



MATE NÖVÉNYTERMESZTÉSI-TUDOMÁNYOK INTÉZET

**LED megvilágítás spektrális összetételének hatása bordó levelű
saláta növények növekedésére és beltartalmi értékeire**

TDK dolgozat

Készítette: **Harsányi Ádám**
FSQ3NJ
Kertészmérnök alapképzés
nappali tagozat
Szent István Campus

Konzulens: Fóti Szilvia, egyetemi docens, MATE NTTI,
Növényélettan és Növényökológia Tanszék

**Gödöllő
2024.**

Tartalom

1	Bevezetés és célkitűzés	1
2	Irodalmi áttekintés	2
2.1	A saláta rendszertana, előfordulása, botanikai leírása.....	2
2.2	Salátatermesztés a világon és hazánkban.....	2
2.3	A saláta fontosabb beltartalmi értékei	3
2.4	Természetes és mesterséges fény	4
2.4.1	Fényintenzitás	4
2.4.2	A fény spektrális összetételének fontossága	5
2.4.3	Mesterséges megvilágítás	5
2.5	Vertikális farmok jelentősége.....	5
2.6	Fotoszintézis	6
2.6.1	A fotoszintézis szakaszai.....	7
2.6.2	A fotoszintézis színanyagai	7
2.6.3	Fluoreszcencia	9
2.6.4	Reflektancia	9
2.7	Fotoreceptorok	9
2.7.1	Fitokrómok.....	10
2.7.2	Kriptokrómok, fototropinok.....	10
3	Anyagok és módszerek	12
3.1	Növénynevelés.....	12
3.1.1	Első kísérlet.....	12
3.1.2	Második kísérlet.....	13
3.1.3	Választott fajta	13
3.2	Fénykezelés.....	13
3.3	Fényforrás	14

3.4	Mérések.....	15
3.4.1	Fotoszintézis	15
3.4.2	Fluoreszcencia	15
3.4.3	Reflektancia	15
3.4.4	Vegetációs indexek.....	16
3.4.5	Pigmenttartalom.....	17
3.4.6	Növekedés.....	17
3.4.7	Antioxidáns kapacitás	18
3.4.8	Ásványianyag tartalom	19
3.5	Adatfeldolgozás	19
4	Eredmények és értékelésük.....	20
4.1	Nettó fotoszintézis	20
4.2	Fluoreszcencia	20
4.3	Vegetációs indexek.....	21
4.4	Pigmenttartalom.....	23
4.5	SPAD.....	24
4.6	Levélfelület	26
4.7	Friss- és száraztömeg	28
4.8	Antioxidáns kapacitás	30
5	Összefoglalás	33
6	Irodalomjegyzék	35
7	Köszönetnyilvánítás.....	39

1 Bevezetés és célkitűzés

Ahogy a bolygónk népessége egyre nagyobb ütemben növekszik, úgy folyamatosan nő az élelmiszerigény is. Az előrejelzések alapján 2050-re 9,7 milliárd ember él majd a Földön, ami a jelenlegi 8,1 milliárdnál csaknem 20%-kal több. Jelenleg is probléma a világ sok területén, hogy nem jutnak az emberek minőségi, vagy akár semmilyen élelmiszerhez, így a napjainkban alkalmazott termelési rendszerek nem fogják tudni kielégíteni a jövőbeni igényeket.

Nehezíti az agrárium feladatát az a tény, hogy limitált mennyiségben áll csak rendelkezésünkre víz, tápanyag, illetve termékeny talaj. Fontos tehát, hogy ezeket a forrásokat megfelelően használjuk fel, amit a gyakorlatban a precíziós gazdálkodás tesz lehetővé.

Kutatások igazolták, hogy zárt, vertikális farmokban saláta termesztés esetén hatékonyabb volt a terület, víz és tápanyagkihasználás, mint üvegházi termesztés során. A gyakorlatban jelenleg főleg levélzöldségek és néhány fűszernövény esetén használják a vertikális farmokat, mint precíziós rendszert, azonban még sok lehetőséget rejthetnek magukban. Az ilyen zárt rendszerekben szinte minden paraméter, a megvilágítás intenzitása és spektrális összetétele, a tápanyagellátottság és a klíma is szabályozható, valamint minimalizálható az abiotikus és biotikus stressz, így megteremtve a növényeknek a leghatékonyabb körülményeket.

A kísérletemet, melyben a fény fotoszintetikus teljesítményre, valamint növekedésre és fejlődésre kifejtett hatását szabályozható és költséghatékony LED-ek különböző fényreceptjeivel vizsgáltam, salátanövényeken végeztem el, amit azért gondolok jó döntésnek, mert a jelenleg is üzemelő vertikális farmok nagy része ezzel a növényvel dolgozik. A célkitűzésem az volt, hogy különböző fényprogram alatt nevelt saláták biomasszáját és beltartalmi mutatóit hasonlítsam össze, az eredmények alapján pedig következtetést vonjak le arra vonatkozóan, hogy hogyan lehet gazdaságosan termelni olyan salátát, amely a fogyasztói oldalt is figyelembe véve, magas beltartalmi mutatókkal rendelkezik.

2 Irodalmi áttekintés

2.1 A saláta rendszertana, előfordulása, botanikai leírása

A saláta (*Lactuca sativa* L.) vagy kerti saláta, mint faj, a Fészekvirágzatúak (*Asteraceae*) családjába tartozó *Lactuca* L. genusba tartozik, amely a *Magnoliophyta* törzs, *Rosophytina* altörzs, *Rosopsida* osztály, *Asteridae* alosztály, *Asterales* rend tagja. A géncentruma a mediterrán térségben található (Durazzo et al., 2014). A *Lactuca Sativa* régóta termesztésben van, így a morfológiai variabilitása igen nagy.

A faj vékony karógyökeret nevel, szára elérheti akár az egy métert is, de jellemzően 30-40 cm. A szár egyenesen, felfele törő, felsőbb részein elágazó. Az egyszerű levelek spirálisan helyezkednek el, tömött rozettát alkotva. Amikor a növény magszárat fejleszt, a rozetta tömörsége megszűnik. A levelek formája lehet hosszúkás, tojásdad, illetve akár háromszög alapú is. A tagoltsága szintén széles skálán mozog, minden típus előfordul a teljesen tagolatlanról a szeldeltig. A levelek széle általában fodros vagy fogazott, de lehet ép. A száron feljebb található levelek mérete és formája eltér a rozettában találhatóéktól. A szár végén sárga nyelvess virágok fejlődnek, amelyek buga virágzatba rendeződnek. Termése bóbítás kaszat, magja lapított, megnyúlt. Ezermagtömege 0,8-1,2g, csírázókéességét 4-5 évig őrzi meg (Boros 2021).

2.2 Salátatermesztés a világon és hazánkban

A FAOSTAT által közölt adatok alapján salátából és cikóriából 2022-ben 27,15 millió tonnát termeltek, 1,24 millió hektáron. Ennek a legnagyobb részét Ázsia teszi ki (63,5%), a második Észak- és Dél-Amerika (20,3%), a harmadik pedig Európa (13,8%). Az országok közül messze Kína a legjelentősebb termelő, ahol a fent említett két növényből együtt 14,98 millió tonnát állítottak elő 2022-ben ([http1](#)).

Magyarországon 2022-ben 8900 tonna fejes salátát állítottak elő szabadföldön a KSH adatai szerint ([http2](#)). Hazánkban több termesztéstechnológiai változatról beszélhetünk, amelyek eltérését a szaporítási mód, a vetés ideje, illetve a termesztés helye (szabadföld, hajtás) adja. A vetésidő tekintetében létezik tavaszi, nyári, őszi, illetve áttelelő saláta is. Hajtásban hazánkban a legfontosabb hidegtűrő zöldségnövényünk (Terbe & Ombódi, 2019).

2.3 A saláta fontosabb beltartalmi értékei

A saláta fogyasztása világszerte folyamatosan növekszik, ami elsősorban az egyre tudatosabb táplálkozási szokások elterjedésének tudható be (Ouzounis et al., 2015). Sokszor illesztik be diétás étrendekbe, mivel alacsony a kalória-, zsír- és nátrium tartalma, viszont sok benne a rost és a folsav. A zöld és bordó típusoknak is magas az antioxidáns tartalma, ami szoros összefüggésben van a levelek pigmenttartalmával (Kim et al., 2016). Az antioxidánsok olyan anyagok, amelyek reakcióba lépnek egy szabad gyökkel, vagy más mechanizmus révén semlegesítik azt, ezzel megakadályozva a sejtek és szövetek oxidatív károsodását (Johnson et al., 2003).

A legtöbb saláta fajta β -karotin, lutein, zeaxantin és klorofill pigmenteket tartalmaz, a bordó levelű fajták pedig ezeken kívül antociánokat is. A β -karotin a legfontosabb A-vitamin prekursor. Több tanulmányban leírták, hogy a karotinoidok csökkentik az olyan krónikus betegségek kialakulásának kockázatát, mint például a szív- és érrendszeri megbetegedések és a szürkehályog. A lutein és a zeaxantin több klinikai vizsgálat összesített elemzése szerint jelentősen csökkenti az időskori szürkehályog kialakulásának kockázatát (Csupor, 2020). Valamennyi karotinoid ezek mellett antioxidáns hatású molekula is. A klorofill élettani hatásáról még nincs sok kutatási eredmény, azonban a legújabb megfigyelések alapján szintén rákmegelőző hatást tulajdonítottak neki. A bordó levelű fajták antocianin tartalma elsősorban az antioxidáns hatása miatt előnyös és ismert, azonban áfonyával kapcsolatos kutatásokban kimutatták, hogy megelőző hatása van az öregedéssel járó agyműködéssel kapcsolatos betegségek terén is (Hedges & Lister, 2005).

A fenolos vegyületek nagyon hatékony gyökfogók, illetve fémkelátorok. Ezek a vegyületek könnyen semlegesítik a prooxidáns fémionokat, így megelőzhetik vagy késleltethetik a fémionok által kiváltott lipid-peroxidációt, ezzel pedig a szabadgyökök képződését mérséklék (Shahidi & Zhong, 2015).

Az egyik legismertebb antioxidáns a C-vitamin, amely a citrusféléken és a paprikán kívül egyes salátafajtákban is jelentős mennyiségben van jelen. Világszerte végzett tanulmányok vizsgálták a vérben lévő C-vitamin koncentráció és a szív- és érrendszeri betegségek kockázata közötti összefüggést. Egy kutatás szerint (Singh et al., 1995) azoknál az indiai alanyoknál, akik esetében a kísérletben a legmagasabb volt a vérplazma C-vitamin koncentrációja, a koszorúérbetegség kockázata kétszer kisebb volt. Egy másik kutatás alapján azt állapították meg, hogy 8 $\mu\text{mol/L}$ vérplazma C-vitamin koncentráció esetében a 12 $\mu\text{mol/L}$ -hez képest körülbelül 30 százalékkal csökkent a sztrókból származó halálozás (Johnson et al., 2003).

Az egyes salátatípusok ásványianyag-tartalma nagyon eltérő lehet. Ez elsősorban a termesztett fajtától függ, de befolyásolják a termesztési körülmények is, illetve a saláta fenológiai fázisa is befolyásolja (Pinto et al., 2014).

A jég-, vajfej-, római, zöld és bordó levelű saláták nátrium tartalma relatíve alacsony, így nem fedezi a szükséges napi bevitelt. A salátafélék kálium-tartalma hozzájárul a vérnyomás csökkentéséhez, a zöld- és bordólevelű fajták egyaránt jó forrásai lehetnek. Kalciumból a jégсалáta típusok tartalmazzák a legtöbbet. A csontok egészségének megőrzéséhez a kalciumon kívül a foszfor és a magnézium járul hozzá, amelyek tartalma azonban salátákban relatíve alacsony. A vas fontos szerepet játszik a hemoglobin képződésében és az oxigén transzportban. Vasból a vajfej és bordó levelű típusok tartalmazzák a legnagyobb mennyiséget (Kim et al., 2016).

2.4 Természetes és mesterséges fény

Az intenzív kertészeti termelés során gyakran korlátozzák a termésmennyiséget a fényviszonyok. Ahhoz, hogy a növény terméspotenciálját jobban ki tudjuk használni, a megvilágítást a növények igényeihez kell igazítani. A megvilágítottságnak a legfontosabb paraméterei a fény intenzitása, illetve a fény spektrális összetétele (Hemming, 2009).

2.4.1 Fényintenzitás

A magasabb szélességi fokokon nagy termésvesztést tud okozni az alacsony megvilágítottság. Az ilyen területeken úgy tartják, hogy 1% fény 0,5-1% termést jelent, ezért folyamatosan a technológiai fejlesztések az üvegházak fényáteresztése terén. A fény kihasználásában nemcsak az üveg tulajdonságai és minősége játszik szerepet, hanem egyes modern fényvisszaverődést gátló bevonatok is az üvegen. További 3% fény nyerhető, ha a növények feletti szerkezeti elemeket a szükséges minimumra csökkentik, illetve a tető szögállása is optimális.

Az üvegházba bejutó fényintenzitáson kívül fontos tényező a termesztett növény fényhasznosítási hatékonysága. Ez a paraméter növelhető a növény genotípusának helyes megválasztásával, illetve a termesztési körülmények optimalizálásával. Nagyban befolyásolja például a fényhasznosítást a levélfelület index (LAI) és zárt termesztőberendezésben a széndioxid koncentráció (Hemming, 2009).

2.4.2 A fény spektrális összetételének fontossága

A fényintenzitáson kívül nagy jelentősége van a növényeket érő fény spektrális összetételének is. A különböző spektrumok élettani hatásai már régóta ismertek, azonban további kutatások szükségesek a témában, mivel akár minden egyes növényfaj esetében más fényprogrammal lehet elérni az optimális termésmennyiséget, illetve minőséget.

A fényspektrum befolyásolható különböző műanyag fóliákkal, illetve hálókkel. Például egy kísérletben azt tapasztalták, hogy ahol különböző paprika fajták esetében hagyományos fekete árnyékolóhálók helyett pirosat, sárgát, vagy gyöngyházszínűt használtak, ott azonos fényintenzitás mellett a termés 15-40%-kal több volt (Shahak et al., 2009).

2.4.3 Mesterséges megvilágítás

Abban az esetben, ha a növényeket érő fény intenzitása túl kevés, van lehetőség kiegészítő megvilágítás alkalmazására. A hagyományos módon a pótmegvilágítás nagynyomású nátriumlámpákkal történik. Széleskörben használják a kertészetben, mert a folyamatos fejlesztéseknek köszönhetően egyre jobb spektrum érhető el velük, illetve a költséghatékonyság terén is javulás figyelhető meg.

Egy másik lehetőség a növények megvilágítására a LED-ek (light-emitting diode) használata. Ezeket a lámpákat elsősorban a teljesen zárt termesztőberendezésekben használják, de vannak kísérletek üvegházakban történő használatukra is pótmegvilágítás céljából. Egyik nagy előnyük a nátriumlámpákkal szemben, hogy kevés hőt termelnek, így közel lehet tenni a lámpatesteket a növényekhez. A LED-ek megjelenése lehetőséget adott arra, hogy ne csak a fény intenzitását lehessen programozni, hanem igény szerint a fényspektrumot is, ami hatékonyabb termesztést tesz elérhetővé (Hemming, 2009).

A fény spektrális összetételének megváltoztatása pozitívan hathat a növények növekedésére. A különböző hullámhosszúságú fények befolyásolják a fitokrómok működését, amelyeknek pedig különböző hatása van az élettani folyamatokra. Ez a szabályozhatóság lehetőséget ad arra, hogy akár a növények egyes fenológiai fázisaihoz optimalizáljuk a fény összetételét (Ouzounis et al., 2015).

2.5 Vertikális farmok jelentősége

A vertikális farmok a kertészeti ágazatban az egyik legjelentősebb megjelenési formája a precíziós gazdálkodásnak. Az ilyen zárt rendszerekben szinte minden paraméter szabályozható, így megteremtve a növényeknek a legoptimálisabb körülményeket. Az egyik legnagyobb

előnye egy ilyen gazdálkodási formának, hogy a klíma szabályozhatóságával, illetve a biotikus stresszorok kizárásával a termelési kockázat minimálisra csökkenthető. A kiszámíthatóságon kívül előnye még a vertikális farmoknak, hogy az év bármely időszakában lehet termelni bennük, így folyamatosan friss árut biztosítva. Mivel ilyen módon a termelés szinte bárhol folytatható, így a szállítási láncok rövidebbek, ami egyrészt a költséghatékonyság miatt fontos, másrészt környezetvédelmi szempontból. A termelés körülményei miatt kevesebb inputanyagra van szükség, illetve a fenntarthatóságot még növeli, ha a farm működtetéséhez szükséges energia valamilyen megújuló forrásból származik (Ratkóczy et al., 2023).

Szabadföldi termelés során számos vírusnak, baktériumnak és kártevőnek van kitéve a növény, amik hatására sokszor jelentős termés kiesés lehet. Egy jól megtervezett beltéri növénytermesztő létesítményben azonban ezek a veszteségek minimalizálhatóak, vagy akár teljesen kizárhatóak. Megfelelő tervezéssel és odafigyeléssel ez növényvédőszer nélkül kivitelezhető a gyakorlatban. Amennyiben valamilyen okból kifolyólag mégis fertőzés lép fel, a gazdálkodó gyorsan ki tudja üríteni a létesítményt, fertőtleníteni, majd akár pár héttel a probléma fellépése után már ismét használható a vertikális farm. Ezzel szemben, ha szabadföldön történik a fertőzés, a gazdálkodónak sokkal több időre van szüksége, hogy elvégezhesse az újratevést (Despommier, 2013).

Szinte bármilyen növényt lehet termesztetni vertikális farmokon, azonban gazdaságilag csak néhány kultúra esetében lesz kifizetődő ez a termelési rendszer. Gyümölcstermesztésben, illetve szántóföldi kultúrák esetében tehát a jövőben sem jelent megoldást a vertikális farmokban történő élelmiszertermelés. Egy másik hátránya ennek a termelési koncepciónak, hogy az indításnál nagyon magas a tőkeigénye (Török, 2023).

2.6 Fotoszintézis

A fotoszintézis során a fotoautotróf szervezetek a fényenergiát kémiai energiává alakítják át, ezzel biztosítva az egész földi élővilág számára szükséges energiát. A fotoszintetizáló szervezetek a légkörben található szén-dioxidból hatalmas mennyiségű szén képesek megkötni, az így felszabaduló oxigén pedig szintén alapja a földi életnek.

Tudományos megfogalmazásban a fotoszintézis olyan redox folyamat, amely során egy elektrondonorról úgy jut át az elektron egy elektronakceptorra, hogy a két redoxtag közötti redoxpotenciál különbség legyőzéséhez szükséges energiát a fény szolgáltatja. Legtöbb esetben ez az elektrondonor a víz, az elektronakceptor pedig a szén-dioxid. A fotoszintézis során 12 víz

molekula bomlik el, és 6 molekula szén-dioxid redukálódik, aminek eredményeképpen hexóz, 6 molekula oxigén és 6 molekula víz képződik (Tuba & Csintalan, 2009).

Fotoszintetikusan aktív sugárzásnak a 400-700nm közötti tartományt szoktuk nevezni, viszont a növények, ugyan kisebb mértékben, de szintén elnyelnek ennél hosszabb és rövidebb hullámhosszúságú sugárzást is. Több kutatásban is igazolták, hogy a távoli vörös (700-800nm) fény kiegészítés mellett nevelt növények nagyobbak lettek, illetve a mért nettó fotoszintézisük is magasabb volt azoknál a növényeknél, amelyek nem kaptak távoli vörös kiegészítést (Zhen & Bugbee, 2020). Egy kísérletben salátanövényeket neveltek távoli vörös fény kiegészítés mellett és a levelek hosszúságát és szélességét vizsgálták (Legendre & van Iersel, 2021). A betakarítást két időpontban végezték, egyszer a csírázástól számított 16. napon, egyszer pedig a csírázástól számított 25. napon. Az eredmények azt mutatták, hogy a korai betakarítás során a növények levele átlagosan egy $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ távoli vörös fénytől 0,99 mm-el hosszabbak és 0,75 mm-el szélesebbek voltak, a késői betakarítás során pedig 1,1 mm volt a különbség a levelek hosszában és 0,83 mm a levelek szélességében.

2.6.1 A fotoszintézis szakaszai

A fotoszintézist három szakaszra oszthatjuk fel, a fényszakaszra, a CO_2 -redukciós szakaszra, illetve az úgynevezett diffúziós folyamatok szakaszára. A fényszakaszban történik a fényenergia elnyelése, és a fényenergia kémiai energiává történő átalakítása. Ebben a szakaszban képződik a NADPH, és az ATP, és itt történik a víznek a bontása is. Ezek a fotokémiai folyamatok lineáris összefüggésben vannak a fény intenzitásával.

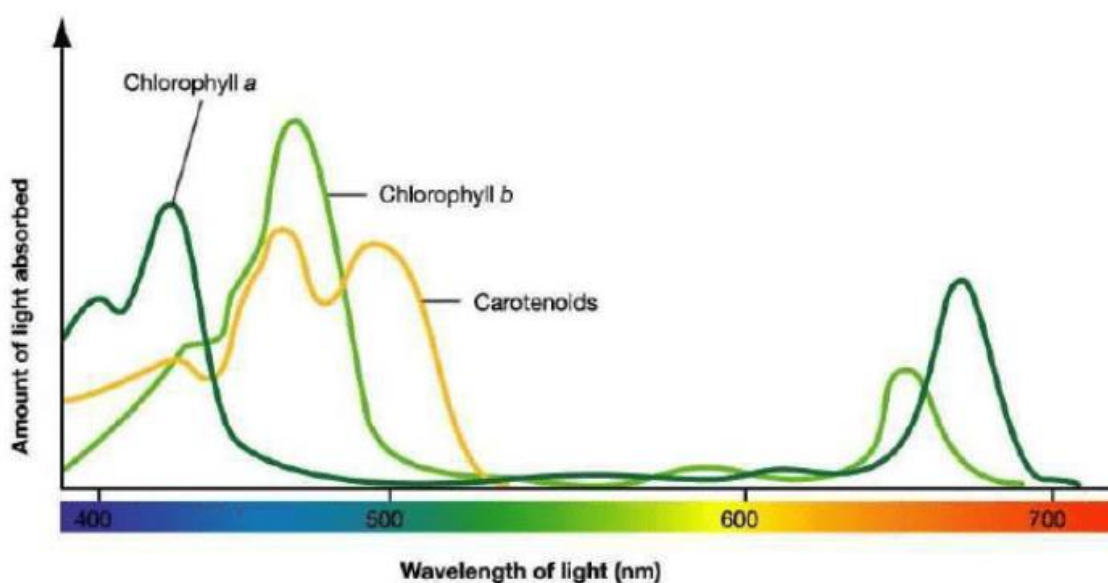
A CO_2 -redukciós szakaszban a szén-dioxid fixációja és redukciója megy végbe, a fényszakaszban képződött ATP és NADPH segítségével. Ugyan ennek a folyamatnak a lefolyásához nincs szükség fényre, mégis nappal történik, mert az ATP és a NADPH is a fényszakaszban termelődik, illetve a folyamatokat szabályozó enzimek jó része is fényen aktív (Tuba & Csintalan, 2009).

A diffúziós folyamatok szakaszában történik a fotoszintézishez szükséges szén-dioxid felvétele és a termelődő oxigén leadása. Ez a szakasz tehát a gázcseréért felelős, ami a kloroplasztiszok és a környező légtér között megy végbe (Tuba & Csintalan, 2009).

2.6.2 A fotoszintézis színanyagai

Fotoszintetikus pigmenteknek azokat a színanyagokat nevezzük, amelyek a fényenergia megkötéséért felelősek. Magasabbrendű növényekben két nagy csoport, a klorofillok és a karotinoidok találhatók meg.

A klorofilok alapszerkezete négy pirrolgyűrűből álló Mg-dihidroporfirin alapváz, illetve az azt észterező fitollánc. A klorofilok bioszintézise a δ -amino-levulinsavból indul ki, amelyből először tetrapirrolváz jön létre, majd ezt követően Mg^{2+} kerül a vázba. Így kialakul a protoporfirin, majd a protoklorofilid, a klorofilid és a legvégén a klorofil molekula. A magasabbrendű zöld növények kloroplasztiszából klorofil-a és klorofil-b vonható ki, amelyek abszorpciós maximuma két csúcsú, és kissé eltérő (1. ábra). Mindkét pigment a látható fény tartományából a kék és a vörös sávokban abszorbeál legnagyobb mértékben.



1. ábra: A klorofil-a, klorofil-b és karotinoidok abszorpciós spektruma.
(www.cfb.unh.edu)

A karotinoidok sárga színű, erősen telítetlen izoprén származékok, szintézisük a citoplazmában és a plastiszokban történik. Minden fotoszintézisre képes szervezetben megtalálható fotoszintetikus pigmentek. Kiinduló vegyületük a mevalonsav, amely először izopentenil pirofoszfáttá, majd 20 szénatomos geranil-geranil-pirofoszfáttá alakul át. Ennek megkettőződésével először a karotinoidok alapváza jön létre, majd utána a különböző karotinoidok. Az egyik csoportjuk az oxigént nem tartalmazó karotinok, amelyek közül a fotoszintézis szempontjából a béta-karotin a legfontosabb. A másik csoportba az oxigént tartalmazó xantofilok tartoznak, amelyek közül a legfontosabbak a lutein, zeaxantin, violaxantin, anteraxantin és neoxantin. Elnyelési maximumuk 400-500 nm hullámhossz közé esik (1. ábra) (Tuba & Csintalan, 2009).

2.6.3 Fluoreszcencia

A különböző fotoszintetikus rendszerek vizsgálatának egyik lehetséges módja az egyes gerjesztési protokollok melletti fluoreszcencia válaszjelek mérése. Az ilyen válaszjelek segítségével különböző arányszámok segítségével lehetőség van a fotokémiai és nem fotokémiai kvantumhatásfokok becslésére (Lenk et al., 2021).

Klorofill fluoreszcenciának lényegében azoknak a fotonoknak az összességét nevezzük, amelyeket a klorofill pigmentek bocsátanak ki néhány nanoszekundummal a beérkező fény elnyelése után (Porcar-Castell et al., 2014). A klorofill fluoreszcencia mérése pontos képet adhat a növény egészségi állapotáról, mivel az csak zöld, fotoszintetikusan aktív növényi pigmentből származhat. Az ilyen fluoreszcencia alapú légi távérzékelés lehetővé teszi, hogy felmérjük a vízi és szárazföldi növényzet állapotát és produkcióját (Tuba & Csintalan, 2009).

A fotoszintézisben nem hasznosuló, de ugyanakkor nem is fény formájában kibocsátott energia még hő formájában távozhat a gerjesztett molekulákból. A hődisszipáció mértéke szintén árulkodik a növény pigmentálságáról és egészségi állapotáról.

2.6.4 Reflektancia

A levélben található pigmentek különböző mennyiségben nyelik el a beérkező fényt az egyes hullámhosszokon. A pigmentek befolyásolják azt is, hogy a növényről mennyi és milyen hullámhosszúságú fény verődik vissza. Zöld növények esetében 550nm-en a legmagasabb a reflektancia, mivel a fotoszintetikusan aktív pigmentek fényelnyelése ezen a hullámhosszon a legalacsonyabb. A látható fénytartományban mért reflektancia adatok tehát jó mutatói a klorofill- és karotinoid-tartalomnak (Schepers et al., 1996).

A növények reflektancia méréseit elsősorban a stresszhelyzet felmérésére használják a mezőgazdaságban. Az egészséges növények jellemző reflektancia értékekkel rendelkeznek a 400-900nm-es tartományban, azonban, ha valamilyen stressz éri őket, akkor az 500 és 650nm közötti reflektancia mértéke megnövekszik, a közeli infravörös körüli érték (800nm) pedig jelentősen lecsökken (Tuba & Csintalan, 2009). A növény állapotának jellemzésére épp ezért jól felhasználhatók a reflektancia adatokból számított vegetációs indexek.

2.7 Fotoreceptorok

A programozható LED lámpák lehetővé teszik, hogy a növényeket érő fény összetételét mi magunk állítsuk be. A fény különböző hullámhosszaival más-más élettani folyamatok befolyásolhatóak (Legendre & van Iersel, 2021).

A növények számára a fény nem csak a fotoszintézis miatt fontos, hanem információkat is hordoz. Ezeknek az információknak a feldolgozását a fotoreceptorok végzik. Sok tulajdonságát érzékelik a beérkező fénynek, mint amilyen például az intenzitása, iránya, vagy a periodikus változása. A fotoreceptorok egy hosszú jelátviteli rendszer első elemei és végeredményében hatással vannak a növény fejlődésére, alkalmazkodására (Nagy, 2019). A LED-ek használatával így lehetőségünk van a növény növekedési és fejlődési folyamatainak manipulálására adott növényi tulajdonságok elérése céljából.

2.7.1 Fitokrómok

A növényt érő fény legnagyobb mértékben a vörös és kék tartományban hasznosul, a zöld fény nagyrésze visszaverődik, a távoli vörös pedig áthatol a levélen. A fitokróm fotoreceptorok segítségével a növény érzékelni tudja a beérkező fényben lévő vörös és távoli vörös arányát, így pedig információt nyer a környezetében élő versenytársairól (Nagy, 2019).

Egy kutatás szerint (Borthwick et al., 1944) a vörös fény elősegítette a csírázást saláta növények esetében, míg a távoli vörös gátolta azt. Ha váltottak a fényprogramok között, akkor mindig a növényeket ért utolsó fény váltotta ki a hatását. Ez azt bizonyítja, hogy a fitokrómok fényfüggő módon ki-be kapcsolhatóak.

A fitokrómoknak két típusa ismert, a Pr forma, amelynek az abszorpciós maximuma a vörös tartományba esik és a Pfr forma, aminek az abszorpciós maximuma a távoli vörösben van. A Pr forma vörös fény hatására kromofór izomeráción megy keresztül, aminek eredményeként létrejön a Pft forma. A Pfr forma távoli vörös tartományba eső fotont elnyelve visszaalakul Pr formába, így tehát egyensúlyi reakció alakul ki, amiben a két forma aránya a fény hullámhosszösszetételétől függ. A fitokrómok fiziológiailag aktív formája a Pfr forma, ebben az állapotban elősegítik a fotoszintetizáló apparátus fejlődését és a fotoszintetikus pigmentek szintézisét (Nagy, 2019).

A fitokrómoknak közvetett vagy közvetlen hatása van a levelek alvó mozgásának kiváltásában hüvelyesek esetében, a virágindukcióban és a magvak csírázásában (Allaga & Bódis, 2014).

2.7.2 Kriptokrómok, fototropinok

A kriptokrómok az UV-A (320-400 nm) és a kék fény érzékeléséért felelős receptorok. Fontos szerepet játszanak a fitokrómokhoz hasonlóan a növekedési folyamatok szabályozásában, pl. a hipokotil megnyúlásának gátlásában, illetve pl. a virágzás szabályozásában és a cirkadián óra beállításának folyamataiban.

A fototropinok szintén a kék fény érzékeléséért felelős fotoreceptorok. Ezeknek a szerepe, hogy a hajtást a fény irányába fordítsák, míg a gyökeret a fényforrással ellenkező irányba (pozitív és negatív fototropizmus). A fototropinok közvetítik a sztóma zárósejtek kék fényre történő nyitódását és szabályozzák a kloroplasztiszok sejten belüli elrendeződését az optimális fénybegyűjtés érdekében (Nagy, 2019).

3 Anyagok és módszerek

3.1 Növénynevelés

3.1.1 Első kísérlet

Az első kísérlet során a növények csíráztatását egy tálcán, vízzel átitatott gézen végeztük (1. fénykép), és a lomblevelek megjelenéséig desztillált vízzel történt az öntözésük. A lombleveles állapotot követően az öntözővizet tápoldattal egészítettük ki. Amikor a palánták elérték a négy lombleveles állapotot, átültettük őket hármasával egy edénybe és növénynevelő fénycsövek alá helyeztük őket. A növénynevelés során nem használtunk termesztőközeget, a salátákat egy gézzel rögzítettük az edények kupakján található lyukakba. Öntözéshez a Hoagland tápoldat egy módosított receptjét használtuk, mert egy kutatás szerint (Sapkota et al., 2019) ezekkel a változtatásokkal optimálisabb a saláták számára az összetétel. Az eredeti és a módosított receptet az 1. táblázat tartalmazza, a Mg kivételével minden felsorolt ásványi anyagból nagyobb mennyiséget biztosítottunk a saláták számára, mint amit az eredeti recept előír. Az ültetés után három héttel a saláták szétültetésre kerültek, majd két csoportra osztottam őket és megkezdődött a fénykezelés, illetve az adatgyűjtés.



1. fénykép: Csíráztatás vízzel átitatott gézen, tálcában

1. táblázat: Az eredeti Hoagland tápoldat és a módosított receptje

Tápoldat	Hoagland	Módosított
N	210 ppm	250 ppm
K	235 ppm	300 ppm
Ca	200 ppm	250 ppm
P	31 ppm	56 ppm
B	0.11 ppm	0.4 ppm
Zn	0.023 ppm	0.35 ppm
Mg	48.6 ppm	45 ppm

3.1.2 Második kísérlet

A második kísérlet során a csíráztatás és ültetés ugyanúgy történt, mint az első kísérletben és a növényeket szintén módosított Hoagland tápoldatban neveltük. Ebben sorozatban azonban a saláták az ültetést követően egyből különböző fény alá kerültek. A növénynevelés során nem volt megfelelő a hőmérséklet és a meleg miatt magszárbba mentek a növények, ezért csak néhány, élettani mérést tudtunk rajtuk elvégezni és szükségessé vált a kísérlet ismétlése.

Az ismétlésben a fentiekhez hasonlóan indított palántanevelés után a Szent István Campus területén növénynevelő konténerbe kerültek a saláták, amelyben szabályozható volt a hőmérséklet.

3.1.3 Választott fajta

Az első kísérleti sorozat során két fajtaival dolgoztam, a Great Lakes-el és a Lollo Rossa-val. Mindkét fajta fodros levelű, nem fejesedő, a Great Lakes zöld, míg a Lollo Rossa egy bordó típus. A második sorozatban csak a Lollo Rossa fajtát tartottam meg, mert az első kísérlet eredményei alapján ezt találtam érdekesebbnek tovább vizsgálni. A második kísérlet ismétlésében a Rijk Zwaan drázsírozott vetőmagját használtam, hogy a csírázás egységesebb legyen. Ez a vetőmag a Lollo fajta típusba sorolt Canelian RZ (85-585).

3.2 Fénykezelés

Az első kutatás során a bordó és a zöld saláták is két részre lettek osztva és két fénykezelés volt, így összesen négy csoportot vizsgáltam. A két fénybeállítás közötti különbséget az adta, hogy az egyik fényreceptbe távoli vörös kiegészítés is került a vörös, zöld és kék mellett. A fényintenzitás így különböző volt a két beállításnál, a távoli vörös nélküli csoportban 225 μmol

$\text{m}^{-2} \text{s}^{-1}$, távoli vörös kiegészítéssel pedig $297 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$. A kísérlet során 12 órás napi megvilágítást alkalmaztunk.

A második kutatás során szintén két csoport volt fényrecept szerint. Itt a fényreceptek különbségét az eltérő vörös-kék arány jelentette, ami az egyik esetben 1:1, a másikban 1:5 volt. Megtartottuk a távoli vörös kiegészítést, mert az első kísérlet eredményei alapján pozitív hatással volt az antioxidáns kapacitására a bordó levelű saláták esetében, illetve a biomassza is nagyobb volt. A zöld sávban is volt besugárzás, ami hasonlóan az FR-sávhoz, egyforma mennyiségű fotonnal látta el a növényeket. A pontos fénybeállítások paramétereit a 2. táblázat tartalmazza, itt látható, hogy a beállított eltérő sáv-arányok a vörös és kék fotonok mennyiségére is hatással voltak a két kezelésben. Ebben az esetben is 12 órás megvilágítást kaptak a növények.

2. táblázat: A kísérletekben alkalmazott fénybeállítások ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)

Kísérlet	1. kísérlet		2. kísérlet	
Kezelés	1. kezelés	2. kezelés	1. kezelés	2. kezelés
Fényintenzitás	225	296	268 ± 16	277 ± 15
R	77	77	129 ± 8	198 ± 13
G	78	78	37 ± 2	36 ± 2
B	70	70	103 ± 7	43 ± 2
FR	0	71	73 ± 5	70 ± 5
Fényrecept		+FR	R:B=1:1	R:B=5:1

3.3 Fényforrás

Az első kísérletben és a második kísérlet első sorozatában a LEDIUM Kft. Multispektrum LED világító paneleit használtuk. Ezek a panelek öt csatornával rendelkeznek (365nm, 450nm, 520nm, 660nm, 730nm), amelyekből szoftveresen be lehet állítani a kívánt fényreceptet.

3.4 Mérések

Mindkét kísérlet során a 4-6 lomblevelű állapottól hetente készítettem fényképet a növényekről, hogy a növekedésüket nyomon tudjam követni. Növényélettani méréseket 2 alkalommal végeztünk a kísérletek során, illetve a második kísérlet első sorozatán csak egyszer tudtunk mérni a növényeken, a kedvezőtlen körülmények miatt.

3.4.1 Fotoszintézis

A fotoszintézis mérésére infravörös gázanalizátoros módszert használtunk (CIRAS-2, PPSsystems, UK). A módszerrel nettó fotoszintézis mérhető, mivel a CO₂ mennyiségének változását zárt kamrában méri a műszer, így a változáshoz a növényi légzés, fotorespiráció is hozzájárul. A mérések során a növényeket érő fény intenzitását a növénynevelés során alkalmazott intenzitásnak megfelelően állítottuk be. Miután a levél bekerült a kamrába, megvártam, hogy a fotoszintézis stabilizálódjon és háromszor rögzítettem adatot, amiknek az átlagával számoltam.

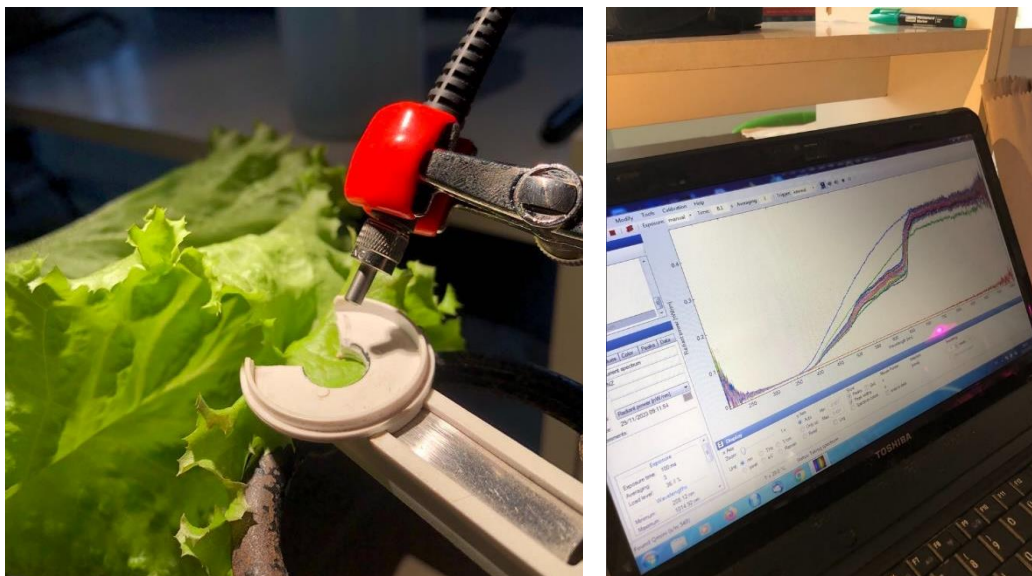
3.4.2 Fluoreszcencia

A fluoreszcencia mérésekhez az FMS-2 műszert (Hansatech, Németország) használtuk. A mérést 15 percig sötétadaptált levélen végeztük, amikor a klorofill-a fluoreszcencia indukciójának gyors szakaszában meghatározható a fluoreszcencia alap (F_0) és maximális (F_m) értéke. A változó (F_v) és a maximális fluoreszcencia aránya megmutatja a PSII reakciócentrumok maximális kvantumhatékonyágát, amit az $F_v/F_m = (F_m - F_0)/F_m$ formulával jellemeztük. A teljes program, amelynek során a fluoreszcencia kinetikát rögzítettük az F_s érték (steady-state fluoreszcencia) eléréséig, majd az azt követő újabb telítési fényimpulzusok kiváltásáig tartott (4 perc). A FiPS2 már ezen további paramétereken alapulva jellemzi a kettes fotokémiai rendszer hatékonyságát, az abszorbeált és a fotokémiai reakcióban hasznosult fotonok arányát. Az Rfd a fluoreszcencia csökkenésének a mértékét adja meg, ami korrelál a levelek nettó fotoszintézisével. Az NPQ egy származtatott index, ami különböző stresszállapotra utalhat, a fölös gerjesztési energia hő formájában történő leadásával kapcsolatos. (Lichtenthaler & Babani, 2007).

3.4.3 Reflektancia

A reflektancia mérést Qmini spektrométerrel (RGBPhotonics, Németország, 2. fénykép) végeztem, az adatok rögzítéséhez (250-1050 nm-es tartományban, 0,3 nm-es felbontásban)

pedig a Waves nevű programot használtam (3. fénykép). Minden növény esetén három különböző, teljesen kifejtett levélen végeztem a mérést, illetve rögzítettem egy teljesen sötét és egy fehér felületről visszaverődő spektrumot is a kalibráláshoz. A mért hullámhosszokból különböző vegetációs indexeket számoltunk, mint például az MCARI2, SIPI, PRI, MTCI.



2-3. fénykép: Reflektancia mérése Qmini spektrométerrel és Waves programmal

3.4.4 Vegetációs indexek

A saláták adott hullámhosszon mért reflektanciájából (ld. ρ_{nm} az alábbi egyenletekben) különböző vegetációs indexeket számoltunk, amelyekből jellemzően különböző pigmentek tartalma állapítható meg (http3).

MCARI2 (Modified Chlorophyll Absorption Ratio Index Improved): a klorofill tartalomra érzékeny index.

$$MCARI2 = \frac{1.5[2.5(\rho_{800} - \rho_{670}) - 1.3(\rho_{800} - \rho_{550})]}{\sqrt{(2 * \rho_{800} + 1)^2 - (6 * \rho_{800} - 5 * \sqrt{\rho_{670}}) - 0.5}}$$

PRI (Photochemical Reflectance Index): karotinoid tartalomra, azon belül is elsősorban a xantofilok mennyiségére érzékeny index, a fotoszintetikus hatékonysággal és a hődisszipáció mértékével van összefüggésben.

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

SIPI (Structure Insensitive Pigment Index): karotinoid tartalom, azon belül is az α - és β -karotin zöld pigmentekhez viszonyított arányát fejezi ki.

$$SIP1 = \frac{\rho_{800} - \rho_{445}}{\rho_{800} - \rho_{680}}$$

ARI1 (Anthocyanin Reflectance Index 1): a levelek antocián tartalmára érzékeny index. Antocián-felhalmozódás a stresszre adott válasz következménye is lehet.

$$ARI1 = \frac{1}{\rho_{550}} - \frac{1}{\rho_{700}}$$

3.4.5 Pigmenttartalom

A fotoszintetikusan aktív pigmenttartalom megméréséhez a salátákból dugófúróval korongokat vágtam ki, majd kvarchomokkal, acetonnal és 0,1 g kalcium karbonáttal eldörzsöltem. A mintákat 2 ml-es Eppendorf csövekbe helyeztük, majd 5 percig 10000-es fordulatszámon, 4°C-on centrifugáltuk. A lecentrifugált oldatból 1,2 ml-t szűkített küvettába pipettáztunk és elvégeztük a mérést. Referencia folyadéknak tiszta acetont használtunk. Az abszorbancia értékek alapján egyenletek segítségével $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ egységben kaptuk meg a klorofillok (a és b) és a karotinoidok (összes együttes) mennyiségét. (Lichtenthaler & Buschmann, 2001)

Ezen kívül használtam egy SPAD-502-es mérőeszközt, ami a növények klorofilltartalmával arányos értéket ad a levélen a vörös (650 nm) és az infravörös (940 nm) tartományban áthaladó fény arányából. Ezt minden növényen három különböző ponton mértem, majd azok átlagával számoltam.

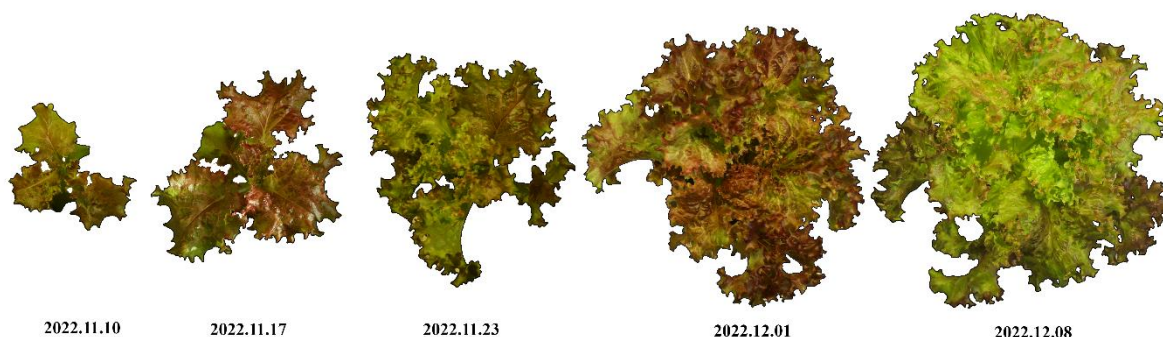
3.4.6 Növekedés

A kísérletek alatt a salátákról minden héten készült felülnézeti kép (4. fénykép, 2. ábra), amint elérték a 4-6 lombleveles állapotot. A növények mellé egy mérőszalagot helyeztünk, hogy a méretarányról tudjak később számolni. Az elkészült fényképeken körbevágtam a növényeket és olyan PNG fájlokat mentettem el, amik csak a növények pixeleit tartalmazzák (5. fénykép). R programban megszámláltam ezeket a pixeleket, majd méretarány segítségével visszaszámláltam, hogy mekkora terület látszik a fényképen négyzetcentiméterben. Ugyanígy módszerrel készítettem fényképeket a kísérletek végén szétszedett növények leveleiről is, hogy kapjak egy arányszámot, amivel korrigáltam a felülnézeti fotókból számolt adatokat.

A kísérletek végén minden salátának levágtuk a gyökerét, majd lemértük külön a hajtásrész és külön a gyökérrész frisstömegét. Ezután 80°C hőmérsékleten 48 óra alatt leszárlítottuk a mintákat szárítószekrényben, majd a száraztömegüket is lemértük, illetve kiszámoltuk a növények víztartalmát.



4-5. fénykép: Felülről készült fénykép a növényről és körbevágás után



2. ábra: Egy bordó levelű saláta heti növekedése

3.4.7 Antioxidáns kapacitás

A növények antioxidánskapacitás mérését FRAP (Ferric Reducing Antioxidant Potential – vasredukáló képesség) módszerrel végeztük el. A módszer azon alapul, hogy a Fe^{3+} -TPTZ (TPTZ = 2,4,6 tripiridil-s-triazin) komplexet az antioxidáns hatású vegyületek redukálják, ez a redukció pedig színváltozással jár, ami spektrofotometriával mérhető, 593 nm hullámhosszúságon. A feltárás 0.5 g növényi részből 70%-os etanollal történt, amit 2 ml-es Eppendorf csövekben 13000-es fordulatszámon 10 perc centrifugálás követett. Az abszorbancia mérést a felülúszón etanol vakoldattal szemben végeztük el. Az értékeket végül aszkorbinsav-ekvivalensbe (mg/g friss tömeg) számoltuk át kalibrációs görbe segítségével. Előnye ennek a módszernek, hogy viszonylag olcsó, gyakran használt és gyors laboratóriumi módszer, hátránya azonban, hogy a mérés a fiziológiai pH-nál alacsonyabban történik, illetve nem mérhetőek vele karotinoidok és tiol típusú vegyületek (Benzie & Strain, 1996).

3.4.8 Ásványianyag tartalom

A kísérletek során vizsgáltuk a növények P, K, Ca, Mg és Fe tartalmát. A felhasznált mintákat 50 °C-on szárítottuk, majd ledaráltuk azokat és így küldtük az egyetemi laborközpontba, ahol elvégezték a méréseket.

3.5 Adatfeldolgozás

Az egyes mérőműszerek, amiket használtunk, különböző módon tárolják az adatokat, amiket lementés után Excel segítségével rendszereztünk, majd szövegfájlként exportáltunk. Ez azért volt fontos, mert így tudtam tovább dolgozni az adatokkal R-ben és elkészíteni az ábrákat, amiket az eredmények részben mutatok be, illetve R-ben végeztem a heti fotósorozaton alapuló növekedésanalízist is.

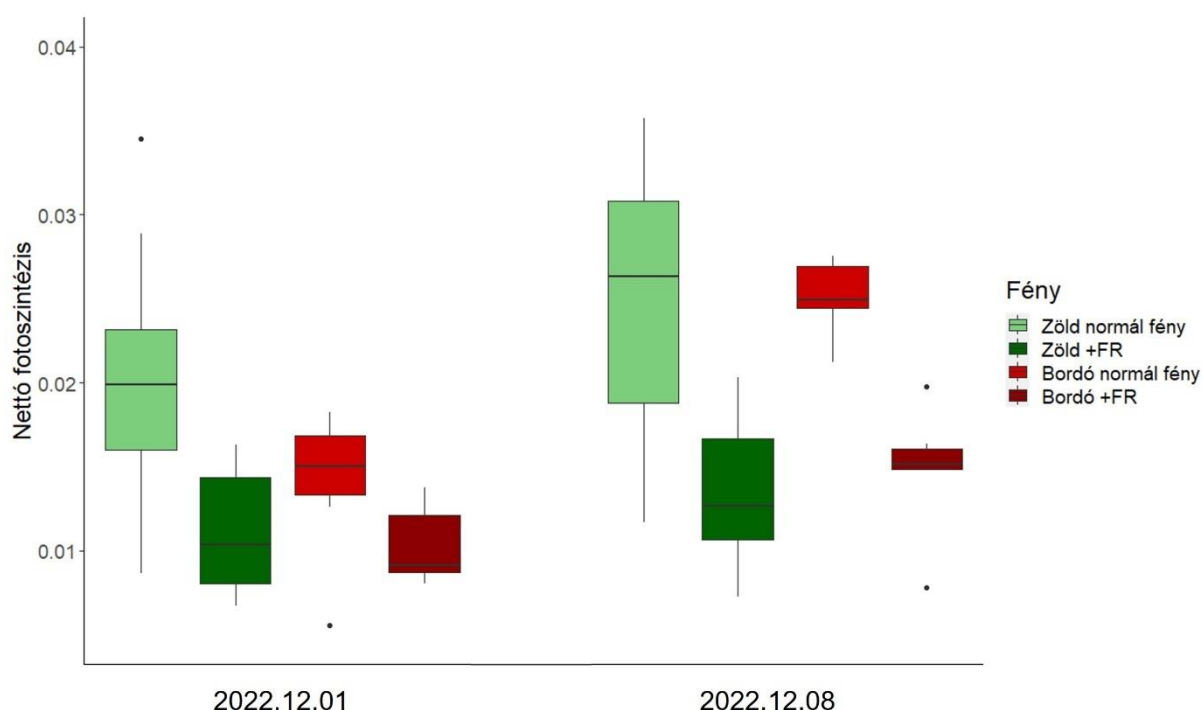
A növekedés analízishez az R-n belül a pliman package-et használtuk (Olivoto, 2022), a boxplotok elkészítéséhez pedig ggplot2 package-et (Wickham, 2016).

Az egyes adatszoportok közötti különbségek megállapításához $p=0.05$ szignifikancia szintet határoztunk meg. R programban varianciaanalízist követően kétmintás t-próbát végeztünk.

4 Eredmények és értékelésük

4.1 Nettó fotoszintézis

Az első kísérlet során fotoszintézist két alkalommal mértünk, egy hét eltéréssel (3. ábra). Az első mérésnél a zöld és a bordó saláta esetén is kisebb volt a fotoszintézis mértéke abban az esetben, amikor volt távoli vörös megvilágítás, a különbség pedig mindkét esetben szignifikáns volt (zöld: $p=0.019$, bordó: $p=0.012$). Az egy héttel későbbi mérési eredményeken az figyelhető meg, hogy a növények fotoszintézise minden esetben növekedett. Ennél a mérési alkalomnál még nagyobb lett a különbség a csoportok között (zöld: $p=0.006$, bordó: $p<0.001$).



3. ábra: Nettó fotoszintézis eredmények két mérési időpontban az első kísérlet során a különböző fénybeállítások mellett.

4.2 Fluoreszcencia

A 3. táblázat az első kísérletből származó fluoreszcencia adatok átlagait tartalmazza két mérési időpontban, csoportonként. Az RFD relatív fluoreszcencia csökkenés és a fotoszintézis hatékonyságával van kapcsolatban. Az látható, hogy a bordó saláták esetében a második mérési alkalomra jelentősen lecsökkent az értéke, míg zöld saláták esetében nem volt nagy változás.

Emellett az érték a +FR kezelésben, hasonlóan a fotoszintetikus teljesítményhez, minden esetben kisebb volt, mint normál fényen.

Az Fv/Fm a PSII potenciális fotokémiai hatékonyságával korrelál. Ez az érték a bordó levelű salátáknál valamivel nagyobb volt, mint a zöld levelűekben mindkét időpontban, és a távoli vörös kiegészítés mellett nevelt zöld salátákon kívül minden esetben csökkent a második alkalomra, de a bordó saláták esetében nagyobb mértékben, tehát azok kevésbé őrizték meg a fotoszintetikus teljesítményüket. Az FiPS2 is a PSII hatékonyságával van összefüggésben, ami szintén a bordó saláták kezdeti jobb teljesítményét, majd a második mérésakor annak jelentősebb csökkenését igazolja.

Az NPQ magas értékei egyrészt magasabb karotinoid pigment-tartalomra, másrészt fokozottabb stresszállapatra utalhatnak és a gerjesztési energia hődisszipációjával kapcsolatosak. Az látható, hogy a második alkalomra minden esetben megnövekedett ennek az értéke, illetve, hogy bordó saláták esetén magasabb értékeket mértünk.

3. táblázat: Az első kísérlet fluoreszcencia adatainak átlaga két mérési időpontban

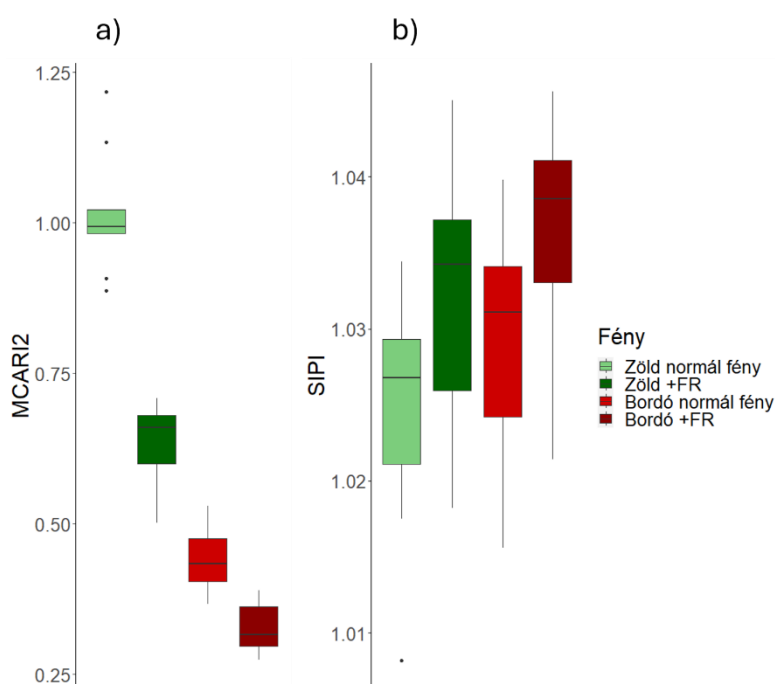
saláták mérési időnként	RFD	Fv/Fm	FiPS2	NPQ
Bordó normál első	0.802	0.903	0.433	2.067
Bordó normál második	0.326	0.892	0.24	2.842
Bordó + FR első	0.886	0.903	0.46	1.818
Bordó + FR második	0.284	0.89	0.212	3.049
Zöld normál első	0.794	0.874	0.431	1.182
Zöld normál második	0.834	0.869	0.423	1.625
Zöld + FR első	0.576	0.876	0.36	1.281
Zöld + FR második	0.485	0.876	0.308	1.759

4.3 Vegetációs indexek

A 4. ábra a) az MCARI2 vegetációs indexet mutatja az első kísérlet során. Itt az egyes csoportok teljesen elkülönülnek és mivel ez egy klorofilltartalomra érzékeny index, az ábra nagyon hasonlít a spektrofotometriával meghatározott pigmentes ábrákra (6. ábra). Legnagyobb MCARI2-értéket a zöld lombú normál fény alatt nevelkedett növényeknél tapasztaltunk, ami szignifikánsan nagyobb volt a +FR kezelt növényeknél. Hasonlóan alakult a bordó lombú salátáknál is az MCARI2 értéke a fényreceptek mentén. A kétféle saláta értékei is szignifikánsan különböztek. Az index értékeinek alakulása arra utal, hogy egyrészt lehet egy fajtakülönbség a saláták között (az antocián tartalom csak „elfedi” a zöld színt a levélben, nem feltétlenül jelent alacsonyabb fotoszintetikus pigment-mennyiséget a bordó lombozat),

másrészt a fitokróm rendszer kikapcsolása a +FR kezeléssel késleltette a normális pigment-szintézist és a normális fotoszintetikus teljesítmény (3. ábra) elérését is.

A SIPI a karotinok arányát fejezi ki a zöld pigmentekéhez képest, és pontosan ellenkező menetet mutat a kezelések és levélszín mentén, mint az MCARI2. Zöld és bordó levelű saláták esetén is szignifikánsan nagyobb volt az érték, ha kaptak a növények távoli vörös kiegészítést (zöld: $p < 0.001$, bordó: $p = 0.003$), tehát nőtt a karotinok mennyisége a klorofillokhoz képest. Emellett a bordó levelű salátában volt nagyobb ez az érték. Ez egybeesik az NPQ fluoreszcencia paraméternél leírtakkal, és inkább valószínűsíti az NPQ növekedése kapcsán a több pigment, mintsem a stressz hatását.

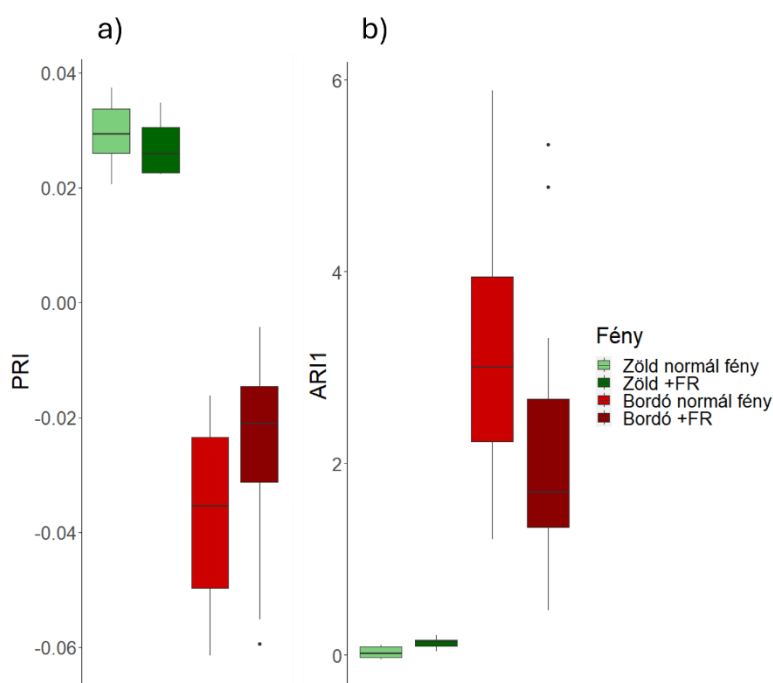


4. ábra: MCARI2 és SIPI vegetációs indexek az első kísérletben a különböző fénybeállítások mellett

Az 5. ábra a) a PRI vegetációs indexet mutatja az első kísérlet során, az 5. ábra b) pedig az ARI1 vegetációs indexet. A PRI-ben szignifikáns különbség ($p < 0.001$) mutatkozott a zöld és bordó levelű saláták között fénykezeléstől függetlenül. Mivel a PRI a xantofill pigmentek mennyiségére érzékeny és a gerjesztési energia hő formájában való leadásának a mutatója is lehet, a zöld lombú saláták esetében a magasabb érték nagyobb hődisszipációt, fokozottabb stresszt jelenthet. Másrészt, a xantofillok a fotoszintetizáló apparátus járulékos pigmentjei, nagyobb mennyiségük azt is jelezheti, hogy több gerjesztési energia kerül a reakciócentrumokba, amivel hatékonyabb fotoszintézis jár együtt, és ez a zöld és bordó saláta

összehasonlításában meg is mutatkozott a zöld javára. Úgy tűnik tehát, hogy a zöld és a bordó levelű saláták karotinoid összetétele is jelentősen eltréhetett, a karotinokból a bordó, míg a xantofilokból a zöld salátákban volt több, ami szintén egy fajta-jelleg lehet.

Az ARI1 antociánokra érzékeny index, így a bordó salátákban sokkal nagyobb értékeket mértünk. A fitokróm rendszer hosszú megvilágítás esetén bekapcsolt állapotában serkentő hatással van az antocián bioszintézisre is, a +FR kezelés ezt csökkenti (Taiz et al., 2015). A távoli vörös kiegészítés a zöld saláták esetén viszont épp ellenkezőleg, szignifikánsan ($p < 0.001$) növelte az értéket, ami lehet egyfajta stressznek a jele. A bordó növények esetén viszont a vártak megfelelően, szignifikánsan ($p = 0.023$) csökkentette, ezeknél a növényeknél, ha kapcsolódik is stressz a +FR kezeléshez, az amúgy is jelenlévő antociánok segítik a fényvédelmet, míg a zöld salátánál ehhez antocián termelés lehet szükséges.



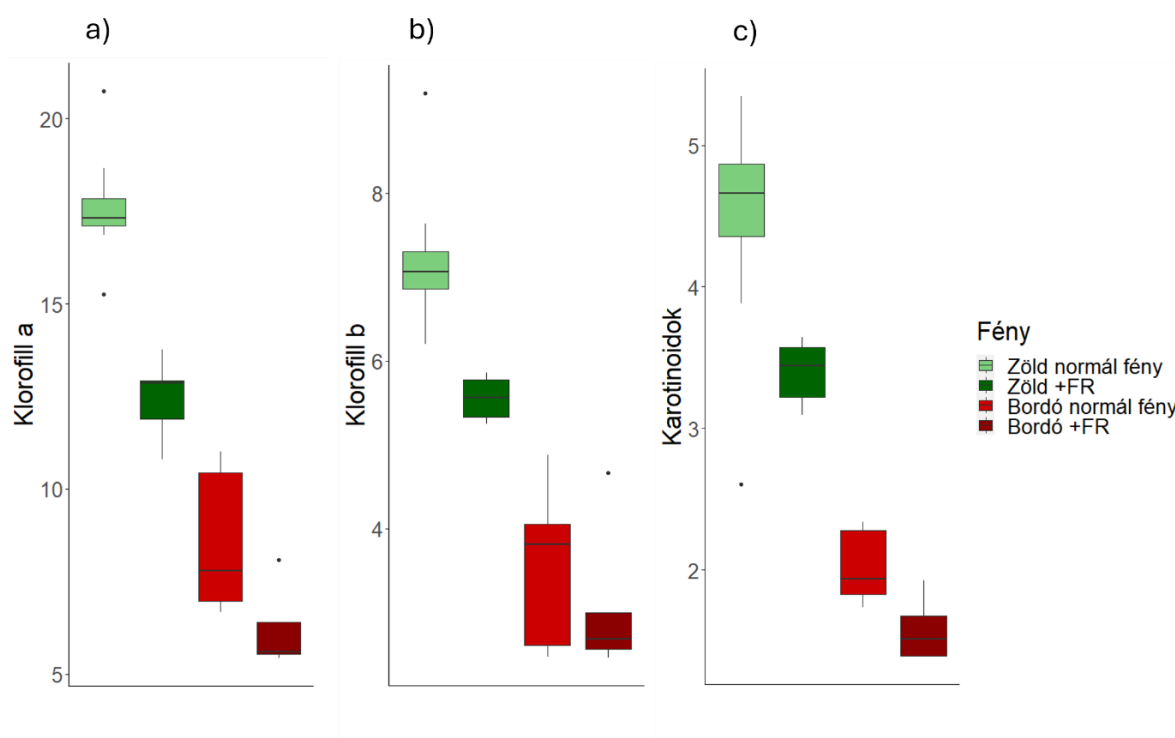
5. ábra: PRI és ARI vegetációs indexek az első kísérletben a különböző fénybeállítások mellett

4.4 Pigmenttartalom

A fotoszintetikusán aktív pigmentek közül a klorofill a (6. ábra a)), a klorofill b (6. ábra b)), és a karotinoidok (6. ábra c)) esetében is szignifikánsan kisebb volt ($p < 0.001$) a bordó levelű saláták pigmenttartalma a zöldekéhez képest. Mivel ez fénykezeléstől függetlenül így volt,

feltehetően fajtatulajdonságnak tudható be ez a különbség, ahogy ez az MCARI2 index esetében is felmerült már.

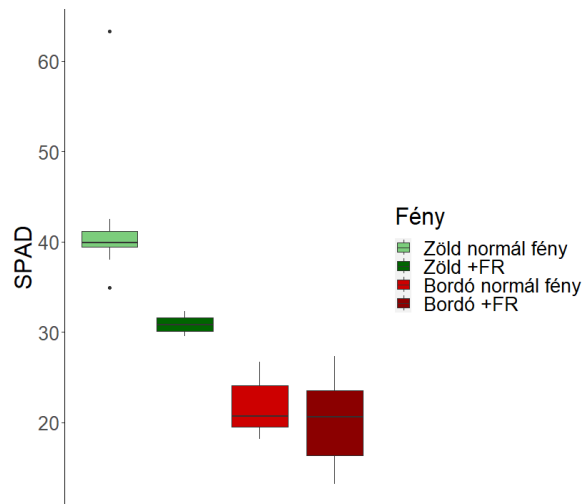
Mind a zöld, mind a bordó saláták esetében kisebb volt a pigmenttartalom, amikor kaptak távoli vörös kiegészítést. Ez a különbség zöldek esetében mindegyik pigmentre szignifikáns volt ($p < 0.001$), bordók esetén viszont nem (ábrák szerint sorban: $p = 0.025$, $p = 0.223$, $p = 0.011$). Ez azzal magyarázható, hogy a távoli vörös fény kikapcsolta a növényekben a vörös fény által aktivált fitokrómot, ezzel csökkentve a színanyag felhalmozódást. Ez az eredmény megegyezik Li és Kubota (2009) kutatási eredményeivel, miszerint a távoli vörös kiegészítés csökkentette a pigmentkoncentrációt saláta növények esetén.



6. ábra: Klorofill a, klorofill b, és karotinoid tartalmak ($\mu\text{g}/\text{cm}^2$) az első kísérlet során a különböző fénybeállítások mellett

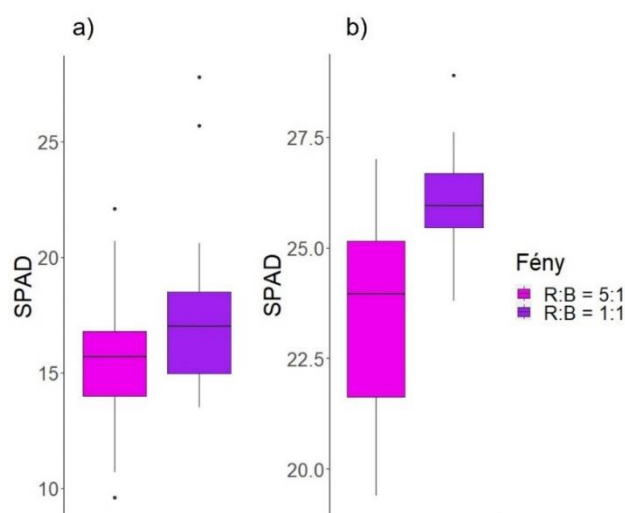
4.5 SPAD

A SPAD eredmények alakulása (7. ábra) a zöld színanyagokra érzékeny index és a pigment-tartalmak menetéhez hasonlóan szintén igazolja, hogy a távoli vörös fény lecsökkentette a klorofill tartalmat a zöld saláták esetében, azonban a bordóknál nem látszik a pigment tartalom meghatározásnál jobban megfigyelhető különbség.



7. ábra: Az első kísérlet során mért SPAD értékek a különböző fénybeállítások mellett

A második kísérlet első (8. ábra a)) és második ("ismétlés", 8. ábra b)) sorozatának SPAD eredményei alapján az látszik, hogy a magasabb vörös/kék fény arány lecsökkentette a klorofilltartalmat a bordó levelű salátákban. Az első mérés során ez a különbség nem volt szignifikáns ($p=0.073$), viszont a második mérésnél igen ($p=0.004$). Ez a különbség igazolja a kék fénynek az R:B=1:1 beállításnál a fotoszintetikus apparátusra gyakorolt pozitív hatását, mely válasz a nagyobb kék arány kriptokróm rendszerre kifejtett fokozottabb hatásával magyarázható (pigmentszintézis-szabályozás, mint kék fény válasz). Másrészt, az R:B=5:1 fényrecept összetételében a jelentős vörös arány mellett a növénynek kisebb ráfordításra van szüksége a pigmentszintézis során ahhoz, hogy a fotoszintézis normál módon működjön.



8. ábra: A második kísérletben és az ismétlésében mért SPAD értékek a két fénybeállítás mellett

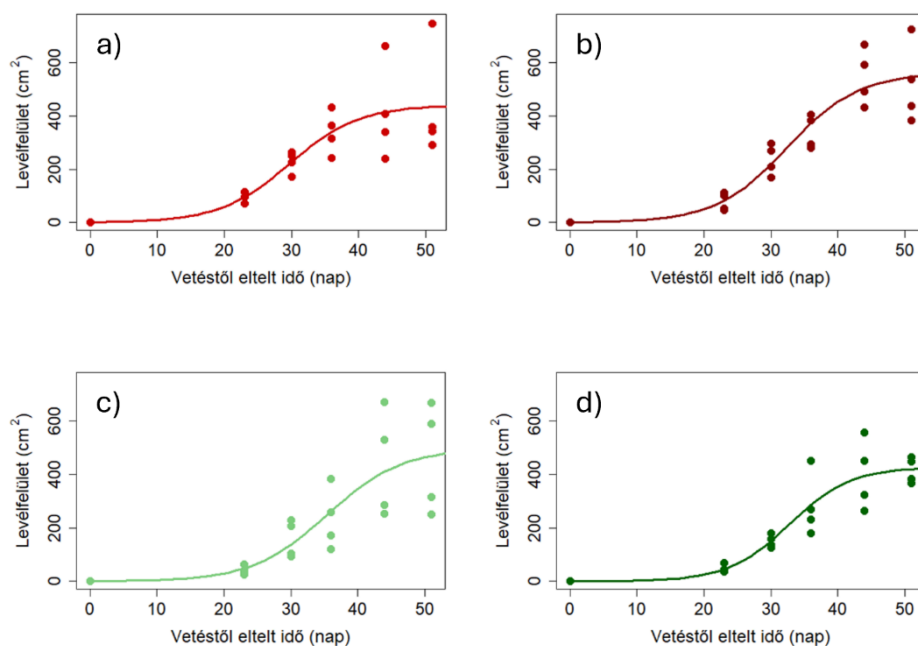
4.6 Levélfelület

Az alábbi ábrákon a levélfelület változás látható az első kísérletben. A növekedést szigmoid görbével modelleztem:

$$LA = a / (1 + e^{b \times (c - idő)}),$$

melynek paraméterei a növekedés során elért maximális levélfelület (a paraméter), az intenzív növekedés meredeksége (b paraméter) és az intenzív növekedés kezdete (c paraméter). A 9. ábra a) a távoli vörös kiegészítés nélkül nevelt bordó levelű saláták levélfelületét ábrázolja az idő függvényében, a 9. ábra b) a távoli vörös kiegészítés mellett neveltekét. A növekedés intenzitásában nem találtam szignifikáns különbséget, ahogyan a kifejlett saláták levélfelületében sem, azonban a távoli vörössel nevelt növények átlagosan 86 cm²-vel nagyobbak voltak. Ez igazolja egy másik kutatásban leírtakat (Legendre és van Iersel, 2021) miszerint a növelt távoli vörös mennyiségének hatására nőtt a saláta leveleinek hosszúsága és szélessége is. Ez egy tipikus fitokróm hatás, hiszen az alacsonyabb vörös/ távoli vörös arány eredménye, hogy a növény nagyobb levélfelületre törekszik. A 9. ábra c) a távoli vörös nélküli zöld növények levélfelületét mutatja, a 9. ábra d) pedig a távolivörössel neveltekét, itt nem mutatkozott különbség.

A 4. táblázat az átlagos levélfelületet mutatja a saláták levélszíne és a fényprogram szerint, különböző mérési időpontokban. A táblázatból látszik, hogy a bordó levelű saláták hamarabb kezdtek el növekedni, majd a kísérlet végére ennek a különbségnek a mértéke csökkent. Ez feltehetően fajtulajdonság, azonban a betakarításkori állapotból az látszik, hogy míg a távoli vörös kiegészítés nélkül nevelt bordó saláták mérete nem lett nagyobb a zöldekénél, a távoli vörössel neveltek igen. Mindez különösen azért érdekes, mert mind a fotoszintézis, mind az azt meghatározó fotoszintetikus pigmentek mennyisége épp ezzel ellentétesen a zöld levelű saláták esetében okozhatott volna fokozott levélnövekedést. A fényrecept azonban a vizsgált változókon kívül számos egyébire is hat, így a hormontermelést is befolyásolja (Taiz et al., 2015). Emellett a fluorszcencia paraméterek elemzése eltérő ütemet mutatott a fényhasznosítás alakulásában a zöld és a bordó fajta esetében (csökkent-e és mennyire a fotokémiai hatékonyság a két mérés között, mekkora volt a hődisszipáció aránya stb.), aminek a pontosabb megismerése esetleg további vizsgálatokat igényelhet.



9. ábra: Az első kísérlet növénycsoportjainak levélfelület (cm²) növekedése az egyes mérési időpontokban a két fénybeállítás mellett

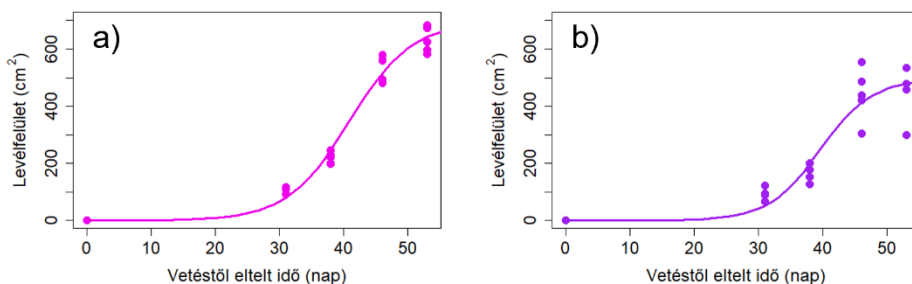
4. táblázat: A különböző csoportok levélfelületének átlaga (cm²) az egyes mérési időpontokban.

	Dátum				
Növénycsoport	11.10	11.17	11.23	12.01	12.08
Bordó	94	228	338	413	434
Bordó (+FR)	79	236	340	546	521
Zöld	42	158	233	434	455
Zöld (+FR)	46	150	283	398	415

A második sorozatban a bordó saláták az eltérő kék-vörös arány hatására már sokkal jelentősebb különbséget mutattak a növekedés-analízis során (10. ábra). Az R:B=5:1 beállításnál szignifikánsan nagyobb lett a vizsgált időszakban a saláták levélfelülete, ami ismét a kisebb ráfordítás mellett jobb hatékonyság jele, másrészt az R:B=1:1 kezelésnél a kriptokróm-válasz fokozottabb megjelenése (redukált növekedés).

Az 5. táblázatban a második kísérletben nevelt saláták növekedésének néhány leíró paramétere látható, amik az illesztett szigmoid görbe tulajdonságaiból származnak. Az adatokból az látható, hogy ugyan a telítődési érték az R:B 5:1 fényprogram esetén volt nagyobb,

az R:B = 1:1 beállítás esetén a növekedés intenzitása mégis jelentősebb volt. Az intenzív növekedés kezdetének idejében nem mutatkozott különbség.



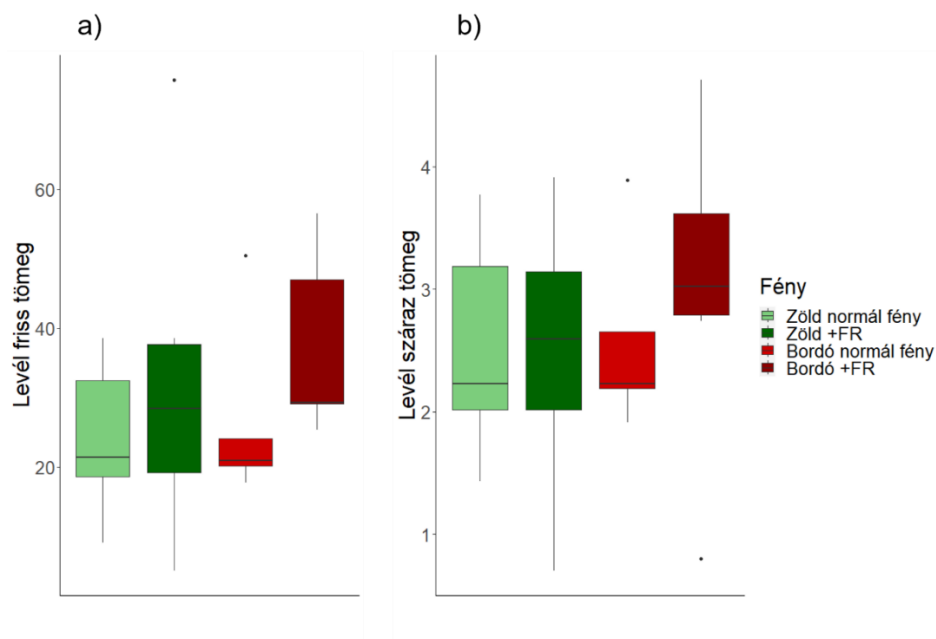
10. ábra: Az ismételt második kísérlet növénycsoportjainak levélfelület (cm²) növekedése az egyes mérési időpontokban a két fénybeállítás mellett (a) R:B=5:1, b) R:B=1:1)

5. táblázat: A második kísérletben nevelt saláták növekedésének jellemzése.

Saláták növekedése	telítődési érték (cm ²)	intenzív növekedés meredeksége	intenzív növekedés kezdete (nap)
R:B = 5:1	694	0.2	41
R:B = 1:1	495	0.25	40

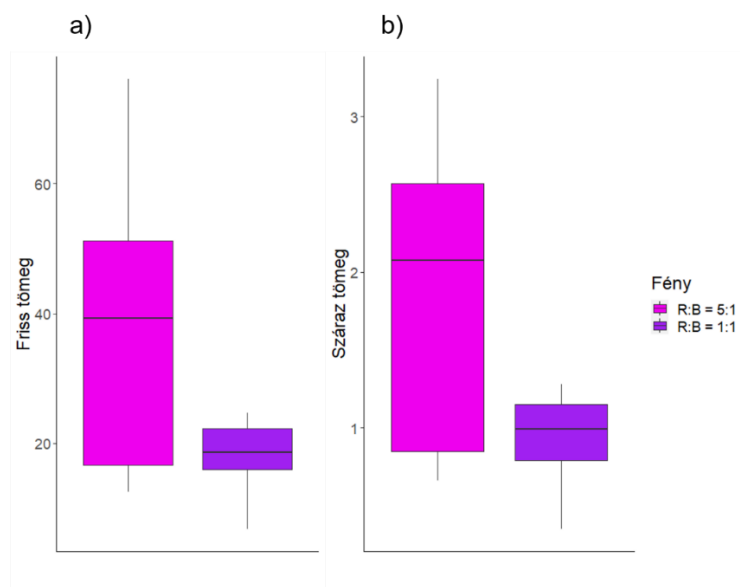
4.7 Friss- és száraztömeg

A zöld levelű saláták esetében nem okozott különbséget a távoli vörös kiegészítés a növények friss (11. ábra a) és száraz (11. ábra b) tömegében az első kísérletben. Bordó levelű salátáknál ugyan az ábrán jól látszik, hogy a távoli vörös fény kiegészítéssel nevelt növénynek nagyobbak lettek, statisztikailag ez a különbség azonban nem volt szignifikáns a kiugró értékek miatt (ezek törlésével a különbség biztosan szignifikáns lett volna). Ez az eredmény eléggé egybeesik a levélfelület-elemzés eredményével.



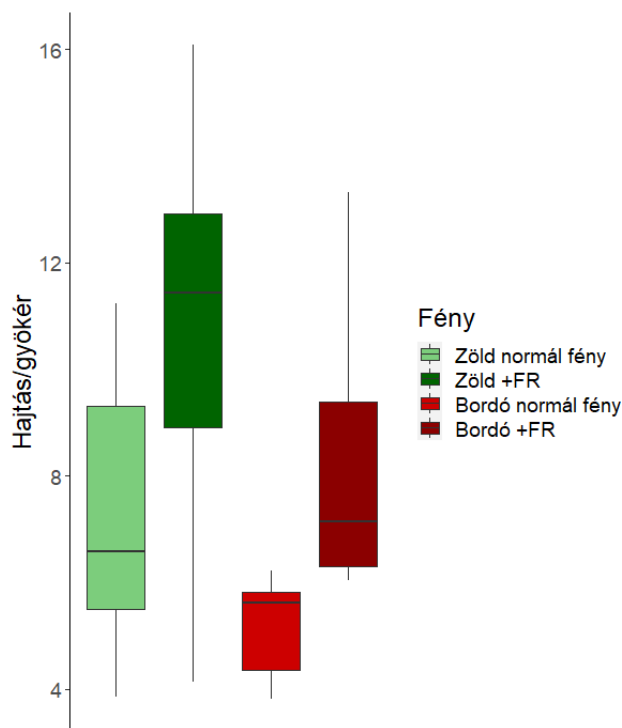
11. ábra: A saláták friss- és száraztömege (g) a különböző fénybeállítások mellett

A 12. ábra a) része a második kísérlet első sorozatának a friss tömeg adatait mutatja, a 12. ábra b) része pedig a száraz tömeg adatokat. Mindkét esetben szignifikánsan kisebbek lettek a tömegek az alacsonyabb vörös/kék fény hatására (friss tömeg esetén: $p=0.001$, száraz tömeg esetén $p<0.001$). Ezt az eredményt igazolják Pennisi et al. (2019) kutatási eredményei is, és azzal magyarázható, hogy a fényreceptben a kék fény arányának növelésével a növények kompaktabbak lettek és általánosan kisebbek lettek a leveleik és a szárak.



12. ábra: A második kísérlet első sorozatában mért friss- és száraz tömegek (g) a két fénybeállítás esetén

A 13. ábrán az első kísérletben mért hajtás és gyökértömegek aránya látható. Az látszik, hogy levélszintől függetlenül, a távoli vörös jelenléte megnövelte a saláták hajtástömegének arányát a gyökérükhöz képest. A különbség mindkét esetben szignifikáns volt (zöldeknel: $p=0.039$, bordóknál $p=0.026$). A magasabb hajtás/gyökér arány előnyös, mivel gazdasági szempontból fontos, hogy a növény az energiáját inkább a lombozat növelésére fordítsa.



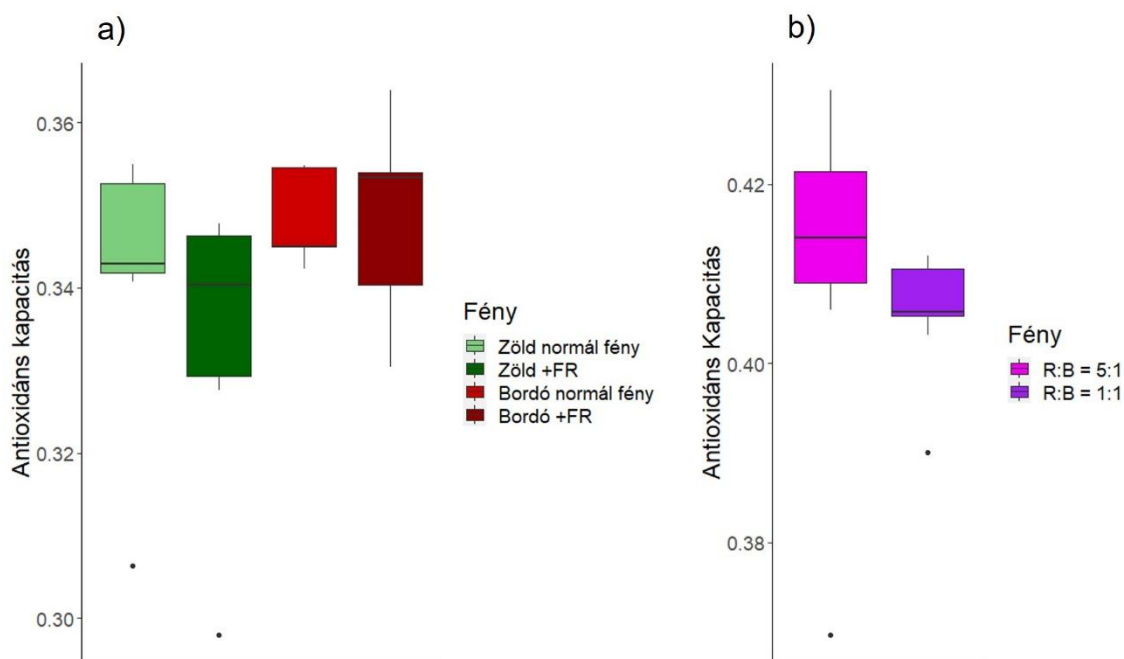
13. ábra: Az első kísérlet során mért hajtás- és gyökértömegek aránya (friss tömegből számolva)

4.8 Antioxidáns kapacitás

A 14. ábra a) az első kísérletben mért antioxidáns kapacitást mutatja. A csoportok között nem volt szignifikáns különbség (itt is érdemes lehet még a kilógó adatok szűrése után is megnézni az eredményt) viszont az ábrán az látszik, hogy a bordó salátáknak fénykezeléstől függetlenül nagyobb volt az antioxidáns kapacitásuk. Ez feltehetően a bordó színt is okozó antociánoknak tudható be.

A 14. ábra b) a második kísérlet ismétlésének az adatait mutatja. Itt szintén nem volt szignifikáns a különbség, viszont az ábrán az látszik, hogy az R:B = 5:1 csoportnak az értékei magasabbak. Ennek az lehet a magyarázata, hogy mivel mindkét receptben volt távoli vörös fény is, így a R:FR aránya (vörös:távoli vörös) is változott a két fénybeállításnál. Az R:B = 5:1 fénykezelés esetén így a R:FR arány 2,83, míg az R:B = 1:1 kezelés során a R:FR arány 1,77.

Az első kísérlet alapján, illetve Li és Kubota (2009) eredményei alapján a magasabb R:FR arány növelte az antociánok mennyiségét, ezzel az antioxidáns kapacitást is.



14. ábra: Az első kísérletben és az ismételt második kísérletben mért antioxidáns kapacitás különböző fénybeállítások mellett (mg/g)

4.9 Ásványianyag tartalom

A 6. táblázat az első és a második kísérlet ismétlésében nevelt saláták ásványianyagtartalmának átlagait tartalmazza. Szignifikáns csökkenés mutatkozott bordó levelű saláták esetén a távoli vörös hatására a P, Ca, Mg, és Fe tartalomban. Zöld lombú saláták esetén szignifikáns növekedés volt viszont a K és Mg tartalomban. Nem volt megállapítható szignifikáns különbség egyik elem tekintetében sem az eltérő vörös/kék fény hatására. Az első kísérlet alapján a szignifikáns különbségeket vizsgálva az állapítható meg, hogy míg bordó növények esetén a távoli vörös kiegészítés lecsökkentette az ásványianyagok koncentrációját, zöld saláták esetén növelte azokat. Az elemek többségéből a zöld lombú salátában kevesebb volt, mint a bordó lombú salátában, fénykezeléstől függetlenül.

6. táblázat: A két kísérlet során az egyes fénykezelések alatt nevelt saláták ásványianyagtartalma, ahol a foszfor, kalcium, kálium és a magnézium m/m%-ban van megadva, a vas pedig mg/kg-ban.

Fénykezelés	P	Ca	K	Mg	Fe
Bordó normál	0.58	1.12	5.5	0.22	73.2
Bordó +Fr	0.45	0.67	4.92	0.18	61.6
Zöld normál	0.43	0.88	4.52	0.21	68.8
Zöld +Fr	0.41	0.86	4.94	0.24	57
Bordó R:B = 5:1	0.53	1.08	6.86	0.43	45.20
Bordó R:B = 1:1	0.57	1.14	6.36	0.43	50.58

5 Összefoglalás

A LED-ek használata a növénynevelésben lehetővé teszi, hogy a növény növekedése és fejlődése szempontjából optimális fényreceptet állítsunk be. Az már jól ismert tény, hogy a vörös és a kék fényre szüksége van a növényeknek az egészséges fejlődéshez a fotoszintézis folyamatában, az azonban még egy kevésbé kutatott terület, hogy a távoli vörös kiegészítés hogyan hat az egyes kultúrákra. Az első kísérleti sorozatban ezt vizsgáltam zöld és bordó levelű saláták esetén, a második kísérletben pedig a különböző vörös/kék arány hatását bordó levelű saláták esetében.

A saláták termesztésénél fontos piaci szempont, hogy mekkorák lesznek a növények, de ezen kívül fogyasztói szempontból az is fontos, hogy a saláták milyen beltartalmi paraméterekkel rendelkeznek, ugyanis jelentős mennyiséget tartalmazhatnak bizonyos ásványi anyagokból és egyes antioxidáns hatású (szín)anyagokból is. A különböző megvilágítási intenzitás és spektrális összetétel hatással van a növekedés mellett ezekre a mennyiségekre is.

Azért, hogy nyomon tudjam követni a növekedés folyamatát, a növények tenyészideje alatt minden héten fényképet készítettem a salátákról, amiből később levélfelületet számoltam. A különböző fényreceptek hatásának vizsgálatára több alkalommal mértünk a növényeken fotoszintézist, fluoreszcenciát, és reflektanciát, valamint fotoszintetikus pigment-koncentrációt. A kísérlet végén lemértük a saláták hajtásának és gyökerének a friss tömegét, majd szárítás után a száraztömegüket is.

Az első kísérletben az látszott, hogy a távoli vörös kiegészítés pozitívan hatott a levélfelület növekedésére, illetve a friss- és száraztömegre bordó saláták esetén. A fotoszintézis hatékonyságát mind a zöld, mind a bordó saláták esetében csökkentette a távoli vörös kiegészítés, és ezzel korreláltak a különböző eljárásokkal meghatározott fotoszintetikus pigment tartalmak is. Az antioxidáns kapacitásban nem mutatkozott különbség a fényprogramok hatására, azonban a bordó salátáknak az értékeik magasabbak voltak a zöldekénél, ami valószínűleg a bordó színanyag jelenlétének tudható be.

A második kísérletben a két fénybeállítás szintén nagy eltérést okozott a saláták méretében. A levélfelület növekedése intenzívebb volt, illetve a friss- és száraztömeg értékek nagyobbak voltak abban az esetben, amikor nagyobb arányban volt a fényreceptben vörös fény. Ez optimálisabb fénygerjesztésnek bizonyult a jelentősebb kék arány hatásához képest. Az antioxidáns kapacitás szintén abban az esetben volt nagyobb, amikor több vörös fényt kaptak a növények.

Az eredmények alapján a növekedés és a beltartalom szempontjából a távoli vörös kiegészítés pozitívan hatott a bordó levelű salátákra, a zöldeknél azonban kisebb volt ez a különbség, vagy elmaradt. Ami a kék és vörös fény arányát illeti, a magasabb vörös/kék arány volt pozitív hatással mind a növekedésre, mind az antioxidánskapacitásra bordó saláták esetén.

6 Irodalomjegyzék

- Allaga, J. – Bódis, J. (2014) Növénytan-Növényélettan jegyzet. Kaposvári Egyetem – Pannon Egyetem – Szegedi Gabonakutató Nonprofit Kft.
- Benzie, I.F.F. – Strain, J.J. (1996) The ferric reducing ability of plasma (FRAP) as a measure of “antioxidant power”: the FRAP assay. *Analytical biochemistry*, 239(1), 70-76. DOI: <https://doi.org/10.1006/abio.1996.0292>
- Borthwick, H.A. – Hendricks, S.B. – Parker, M.W. – Toole, E.H. – Toole, V.K. (1944): A reversible photoreaction controlling seed germination. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 38(8), 662-666. DOI: <https://doi.org/10.1073/pnas.38.8.66>
- Boros, I. F. (2021): Saláta (*Lactuca sativa* L.) fajták produkcióbíológiai jellemzése és komplex értékelése LED-es megvilágítási programok tesztelésével. [Doktori értekezés] Budapest, Magyar Agrár-és Élettudományi Egyetem.
- Despommier, D. (2013): Farming up the city: The rise of urban vertical farms. *Trends in Biotechnology*, 31(7), pp. 388–38. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.tibtech.2013.03.008>
- Despommier, D. (2010): *The vertical farm: feeding the world in the 21st century*. Macmillan. Letöltés dátuma: 2024.03.29. forrás: https://www.researchgate.net/profile/Dickson-Despommier-3/publication/38052439_The_Rise_of_Vertical_Farms/links/5a0a0fc3a6fdcc2736dea225/The-Rise-of-Vertical-Farms.pdf
- Durazzo, A. – Azzini, E. – Lazzé, M. C. – Raguzzini, A. – Pizzala, R., Maiani, G. – Palomba, L. – Maiani, G. (2014): Antioxidants in Italian head lettuce (*lactuca sativa* var. capitata.) Grown in organic and conventional systems under greenhouse conditions. *Journal of Food Biochemistry*, 38(1), 56–61. DOI: <https://doi.org/10.1111/jfbc.12025>
- Csupor, D. (szerk.) (2020): *Pirula Kalauz*. Szeged: PharMagist Bt.
- Graamans, L. – Baeza, E. – Van Den Dobbelsteen, A. – Tsafaras, I. – Stanghellini, C. (2018) Plant factories versus greenhouses: Comparison of resource use efficiency. *Agricultural Systems*, 160, 31-43. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agsy.2017.11.003>
- Hemming, S. (2011): Use of Natural and Artificial Light in Horticulture-Interaction of Plant and Technology. *Horticulture*, 907 (pp. 25-35) DOI: 10.17660/ActaHortic.2011.907.1
- http1: FAOSTAT honlapja. Letöltés dátuma: 2024.02.29.
<https://www.fao.org/faostat/en/#data/QCL/visualize>

http2: KSH honlapja. Letöltés dátuma: 2024.02.29.

https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0024.html

http3: NV5 honlapja. Letöltés dátuma: 2024.02.15.

<https://www.nv5geospatialsoftware.com/docs/vegetationindices.html>

Johnson, L.J. – Meacham, S.L. – Kruskall, L.J. (2003): The antioxidants-vitamin C, vitamin E, selenium, and carotenoids Journal of Agromedicine, 9(1), 65-82. DOI: https://doi.org/10.1300/J096v09n01_07

Kim, M.J. – Moon, Y. – Tou, J.C. – Mou, B. – Waterland, N.L. (2016): Nutritional value, bioactive compounds and health benefits of lettuce (*Lactuca sativa* L.). Journal of Food Composition and Analysis, 49, 19-34. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jfca.2016.03.004>

Legendre, R. – van Iersel, M.W. (2021): Supplemental far-red light stimulates lettuce growth: Disentangling morphological and physiological effects. Plants, 10(1), 166. DOI: <https://doi.org/10.3390/plants10010166>

Lenk, S. – Sági-Kazár, M. – Illés, L. – Solymosi, K. – Solti, Á. – Barócsi, A. (2021): Növényi minták fluoreszcencia lecsengési idejének vizsgálatai. University of Szeged, pp. 132–136. DOI: <https://doi.org/10.14232/kvantumelektronika.9.24>

Li, Q. – Kubota, C. (2009) Effects of supplemental light quality on growth and phytochemicals of baby leaf lettuce. Environmental and experimental botany, 67(1), 59-64. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2009.06.011>

Lichtenthaler, H.K. – Babani, F. (2007) Light Adaptation and Senescence of the Photosynthetic Apparatus. Changes in Pigment Composition, Chlorophyll Fluorescence Parameters and Photosynthetic Activity, in: Chlorophyll a Fluorescence. Springer Netherlands (pp. 713–736) DOI: 736. https://doi.org/10.1007/978-1-4020-3218-9_28

Lichtenthaler, K.H. – Buschmann, C. (2001) Extraction of photosynthetic tissues: chlorophylls and carotenoids. Photosynthetica 1, F4-2.

Hedges, L. J. – Lister, C. E. (2005). Nutritional attributes of salad vegetables. Crop & Food Research Confidential Report N. 1473. Christchurch, New Zealand: New Zealand Institute for Crop & Food Research.

Hemming, S. (2009) Use of natural and artificial light in horticulture-interaction of plant and technology. In VI International Symposium on Light in Horticulture 907 (pp. 25-35). DOI: 10.17660/ActaHortic.2011.907.1

Nagy, B. (szerk.) (2019): A növények élete, Egyetemi jegyzet.

Olivoto, T. (2022). “Lights, camera, pliman! An R package for plant image analysis.” Methods in Ecology and Evolution, 13(4), 789-798. DOI: [doi:10.1111/2041-210X.13803](https://doi.org/10.1111/2041-210X.13803).

- Ouzounis, T. – Rosenqvist, E. – Ottosen, C.-O. (2015): Spectral Effects of Artificial Light on Plant Physiology and Secondary Metabolism: A Review. *Hortiscience*, 50(8), 1128-1135. DOI: <https://doi.org/10.21273/HORTSCI.50.8.1128>
- Pennisi, G. – Orsini, F. – Blasioli, S. – Cellini, A. – Crepaldi, A. – Braschi, I. – Spinelli, F. – Nicola, S. – Fernandez, J.A. – Stanghellini, C. – Gianquinto, G. – Marcelis, L.F.M. (2019) Resource use efficiency of indoor lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivation as affected by red:blue ratio provided by LED lighting. *Scientific reports*, 9(1), 14127. DOI: <https://doi.org/10.1038/s41598-019-50783-z>
- Pinto, E. – Almeida, A. A. – Aguiar, A. A. R. M. – Ferreira, I. M. P. L. V. O. (2014): Changes in macrominerals, trace elements and pigments content during lettuce (*Lactuca sativa* L.) growth: Influence of soil composition. *Food Chemistry*, 152, 603–611. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foodchem.2013.12.023>
- Porcar-Castell, A. – Tyystjärvi, E. – Atherton, J. – Van Der Tol, C. – Flexas, J. – Pfündel, E.E. – Moreno, J. – Frankenberg, C. – Berry, J.A. (2014): Linking chlorophyll a fluorescence to photosynthesis for remote sensing applications: Mechanisms and challenges. *Journal of experimental botany*, 65(15), 4065-4095. DOI: <https://doi.org/10.1093/jxb/eru191>
- Ratkóczy, D. – Mizik, T. – Szabó, Z. (2023): Zárt többszintes termelési rendszer - egy lehetőség. *Gazdálkodás* 67(2), 139–150. DOI: https://doi.org/10.53079/gazdalkodas.67.2.t.pp_139-150
- Sapkota, S. – Sapkota, S. – Liu, Z. (2019). Effects of nutrient composition and lettuce cultivar on crop production in hydroponic culture. *Horticulturae*, 5(4), 72. DOI: <https://doi.org/10.3390/horticulturae5040072>
- Schepers, J.S. – Blackmer, T.M. – Wilhelm, W.W. – Resende, M. (1996): Transmittance and reflectance measurements of corn leaves from plants with different nitrogen and water supply. *Journal of plant physiology*, 148(5), 523-529. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0176-1617\(96\)80071-X](https://doi.org/10.1016/S0176-1617(96)80071-X)
- Shahak, Y. – Ratner, K. – Zur, N. – Offir, Y. – Matan, E. – Southern, H.Y. – Network, R. – Messika, I.Y. – Posalski, I. – Ben-Yakir, D. (2009): Photosensitive Netting: an Emerging Approach in Protected Agriculture. *International Symposium on Strategies Towards Sustainability of Protected Cultivation in Mild Winter Climate*, 807 (pp. 79-84). DOI: 10.17660/ActaHortic.2009.807.7
- Shahidi, F. – Zhong, Y. (2015): Measurement of antioxidant activity. *Journal of functional foods*, 18, 757-781. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jff.2015.01.047>
- Singh, R. B. – Ghosh, S. – Niaz, M.A. – Singh, R. – Beequm, R. – Chibo, H. – Postiglione, A. (1995): Dietary intake, plasma levels of antioxidant vitamins, and oxidative stress in relation to

- coronary artery disease in elderly subjects. *The American journal of cardiology*, 76(17), 1233-1238. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0002-9149\(99\)80348-8](https://doi.org/10.1016/S0002-9149(99)80348-8)
- Taiz, L. – Zeiger, E. – Møller, I.M. – Murphy, A. (2015) *Plant Physiology and Development*. Sunderland, Sinauer Associates Incorporated.
- Terbe, I. – Ombódi, A., (szerk.) (2019): *Zöldségfélék trágyázása és öntözése*. Budapest: Szaktudás Kiadó Ház.
- Török G. (2023): *Növényvilágításra hangolva – AgroLight Fórum*. Magyar Mezőgazdaság. Letöltés dátuma: 2024.03.29
- Tuba Z. – Csintalan Zs. (2009): *Növényélettan*. Gödöllő: Szent István Egyetemi Kiadó
- Wickham, H. (2016). *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. forrás: <https://ggplot2.tidyverse.org>.
- Zhang, D. – Guo, P. (2016) Integrated agriculture water management optimization model for water saving potential analysis. *Agricultural Water Management*, 170, 5-19. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.agwat.2015.11.004>
- Zhen, S. – Bugbee, B. (2020): Far-red photons have equivalent efficiency to traditional photosynthetic photons: Implications for redefining photosynthetically active radiation. *Plant, cell & environment*, 43(5), 1259-1272. DOI: <https://doi.org/10.1111/pce.13730>

7 Köszönetnyilvánítás

Ezúton is szeretnék köszönetet nyilvánítani konzulensemnek, Dr. Fóti Szilviának, aki segítségével és tanácsaival nagyban hozzájárult a kutatás sikeres elkészüléséhez. Köszönöm a tanszék munkatársainak a segítséget, Dr. Balogh Jánosnak, Dr. Balázs Lászlónak, Lajkó Melindának, a fénykezelések beállításában, a mérések kivitelezésében, az adatok feldolgozásában és értékelésében, illetve köszönöm Venczel Lillának, hogy segített a mérések elvégzésében. Köszönettel tartozom a Növényélettani és Növényökológia tanszék vezetőjének, hogy a mérésekhez használt műszereket, illetve vegyszereket a rendelkezésemre bocsátotta.