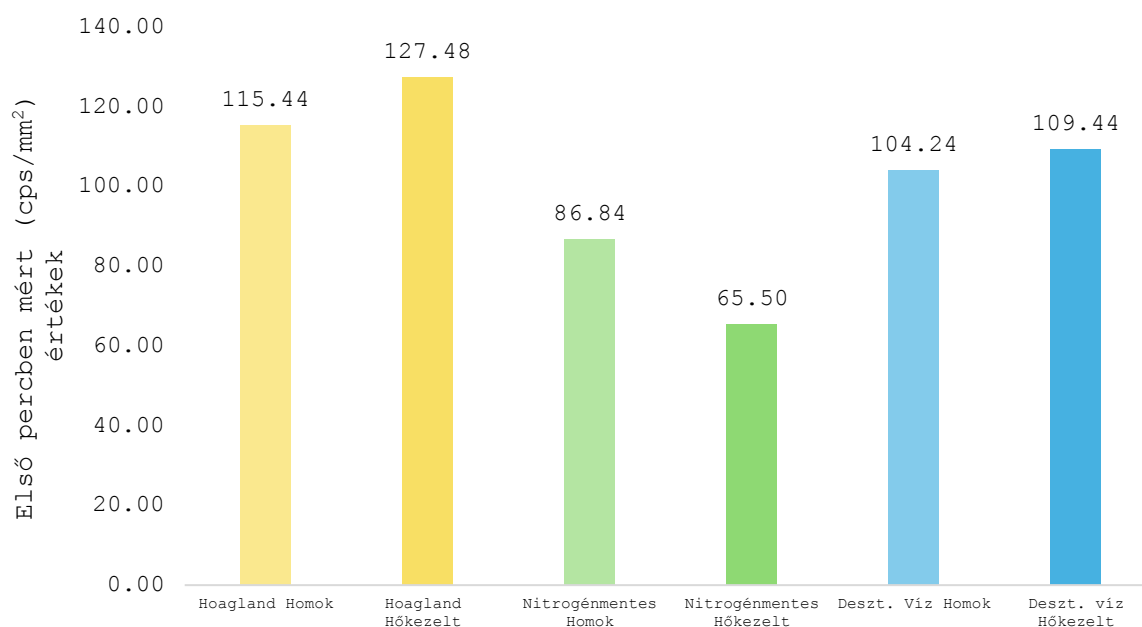
A cink esetében látható, hogy a Hoaglandos kezelések cinktartalma kiegyenlített volt, azonban a nitrogénhiányos és desztilláltvizes kezeléspárok között jelentős több mint másfélszeres, illetve több mint kétszeres különbségek voltak. A tápoldat cinktartalma kevésbé befolyásolta az értékek alakulását, mint maga a hőkezelés. Azaz hőkezelés hatására a növények cinktartalma drasztikusan csökkent

Az utolsó tápelem, ahol tendenciák voltak megfigyelhetők az a bór volt. Az eddigi sorrend itt megváltozott. A homok tápközegre leginkább jellemzően az ioncserélt vízzel öntözött csoportok tartalmazták a legkevesebb bórt, őket követték a nitrogénhiányos oldattal öntözött csoportok, mivel a tápoldat tartalmazott bórt, ezért képes volt azt a növény nagyobb mértékben beépíteni, ezért is kaptunk egy magasabb 10,43 mg/kg átlagtömeget. A Hoagland csoport bórtartalma messze a legmagasabb volt 17,4 mg/kg, közel kétszerese a desztillált vizes kezelésének.

5.2.2. Biofoton emisszió eredményeinek alakulása hőstressz hatására homok nevelőközegben

Hőkezelt és kontrollcsoportok kiindulási biofoton emisszió értéke

A homok táptalajon nevelt kukoricánövények indukált hőstressz hatásra kapott értékeit hasonlítottuk össze a kontrollcsoportok értékeivel.

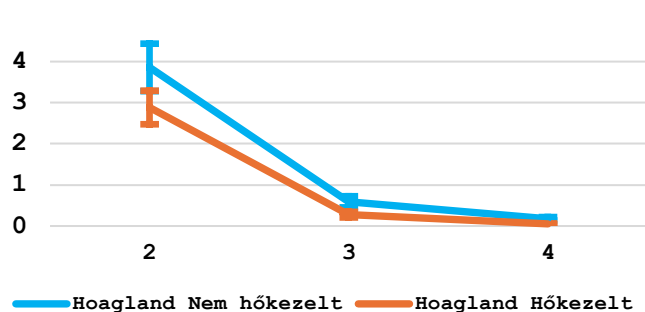


17.ábra: Az egyes kezelések hőstressz utáni kiindulási fotonemisszió értékei

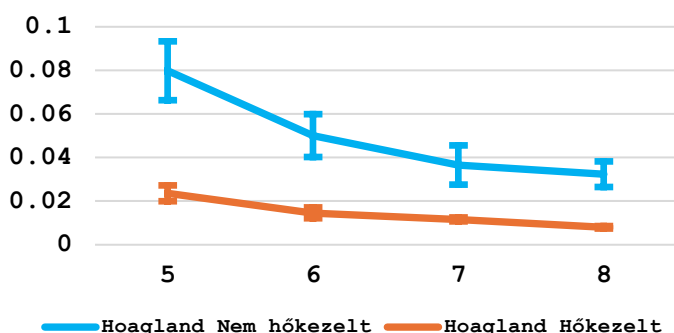
A 17. ábrán egy oszlopdiagramm látható, mely a hőkezelt csoportok és kontrollcsoportjaik kiindulási értékét, tehát első percben kibocsátott fotonok mennyiségét szemlélteti.

A Hoagland oldattal kezelt homoktalajon nevelt kukoricánövények esetében kaptuk a két legmagasabb biofoton emisszió értéket, de mégis a nagyobb értékeket a hőkezelt csoport esetében mértük, ott 127,48 cps/mm² volt a fotonok mért kibocsátásának értéke. Ezzel szemben a nitrogénmentes tápoldattal kezelt, azonban nem hőkezelt csoport esetén magasabb biofotonemissziós értékeket kaptunk, mint hőkezelés hatására. Legkisebb biofoton emissziót a hőkezelt nitrogénmentes tápoldattal öntözött növényenél tapasztaltunk. Ez azért is érdekes mert az előbbi vizsgált pároshoz képest itt éppen a hőkezelt csoportnál tapasztalhattunk egy nagyságrenddel alacsonyabb értéket. Végül az ioncserélt vízzel öntözött csoportokat megvizsgálva látható, hogy nem jelentkezett statisztikailag igazolható különbség hőkezelés hatására.

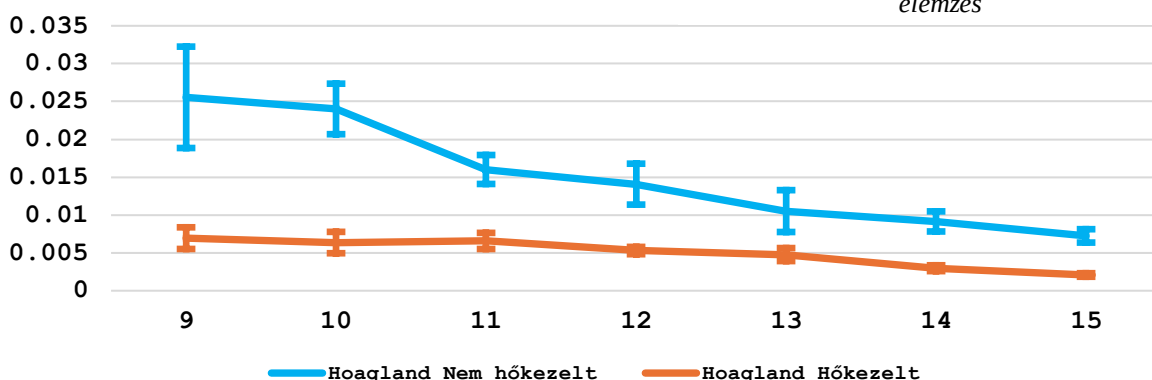
Hoagland tápoldattal kezelt csoport fotonemisszió értékeinek összehasonlítása indukált hőstressz hatását követően a mérés második percétől



18. ábra: 2-4 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása



19. ábra: 5-8 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása



20. ábra: 9-15 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása

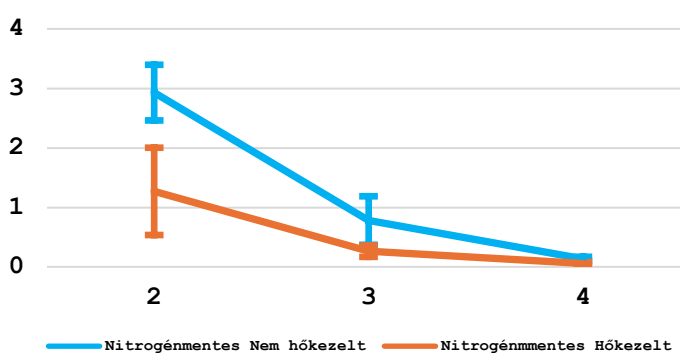
Perc	Sig. (2-tailed)	F	t
1	0,583	1,301	-0,579
2	0,217	2,434	1,381
3	0,086	6,572	2,055
4	0,027	3,976	2,917
5	0,007	15,747	4,020
6	0,013	3,276	3,495
7	0,033	8,959	2,761
8	0,006	2,936	4,132
9	0,035	3,627	2,717
10	0,003	2,147	4,871
11	0,005	0,941	4,313
12	0,019	5,304	3,195
13	0,094	2,837	1,984
14	0,004	2,486	4,471
15	0,001	3,657	5,659

8. táblázat: Hoagland tápoldattal kezelt növények csoportja közötti statisztikai elemzés

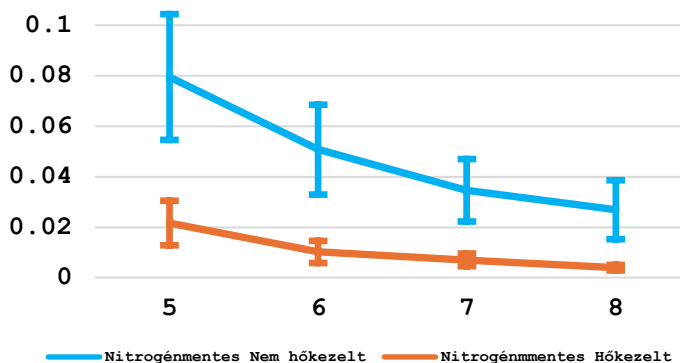
Elsőként a Hoagland oldattal kezelt növényeket vizsgálva látható, hogy a 3. percig az két csoport, tehát a hőkezelt és a nem hőkezelt csoportok mért biofoton emissziója statisztikailag igazolhatóan nem különbözik (17.-18. ábra). Bár az is jól látható, hogy egyre kisebb mértékű az adatok közti hasonlóság a mérés előrehaladtával (0,583 -> 0,086), így a 3. percben mért egyezés már igen közel van a határértékhez, de erre még egyezésként kell tekinthetünk (8. táblázat). Majd olyannyira csökkentek a biofotonemisszió értékek, hogy a 4. perctől már statisztikailag eltérő adatokat figyelhetünk meg, egészen a vizsgálat 12. percéig (19-20. ábra). Ezt követően egy perc erejéig ismét nincs igazolható különbség a két csoport között, ám az utolsó két percben szintén szignifikánsan eltéréseket tapasztalhatunk az egyes adatpárok között az idő előrehaladtával (0,004; 0,001). Összességében elmondható, hogy ebben az

összehasonlításban nagyrészt egymástól szignifikánsan eltérő adatokat kaptunk a mérések egyes perceiben. Mindez rámutat arra, hogy a hősokk még a megfelelően táplált növények esetében is jól detektálható stresszt jelent a növényeknek.

Nitrogénmentes tápoldattal kezelt csoport fotonemisszió értékeinek összehasonlítása indukált hőstressz hatást követően a mérés második percétől



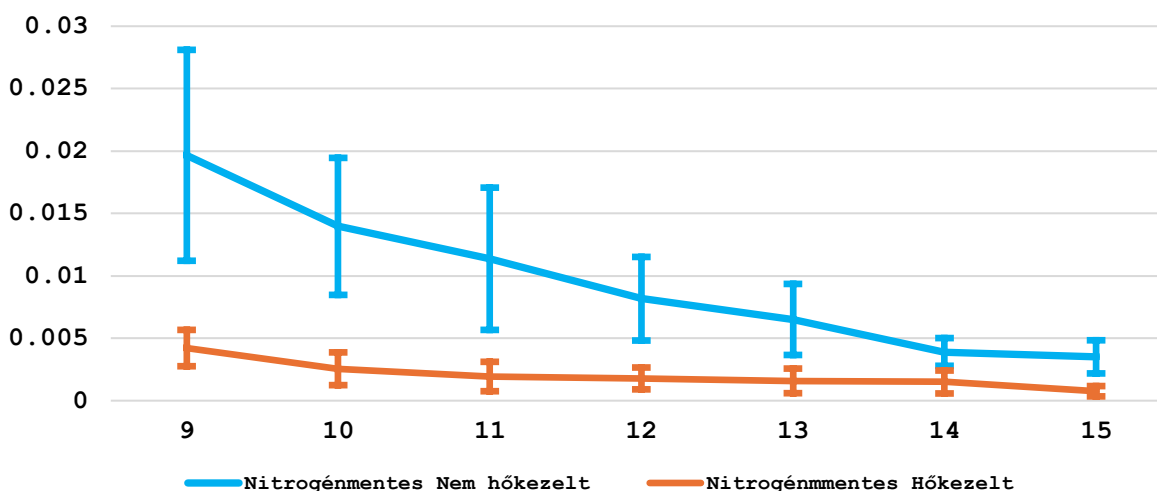
21.ábra: 2-4 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása



22.ábra: 5-8 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása

Perc	Sig. (2-tailed)	F	t
1	0,418	30,905	0,870
2	0,105	0,511	1,908
3	0,265	4,279	1,229
4	0,096	0,936	1,969
5	0,071	19,923	2,190
6	0,069	35,295	2,212
7	0,072	28,444	2,186
8	0,098	285,552	1,958
9	0,122	49,197	1,801
10	0,090	77,150	2,022
11	0,156	31,047	1,621
12	0,115	7,426	1,845
13	0,153	8,420	1,634
14	0,146	0,082	1,671
15	0,095	6,122	1,978

9.táblázat: N- mentes mod. Hoagland tápoldattal kezelt növények csoportja közötti statisztikai elemzés

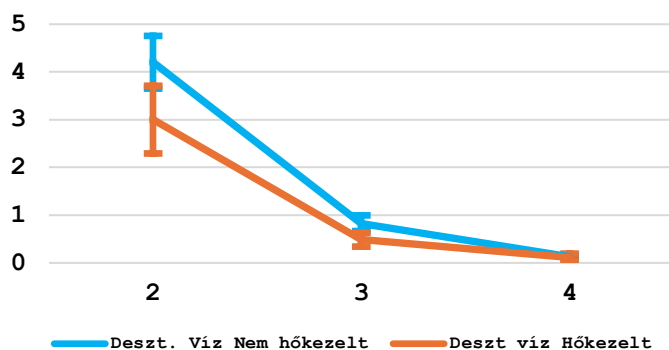


23.ábra: 9-15 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása

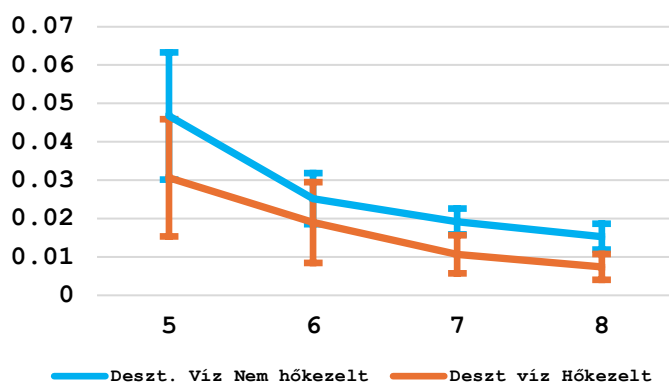
Az előzőhöz hasonlóan hőkezelést alkalmaztunk a nitrogénmentes tápoldattal kezelt, homokon nevelt növénycsoportokon is. Amikor a biofoton emisszió mérés után a kapott adatokat kiértékeltek egészen más eredményeket kaptunk, mint az előbbieken (21.-22.-

23.ábra). Összességében elmondható az, hogy a mérés minden egyes percében statisztikailag igazolható különbségeket nem kaptunk, de az értékekből látható, hogy az elemszám növelésével már nagy valószínűség szerint az egyes időpontokban mért biofoton emissziós értékek közt igazolható eltérés lett volna, különös tekintettel a 4. perctől kapott értékekre (9. táblázat).

Ioncserélt vízzel öntözött csoport fotonemisszió értékeinek összehasonlítása indukált hőstressz hatást követően a mérés második perctől



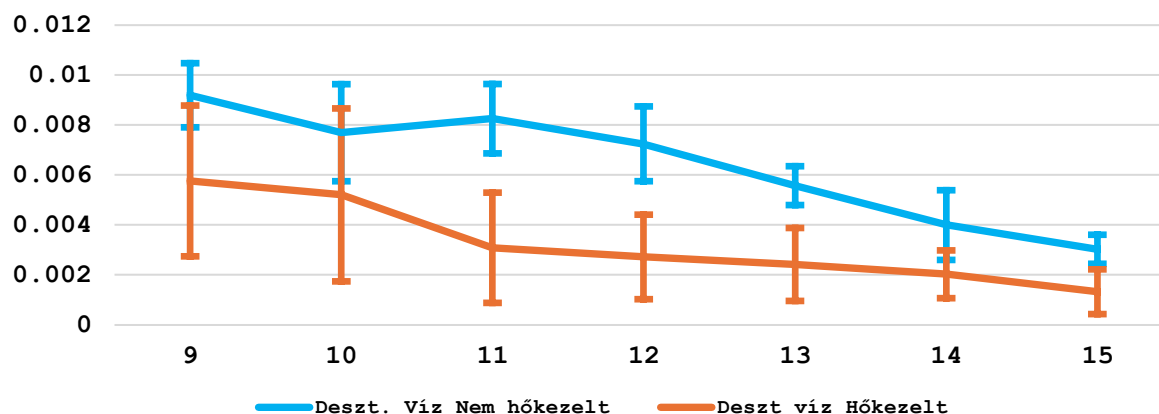
24.ábra: 2-4 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása



25.ábra: 5-8 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása

Perc	Sig. (2-tailed)	F	t
		DV0-DVH	
1	0,781	0,046	-0,288
2	0,173	1,112	1,495
3	0,113	0,011	1,779
4	0,836	2,087	0,214
5	0,447	0,000	0,799
6	0,591	0,401	0,559
7	0,150	1,139	1,594
8	0,101	0,002	1,852
9	0,276	1,448	1,169
10	0,503	1,440	0,701
11	0,058	0,591	2,215
12	0,055	0,164	2,241
13	0,066	1,840	2,132
14	0,229	4,753	1,302
15	0,113	0,306	1,781

10. táblázat: Desztillált vízzel öntözött növények csoportja közötti statisztikai elemzés



26.ábra: 9-15 percig mért biofotonemisszió értékeinek lefutása

Az ioncserélt vízzel öntözött, homokon nevelt csoportok között az első 10 percben nem kaptunk statisztikailag igazolható különbségeket. Ezek többnyire közel megegyező értékek voltak, leginkább azonban a 4. percben egyeztek meg a két csoport adatai (24.ábra). Tulajdonképpen statisztikailag a 11-13. perc közti értékek is megegyezőnek tekinthetők (26.ábra), azonban az értékek az egyezés határán mozognak (6,6%-os a legmagasabb egyezés), míg végül kevésbé jelentős egyezést (22,9 és 11,3%) kaptunk a 14. és 15. percben mért adatok összehasonlításakor (10. táblázat). Egészében az ioncserélt vízzel öntözött csoport esetében is elmondhatjuk, hogy hőkezelés hatására a kontrollcsoporttól statisztikailag vett értelemben nem tért el a hőkezelt csoport.

A hőstressz hatásainak értékelése

A közeghatás mellett a hőstressz is jelentős, statisztikailag igazolható különbségeket eredményezett, ami összhangban áll korábbi munkákkal, ahol hőstressz és biostimuláns hatásait lehetett kimutatni és szintén a biofoton értékek alapján elkülöníteni búza csíranövényeken (Jócsák és mtsai., 2022), valamint azuki babon (*Vigna angularis*) (Kobayashi és mtsai., 2014). A hőstressz közvetlenül károsítja a kettes számú fotoszisztémát (photosystem II-PSII), ami a késleltetett fluoreszcencia elsődleges és szinte kizárólagos helye a növényekben, ahogy a PSII PSI-hez viszonyított magasabb fokú hőstresszérzékenységet Enami és mtsai. (1994) kísérletesen bizonyították spenót növényeken. Zeng és Xing (2005) megállapították, hogy a DF paraméterek, azaz az az intenzitás, emissziós és gerjesztési spektrum és a fotoszintetikus aktivitás 30 °C-nál voltak maximálisak, azonban a hőmérséklet növekedésével mindezen paraméterek egyöntetű, jelentős csökkenést mutattak és 40 °C felett egyértelmű gátlás jelentkezett (Zeng és Xing, 2005). Mindez összhangban van az általunk tapasztalt DF csökkenéssel és eredményeink ezáltal illeszkednek a korábbi kutatási eredményekhez. Emellett megállapítottuk, hogy a közeghatás jellemzésére hatékonyabb paraméternek bizonyult a kezdeti fotonemissziós különbségek elemzése, azonban a hőstressz hatásait ezen paraméter még nem jelzte, ez utóbbi a 4-15 percig tartó szakasz elemzése derített fényt a hőstressz hatására. Ebben a lecsengési szakaszban a hőstressz membrán károsító hatása érhető tetten (Li és Howell, 2021), amely jelentősen károsíthatja a fotoszintetikus membránokat, így az elektrontranszport láncot is a PSII és a PSI között, éppen azt a folyamatot, amelyből a késleltetett fluoreszcencia jelensége származik (Guo és Tan, 2013). Ezáltal bizonyítást nyert, hogy ezen nem-invazív technológiával hatékonyan jellemezhetők a környezeti tényezők- esetünkben a közeg és a hőstressz- hatásai, illetve korábbi munkáktól eltérően hasznos, vélhetően hatáspecifikus információ nyerhető ki

a késleltetett fluoreszcencia lecsengésének szakaszokra bontásáról is, azonban ennek bizonyítása további vizsgálatokat igényel.

Eredményekből fakadó gyakorlati szempontú javaslatok

A termesztőközeg-tápelemellátottság-hőstressz viszonylatában megállapítható, hogy a tápelemhiány fejt ki a legmarkánsabb hatást a kukorica stresszfaktorokkal szembeni ellenállóképességére. Ebből következik, hogy harmonikus tápelem-utánpótlás hatására kukorica sokkalta ellenállóbbá válik az abiotikus stresszfaktorokkal szemben.

Gazdálkodás során célszerű törekedni olyan készítményeket használatára, melyek a makro- és mikroelem pótlás mellett, biostimulánsokat is tartalmaznak (külön kijuttatva vagy tankkeverékben), melyek a szükséges tápelemek mellett azok beépülését is támogató bioaktív anyagokat is tartalmaznak, fokozva a növények ellenálló képességét, stressztoleranciáját.

6. Összefoglalás

A kísérlet kezdetekor célul tűztük ki egy olyan gazdasági haszonnövény vizsgálatát, amely annak ellenére, hogy nagy gazdasági jelentőséggel bír, jelentős hatással van termesztetőségére az abiotikus környezeti tényezők összessége. Éppen ezért esett a választásunk a kukoricára, mint a hazánkban és a világon is az egyik legnagyobb területen termesztett gazdasági haszonnövényre, melynek fajlagos nitrogén igénye magas, továbbá a hőstresszhatás is jelentős termés kiesést képes okozni bizonyos fenológiai fázisaiban, mint a virágzás vagy a terméskötés időszaka. A vizsgálatok középpontjában a nem-invazív képalkotó technikákkal történő megközelítés állt.

Célunk volt megvizsgálni, hogy a különböző termesztőközegek hogyan befolyásolják juvenilis állapotban a tápanyaghiány indukálta stresszválaszokat kukoricában. Továbbá, hogy az indukált hőstressz és a tápanyaghiány milyen hatást gyakorol juvenilis állapotban a homok termesztő közegben nevelt kukoricanövényekre.

Célunk volt mindemellett, hogy újszerű megközelítésben a késleltetett fluoreszcencia első szakaszának kibontásával, minél részletesebb információkat kapjunk a növények állapotáról és a késleltetett fluoreszcencia lecsengéséről, amire korábban még nem volt példa.

Kísérleteink során egyrészt a homok és kőzetgyapot termőközegek tápanyagszolgáltató képességének összehasonlítását, másrészt a hőstressz hatását vizsgáltuk kukoricanövényeken.

A kőzetgyapot és homok termesztőközegen a tápanyaghiány hatását vizsgáltuk. Megfigyeltük a homokhoz képest a kőzetgyapotban jelentkező markánsabb tápanyaghiány

jelentette stresszhatásokat. Ezzel párhuzamosan homokban nevelt kukoricanövényeket tettünk ki nem csak a tápanyaghiány, hanem a magas hőmérséklet okozta stresszhatásoknak is.

Kísérletünkben RGT Mexini névre keresztelt hibridkukorica vetőmagot használtunk. Tenyészidejét tekintve egy közép-kései érésű hibrid, 480-490-es FAO számmal. A vetőmag jó csírákéességét alapul véve kizárólag a szükséges 30 cserépbe, illetve 15 tápkockába vetettünk, oda is egy-egy szemet 1-2 cm mélységbe.

A cserepeket és közetgyapot kockákat a kísérlet vetést követő időtartamán keresztül, kezelési csoporttól függően 50 ml mennyiségű ioncserélt vízzel, illetve tápoldatokkal kétnaponta öntöztük.

A kísérlet beállítására a MATE Kaposvári Campusán található klímakamrában került sor. A klímakamra egy Aquaterra Kft. által forgalmazott „POL-EKO K 1200 Top Plus” típusú eszköz volt. A klímakamra használatával ismételhetővé tehattük a kísérletet és kiküszöbölhettük a kísérlet szempontjából hátrányos tényezőket, mint az ingadozó hőmérséklet és páratartalom.

A homokban nevelt növényeket három különböző tápanyagellátottsági csoportra különítettük el, mindegyik csoportba 10 növény tartozott. A közetgyapotban nevelt növényeket szintén három különböző tápanyagellátottsági csoportra különítettük el, mindegyik csoportba 5 növény tartozott. A három-három külön csoportot különböző tápoldattal öntöztük. Létrehoztunk egy tápanyaggal teljes mértékben ellátott csoportot, egy nitrogénhiányos csoportot és egy kontroll, minden tápanyagmentes ioncserélt vízzel öntözött csoportot.

A klímakamra hőmérséklete a kelés időszakának megfelelő 20 °C-on állt. Majd 3-4 leveles fenológiai fázisban végeztük el a hőkezelést. A hőhatást egy Mammert UN30 típusú szártókamrában 120 percig, 42 °C hőmérsékleten indukáltuk.

A három csoport növényeinek felét, tettük ki hőstressznek, azaz öt növényt csoportonként.

A két közegen nevelt, mindhárom növénycsoport növényein a vetéstől számított 19. napon laboratóriumi vizsgálatokat végeztünk el.

Adatgyűjtés és feldolgozásának módszerei:

Növénymagasság mérés: A homoktalaj és a közetgyapot termőközeg összehasonlítását a biofoton-emisszió mérésén túl 19. napon mért növénymagassággal is alátámasztottuk. A növény magasságát a leghosszabb levél végén kifeszített állapotban határoztuk meg. A növénymagasságot átlagoltuk, majd annak eredményeit használtuk. A kísérlettel célunk volt fizikálisan mért adatokkal is alátámasztani a termőközegek közötti eltéréseket.

Biofoton emisszió mérés: A biofoton emisszió méréséhez NightShade® LB 985 in vivo Plant Imaging System elnevezésű készüléket alkalmaztuk.

Mérések során törekedtünk a növények egyenként mérésére, ezért a növények teljes felületét 15+1 percen keresztül mértük, minden egyes perc végén nyertük ki az adatokat. Majd a második perctől a tizennegyedik percig a képkészítést követően már nem volt beállított megvilágítás, így az összes kép sötétben készült a fotoszintetikus apparátus gerjesztése nélkül. A tizenötödik percben készült el az utolsó sötétben készült kép.

A mért értékeket területegységre normalizáltuk és cps/mm² (count per second/mm²) -ban fejeztük ki.

Elemtartalom vizsgálat: A nem-invazív mérés végeztével a homok közegben nevelt csoportot felszámoltuk, majd gyökérzetével együtt továbbítottuk a Kaposvári Campus területén található akkreditált egyetemi laboratórium felé, ahol teljes növényanalízist kértünk.

A 7. táblázat eredményeiről szembetűnő, hogy a zöld színnel kiemelt elemek kizárólag a tápanyagutánpótlás tényét vagy annak elmaradását támasztják alá, nem látható jelentős különbség hőkezelés hatására. Ezen tápelemek a nitrogén, a kalcium, a magnézium, a réz és a bór. Egy-egy kezeléspár esetében (hőstresszelt és nem hőstresszelt növények) csak a Hoaglandos kezeléspárok közt találtunk a nitrogén (17%) és a kalcium (33%) esetében releváns a kezelésekkel összefüggő jelentősebb eltéréseket.

Az eredmények minden esetben statisztikai elemzésen estek át, beleértve a többtényezős ANOVA-t, és a Duncan-tesztet.

Közegek hatásainak értékelése: Eredményeink alapján a késleltetett fluoreszcencia vizsgált értékei statisztikailag szignifikánsan elkülönültek a két alkalmazott növénynevelési közeg tekintetében, Hoagland tápoldatos öntözés mellett, aminek háttérében a két közeg hatásaként értelmezhető eltérő növényi növekedés állhat. A kőzetgyapotban nevelkedett növények egy előrehaladottabb fejlettségi fázisban voltak. Ezt támasztják alá a mért növénymagasság értékek, amelyek jelen kísérletben szignifikáns különbséget adtak a kőzetgyapotos nevelési közeg javára, mind a Hoagland tápoldattal öntözött homoktalajon, mind a nitrogénmentes homoktalajon, mind pedig a desztillált vizes öntözési kombinációk tekintetében.

A homokban nevelkedett növények DF értékei magasabbak voltak a kőzetgyapotban nevelkedetteknél, ami intenzívebb fotoszintézisre utal az utóbbi esetben.

Hőstressz hatásainak értékelése: A közeghatás mellett a hőstressz is jelentős, statisztikailag igazolható különbségeket eredményezett.

Megállapítottuk, hogy a közeghatás jellemzésére hatékonyabb paraméternek bizonyult a kezdeti fotonemissziós különbségek elemzése, azonban a hőstressz hatásait ezen paraméter még nem jelzte, ez utóbbi a 4-15 percig tartó szakasz elemzése derített fényt a hőstressz hatására.

Ezáltal bebizonyosodott, hogy ezen nem-invazív technológiával hatékonyan jellemezhetők a környezeti tényezők- esetünkben a közeg és a hőstressz- hatásai, illetve korábbi munkáktól eltérően hasznos, vélhetően hatáspecifikus információ nyerhető ki a késleltetett fluoreszcencia lecsengésének szakaszokra bontásáról is, azonban ennek bizonyítása további vizsgálatokat igényel.

Gyakorlati szempontból megállapíthattuk, hogy a termesztőközeg-tápelemellátottság-hőstressz viszonylatában a tápelemhiány fejt ki a legmarkánsabb hatást a kukorica stresszfaktorokkal szembeni ellenállóképességére. Ebből következik, hogy harmonikus tápelem-utánpótlás hatására kukorica sokkalta ellenállóbbá válik az abiotikus stresszfaktorokkal szemben.

Gazdálkodás során célszerű törekedni olyan készítményeket használatára, melyek a makro- és mikroelem pótlás mellett, biostimulánsokat is tartalmaznak (külön kijuttatva vagy tankkeverékben), melyek a szükséges tápelemek mellett azok beépülését is támogató bioaktív anyagokat is tartalmaznak, fokozva a növények ellenálló képességét, stressztoleranciáját.

7. Irodalomjegyzék

1. ÁCS, F (2005). A talaj és az éghajlat közötti kapcsolat modellezése. *Agrokémia és Talajtan*, 54(3-4), 257-274.
2. ALI, M., KHAN, M., & SHAH, S. (2021). Impact of nitrogen deficiency on growth, yield, and biochemical parameters of maize. *Agronomy*, 11(2), 123-137. <https://doi.org/10.3390/agronomy11020123>
3. ANDA, A. (1987). A kukorica néhány sugárzás-, hő- és vízháztartási komponensének alakulása a N-ellátottság függvényében.
4. BITA, C. E., & GERATS, T. (2013). Plant tolerance to high temperature in a changing environment: scientific fundamentals and production of heat stress-tolerant crops. *Frontiers in plant science*, 4, 273.
5. BOCZ, E. (1974). A szántóföldi növények hazai trágyázásának irányelvei. Debrecen: Mezőgazdasági kiadó.
6. BODERMER, U., & GERHARDT, V. (2000). Phytoplankton abundance and composition of freshwaters systems determined by DF excitation spectroscopy and conventional. *Methods Archiv Hydrobiol Spoc Iss Adv Limnol*, 55, 87-100.
7. BOYER, J. S. (1982). Plant productivity and environment. *Science*, 218(4571), 443-448.
8. BUSSELL W. T., MCKENNIE S. Rockwool in horticulture, and its importance and sustainable use in New Zealand // *New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science*. – 2004, vol. 32, iss. 1, p. 29–37
9. Corn growth and development. *Grow Corn Best Manag. Pract.*
10. CRAFTS-BRANDNER, S. J., & SALVUCCI, M. E. (2002). Sensitivity of photosynthesis in a C4 plant, maize, to heat stress. *Plant physiology*, 129(4), 1773-1780.
11. ENAMI, I., KITAMURA, M., TOMO, T., ISOKAWA, Y., OHTA, H., & KATOH, S. (1994). Is the primary cause of thermal inactivation of oxygen evolution in spinach PS II membranes release of the extrinsic 33 kDa protein or of Mn?. *Biochimica et Biophysica Acta (BBA)-Bioenergetics*, 1186(1-2), 52-58.
12. Flor-HenrY, M Use of highly sensitive two-dimensional luminescence imaging system to monitor endogenous bioluminescence in plant leaves. *BMC Plant Biol* 4,19.
13. FREY, F. P., URBANY, C., HÜTTEL, B., REINHARDT, R., & STICH, B. (2015). Genome-wide expression profiling and phenotypic evaluation of European maize inbreds at seedling stage in response to heat stress. *BMC genomics*, 16, 1-15.
14. GASTAL, F., & LEMAIRE, G. (2002). N uptake and distribution in crops: An agronomical and ecophysiological perspective. *Journal of Experimental Botany*, 53(370), 789-799. <https://doi.org/10.1093/jexbot/53.370.789>
15. GONZALEZ, N., VANHAEREN, H., & INZÉ, D. (2012). Leaf size control: complex coordination of cell division and expansion. *Trends in plant science*, 17(6), 332-340.
16. GORDON, I. 2004. Potting media constituents. *International Plant Propagators' Society, Combined Proceedings*. 54: 78–84.

17. GUO, Y., & TAN, J. (2013). Applications of delayed fluorescence from photosystem II. *Sensors*, 13(12), 17332-17345.
18. HARMATI, I. (1995). A kukorica nitrogén és foszfor műtrágyázása meszes réti talajon. *Agrokémia és talajtan*, (44 1-2), 31-39.
19. HATFIELD, J. L., & PRUEGER, J. H. (2015). Temperature extremes: effect on plant growth and development. *Weather Clim Extrem* 10: 4–10.
20. HENNECKE, M., AND BRÜX, A. (2012). Measurement of Biophoton Emission in Plants – An Alternative Monitoring System for Stress Factors. *Berthold Technologies*, AN985_005v1.
21. HOLLOSY, Z. 2. (2007). A Búza És Kukorica Fedezeti Termésátlagának Alakulása Magyarországon. *GAZDÁLKODÁS: Scientific Journal on Agricultural Economics*, 51(4), 88-94.
22. JÓCSÁK, I., CSIMA, F., & SOMFALVI-TÓTH, K. (2024). Alterations of Photosynthetic and Oxidative Processes Influenced by the Presence of Different Zinc and Cadmium Concentrations in Maize Seedlings: Transition from Essential to Toxic Functions. *Plants*, 13(8), 1150.
23. KOBAYASHI, K., OKABE, H., KAWANO, S., HIDAHA, Y., & HARA, K. (2014). Biophoton emission induced by heat shock. *PLoS One*, 9(8), e105700.
24. KOVÁCS, H. (2021). A főbb szántóföldi növények strukturális változásának alakulása és jövőbeni kialakításai a Dél-Alföld mezőgazdaságában. *Jelenkori társadalmi és gazdasági folyamatok*. 16(1-2): 149-160.
25. KSH,(2023)https://www.ksh.hu/s/kiadvanyok/mezogazdasagi_termeloi_es_raforditasi_arak_2023_i_felev/mezogazdasagi_termeloi_es_raforditasi_arak_2023_i_felev.pdf
26. KSH. (2024 Forrás: https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0012.html
27. KSH. (2024). Forrás: https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/html
28. LANDIS, T. D., JACOBS, D. F., WILKINSON, K. M., & LUNA, T. (1990). Growing media. *The container tree nursery manual*, 2, 41-85.
29. LEGHARI, S. J., WAHOCHO, N. A., LAGHARI, G. M., ET AL. (2016). Role of nitrogen for plant growth and development: A review. *Advances in Environmental Biology*, 10(9), 209-218.
30. LEGHARI, S. J., WAHOCHO, N. A., LAGHARI, G. M., HAFEEZLAGHARI, A., MUSTAFABHABHAN, G., HUSSAINTALPUR, K., ... & LASHARI, A. A. (2016). Role of nitrogen for plant growth and development: A review. *Advances in Environmental Biology*, 10(9), 209-219.
31. LI, Z., & HOWELL, S. H. (2021). Heat stress responses and thermotolerance in maize. *International Journal of Molecular Sciences*, 22(2), 948.
32. LUKÁCS, H., JÓCSÁK, I., SOMFALVI-TÓTH, K., & KESZTHELYI, S. (2022). Physiological responses manifested by some conventional stress parameters and biophoton emission in winter wheat as a consequence of cereal leaf beetle infestation. *Frontiers in Plant Science*, 13, 839855.

33. MARSCHNER, H. (2012). *Marschner's Mineral Nutrition of Higher Plants* (3rd ed.). Academic Press
34. MATSUOKA, Y. (2005). *Origin matters: Lessons from the search for the wild ancestor of maize*. *Breeding Science*, 55(4), 383-390.
35. MILLER, J.H.; JONES, N. 1995. *Organic and compost-based growing media for tree seedling nurseries*. *World Bank Tech. Pap. No. 264, Forestry Series*. Washington, DC: The World Bank. 75 p.
36. OLLE, M., NGOUAJIO, M., & SIOMOS, A. (2012). *Vegetable quality and productivity as influenced by growing medium: a review*.
37. Sánchez, B., Rasmussen, A., & Porter, J. R. (2014). Temperatures and the growth and development of maize and rice: a review. *Global change biology*, 20(2), 408-417.
38. USDA. (2024. október 24). *World Agricultural Production*. Forrás: <https://apps.fas.usda.gov/psdonline/circulars/production.pdf>
39. WILKERSON, D. 2011. *Texas greenhouse management handbook*. College Station, TX: Texas A&M University, Texas Cooperative Extension, Extension Horticulture. <http://aggie-horticulture.tamu.edu/greenhouse/nursery/guides/green/index.html>. (August 2011)
40. ZENG, L., & XING, D. (2005, FEBRUARY). *Alteration in delayed fluorescence characterize the effect of heat stress on plants*. In *Advanced Sensor Systems and Applications II* (Vol. 5634, pp. 649-656). SPIE.
41. LÁSZLÓ, R., JÁNOS, B., PÉTER, P., LÁSZLÓ, S., & VENETA, T. L. 1994. *Szántóföldi növénytermesztés*.

8. Köszönetnyilvánítás

Köszönettel tartozom konzulenseimnek, Dr. Hoffmann Richárd egyetemi docens úrnak és Dr. Jócsák Ildikó egyetemi adjunktus asszonynak, akikhez bátran fordulhattam kutatásommal kapcsolatos kérdéseimmel és kutatás során felhasználható ötleteimmel. Mindig segítségemre voltak, kijavítottak vagy megerősítettek, amikor erre szükség volt.

Köszönöm a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem Kaposvári Campusának, hogy biztosították számomra a megfelelő kutatási körülményeket.