

SZAKDOLGOZAT

Venczel Lilla

2024



Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem

Szent István Campus

Kertészettudományi Intézet

Kertészmérnöki alapképzési szak

**KÜLÖNBÖZŐ SPEKTRÁLIS ÖSSZETÉTELŰ LED-
VILÁGÍTÁS HATÁSAI A PARADICSOM (SOLANUM
LYCOPERSICUM) ÉLETTANI VÁLTOZÓIRA**

Belső konzulens: Fóti Szilvia

egyetemi docens

Belső konzulens

intézete/tanszéke:

Növénytermesztési-
tudományok Intézet,
Növényélettan és
Növényökológia Tanszék

Készítette:

Venczel Lilla

Gödöllő

2024

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés és célkitűzések	4
2	Szakirodalmi áttekintés	6
2.1	A paradicsom hazai termesztésének és fogyasztásának jelentősége	6
2.2	Természetes fény és kiegészítő világítás.....	6
2.3	Fotoszintézis és fluoreszcencia	8
2.3.1	Kloroplasztisz	8
2.3.2	A fotoszintézis színanyagai.....	9
2.3.3	A fényenergia abszorpciója.....	9
2.3.4	Fluoreszcencia.....	10
2.4	Fotoreceptorok	10
2.4.1	Kriptokrómok.....	11
2.4.2	Fototropinok.....	11
2.4.3	Fitokrómok.....	12
2.5	A fény hullámhosszának és intenzitásának hatásai	13
2.5.1	Spektrumok hatása egyenként.....	13
2.5.2	A vörös és kék fény együttes hatása	14
2.5.3	Távoli vörös kiegészítés a fényreceptekben.....	15
2.5.4	Zöld fény hozzáadása a növénynevelő világításokhoz	16
2.5.5	A spektrumok egymáshoz viszonyított aránya	16
2.5.6	A kiegészítő megvilágítás intenzitása	17
2.5.7	A világítás spektrális összetételének és a fény intenzitásának együttes hatásai	18
2.5.8	A spektrumösszetétel szerepe a kertészetben.....	19
2.6	Az UV fénykezelés hatásai	19
2.6.1	Az UV-A kiegészítő világítás a termesztés alatt.....	20
2.6.2	Az UV-B sugárzás káros hatása.....	20
2.6.3	A betakarítás utáni UV-C besugárzás hatása a paradicsombogyókra.....	21
3	Alkalmazott módszerek	24

3.1	A kutatás körülményei	24
3.1.1	A fénykezelés.....	25
3.1.2	Betakarítás.....	25
3.1.3	UV-C világítás	26
3.2	A kísérlet felépítése.....	27
3.3	A teljes növényen alkalmazott mérések	27
3.3.1	Reflektancia mérések és vegetációs indexek	27
3.3.2	SPAD	28
3.3.3	Fluoreszcencia mérések	29
3.3.4	Fotoszintézis mérések	30
3.3.5	Pigmenttartalom meghatározás	30
3.3.6	Növény friss és száraz tömeg.....	30
3.3.7	Növénymagasság	31
3.4	Paradicsom bogyókra vonatkozó mérések	31
3.4.1	Bogyótömeg.....	31
3.4.2	Összes antioxidáns kapacitás	31
3.4.3	°Brix.....	32
3.4.4	Malondialdehid (MDA)-tartalom.....	32
3.4.5	Titrlható savasság.....	33
3.5	Statisztikai kiértékelés.....	33
3.6	A kutatás megismétlése	34
3.6.1	Módosított fénykezelés	34
3.6.2	Módosított UV-C kezelés	36
3.6.3	Mérések.....	36
4	Eredmények és értékelésük.....	37
4.1	A különböző fényreceptek hatása a morfológiai tulajdonságokra	37
4.1.1	Növénynövekedés	37
4.1.2	Termésmennyiség	38
4.2	A fényreceptek hatása a paradicsom fotoszintetikus tulajdonságaira	39

4.3	A fényreceptek hatása a paradicsom termékek beltartalmára.....	43
4.4	Az ismétlés eredményei	46
4.4.1	Morfológiai tulajdonságok.....	46
4.4.2	Fotoszintetikus tulajdonságok.....	48
4.4.3	A termékek beltartalmi mutatói.....	52
4.4.4	Az UV-C megvilágítás hatása az utóérlelésre.....	53
5	Következtetések és javaslatok.....	55
6	Összefoglalás	57
7	Köszönetnyilvánítás	59
8	Irodalomjegyzék	60
9	Ábrák és táblázatok jegyzéke.....	66
9.1	Táblázatok	66
9.2	Ábrák.....	66

1 Bevezetés és célkitűzések

Napjainkban egyre fontosabb az emberek számára az egészséges étkezés, a friss és vegyszermentes gyümölcsök és zöldségek fogyasztása, amelyeknek betegségmegelőző hatása is van. A paradicsom (*Solanum lycopersicum*) a világ legjelentősebb termesztett zöldségnövénye. A hazai zöldségfogyasztás 20%-át adja, ami kedvező, mivel jótékony hatással van az egészségre a benne lévő sok antioxidáns miatt. Ezek közül fontos kiemelni a likopint, a paradicsom piros színanyagát, amelynek ez a termés az elsődleges forrása az emberi szervezet számára. Elsősorban azonban napjainkban inkább íze miatt fogyasztják, mint egészségtudatosságból, ezt pedig a termés cukor-sav aránya határozza meg.

A frisspiaci paradicsomot (*Solanum lycopersicum*) korszerű üvegházakban termelik, ahol zömében biológiai növényvédelmet alkalmaznak, és a környezeti tényezők helyes szabályozásával növelik a hozamot. Ezekben a létesítményekben egész éven át folyik a növénytermesztés, ehhez viszont kiegészítő világítást kell alkalmazni, hogy a növények igényeinek megfelelő mennyiségű fény álljon rendelkezésre a termesztőberendezésben. Erre a célra egyre elterjedtebb a LED-ek használata, ami nagy lehetőséget rejt magában, mivel a fény hullámhosszát és a megvilágítás intenzitását is lehet velük szabályozni. Mindezzel elérhető, hogy a növényi reakciókhoz igazítva a megvilágítás még inkább hozzájáruljon a növények fejlődéséhez és a kívánt minőségű és mennyiségű piaci termék keletkezéséhez.

A fény és annak intenzitása és spektrális összetétele ugyanis két szempontból is alapvető a növénytermesztésben, meghatározó a fotoszintézis folyamatában, és alapvető a növekedés-fejlődés fény általi szabályozásában. Az élőlények számára az energiát a fényenergia biztosítja, amely a fotoszintézis révén átalakul. Ezenfelül a fotoszintézis biztosítja az élethez nélkülözhetetlen szervesanyagot és az oxigént. Mivel a növények minél jobban igyekeznek kihasználni az adott fényviszonyokat, és többek között a paradicsom esetében minél több cukrot a termésbe építeni, különböző fotoreceptorokat fejlesztettek ki, amelyekkel a fényre, mint jelre válaszolnak. Így ezek a fotoreceptorok szabályozzák a fény felé mozgást, a növény növekedését, és közvetve, eredményesebb fotoszintézissel befolyásolják a termések beltartalmát.

Az üvegházi pótmegvilágításon kívül a LED-eket használják még a palántanevelésben és a vertikális farmokon. A pótmegvilágítás az őszi, téli rövidülő nappalokat reggeli és esti pár órás kiegészítő világítással hosszabbítja meg. Palántanevelés során polcos rendszereken a teljes fotoperiódust mesterséges világítással biztosítják. A növénygyárakban, vertikális farmokon a

növényeket egész vegetáció során LED lámpák alatt termesztik, és ezekben a rendszerekben leginkább levélzöldségekkel foglalkoznak.

A paradicsom termések polcon tarthatósága is egy fontos szempont, meghatározza a frissességet és az egészségességet, ezért próbálják ezt a tulajdonságot fejleszteni a paradicsomnál is. Erre egy lehetséges mód az UV-C kezelés, amelyet fertőtlenítésre, illetve betakarítás után a kórokozók gyérítésére használnak, ezzel növelve az eltarthatóságot, ám a kezelésnek hatása van a növény antioxidáns-rendszerére is.

A kutatásom célja az volt, hogy felmérje, hogyan szabályozhatják a különböző összetételű fényspektrumok és fényintenzitások a fotoszintetikus aktivitást, a növekedést, a termés mennyiséget és a termések bioaktív vegyületeinek szintézisét a *Solanum lycopersicum* 'Vilma' esetében. Emellett vizsgáltam, hogy a betakarítás utáni UV-C kezelés hogyan hat a termések tárolhatóságára. A fény spektrális összetételét a növénynevelés során úgy állítottuk be, hogy minél hatékonyabb legyen a fotoszintézis, amelyet segíthet a vörös-távoli vörös fények növekedésre gyakorolt hatása és a zárt lombzat alsóbb rétegeinek zöld fény általi aktiválása. Emellett megvizsgáltuk a fényintenzitás és az eltérő vörös-kék arány hatását is.

2 Szakirodalmi áttekintés

2.1 A paradicsom hazai termesztésének és fogyasztásának jelentősége

A paradicsom (*Solanum lycopersicum*) az egyik legjelentősebb termesztett zöldségnövény a világon és hazánkban is. Itthon, szabadföldön majdnem 1700 hektáron több mint 137 000 tonna ipari paradicsomot termesztnek feldolgozásra (http1). Frisspiaci terméknek a zöldségajtató felületek 10 %-án (320 ha) 120-140 ezer tonna ajtatott paradicsomot állítanak elő egy év alatt. Ennek legnagyobb hányada fürtös és bogyós típusú, és a maradék 20-25 % koktél- és cseresznyeparadicsom (Kocsis, 2024).

Mint a legtöbb zöldségnövény, a paradicsom sem kalóriadús, nagyon magas víztartalma miatt a benne található oldható szárazanyag-tartalom ($^{\circ}\text{Brix}$) 4-7 % között van. Az ízt cukor- (2-4 %) és a savtartalmának (0,3-0,6 %) aránya határozza meg, általános vélemények szerint a 7-10 körüli cukor-sav hányadosnál a legjobb ízű a paradicsom. Napjainkban egyre nagyobb jelentősége van az egészséges friss élelmiszereknek, és egyre több a tudományos publikáció a paradicsom egészségre gyakorolt jótékony hatásáról, amely a benne található antioxidáns vegyületeknek, azok közül is leginkább a piros színanyagának, a likopinnak tulajdonítható. Az emberi szervezet számára a paradicsom a legjelentősebb likopin forrás (Pék et al., 2007). A szárazanyag-tartalmat és egyéb beltartalmi mutatókat, valamint a termésmennyiséget és növekedési erélyt a fajtán kívül a termesztés módja és a növényekre ható környezeti tényezők határozzák meg, amelyeket egy termesztőberendezésben kontrollálni lehet.

2.2 Természetes fény és kiegészítő világítás

A fény az elektromágneses sugárzás látható hullámhosszú tartománya. A legintenzívebb sugárzás a Napból ebben a tartományban érkezik. Az emberi szem a 380-760 nm közötti sugárzást látja (380-450 nm: ibolya, 450-500 nm: kék, 500-570 nm: zöld, 570-591 nm: sárga, 591-610 nm: narancssárga, 610-760 nm: vörös). A növények is az ebből a tartományból érkező sugárzást hasznosítják a fotoszintézisben, csak valamivel szűkebben: 400-700 nm között, ezért ezt fotoszintetikusán aktív sugárzásnak nevezzük (PAR: Photosynthetically Active Radiation) (Tuba & Csintalan, 2009).

A távoli vörös fotonok (701–750 nm) fotoszintetikusán nem aktívak, ezért nem vesznek részt a fotoszintetikusán aktív sugárzás meghatározásában. Viszont a távoli vörös fotonok

rövidebb hullámhosszú fotonokkal kölcsönhatásban növelték a levelek fotokémiai hatékonyságát és a lombkorona fotoszintézisét (Zhen & Bugbee, 2020). Ezt több növényfajnál is bebizonyították, így az eredmények azt támasztják alá, hogy a távoli vörös fotonokat bele kell foglalni a PAR definíciójába (Zhen & Bugbee, 2020). Ez az ePAR (extended PAR) 400-750 nm között.

Magyarországon a megtermelt paradicsom körülbelül 50 %-a hajtatásból származik, legnagyobb részük korszerű üvegházakból, ahol már nincs nagy különbség a hazai és a külföldi termesztéstechnológia színvonala között. A kontrollált növénytermesztésnél (Controlled Environment Agriculture: CEA) a termesztés folyamán szabályozva vannak a növények növekedését és fejlődését befolyásoló paraméterek. Az automatizált üvegházi termesztés is ebbe a kategóriába tartozik, emellett napjainkban egyre elterjedtebb a beltéri növénytermesztésben a vertikális farmok és a növénygyárak használata. (A vertikális farmokon egymás fölött elhelyezett polcokból álló rendszeren megvalósított növénytermesztés folyik, a növénygyár kifejezés a nagyüzemszerű beltéri növénytermesztést foglalja magában.) Ezek hatékony üzemeltetéséhez szükséges a tápanyagösszetétel, a páratartalom, a hőmérséklet és a fény kontrollja is.

A mesterséges megvilágítást az üvegházakban már régóta használják a termesztési időny meghosszabbítására és a terméshozam növelésére. Hollandiában, ahol a paradicsom az egyik fő növény a zöldségtermesztésben, a hajtatófelületek 40 %-án alkalmaznak pótmegvilágítást (Kocsis, 2024). Beltéri növénytermesztésnél szinte kizárólag LED-eket használnak a fény különböző hullámhossz-összetételének és intenzitásának a beállítására. A fényforrások alkalmazásának fejlesztésénél elsődleges szempont a költséghatékonyság (Török, 2023). A fénykibocsátó diódák (LED-ek) kiegészítő vagy egyedüli világítási rendszerként való alkalmazása a növénytermesztésben nagy lehetőséget rejt magában kis méretük, hosszú élettartamuk, hullámhossz-specifikusságuk, hideg kibocsátó felületük és lineáris fotonkimenetük miatt. A LED-ek kimenő hullámsávja sokkal szűkebb más világítási forrásokéhoz képest, ezért az adott növénykultúra termesztéséhez megfelelő hullámhosszok meghatározása nagyobb jelentőséget kap. A növényi reakciókhoz igazított hullámhosszok hatással vannak a növény morfológiájára, fotoszintézisére, tápanyagfelvételre, a kórokozókkal és kártevőkkel szembeni ellenállásra és a termék beltartalmára. Így a LED-ekkel célzottan javíthatjuk a növények egyes jellemzőit (Massa et al., 2008). A megfelelő fényrecept összeállításához a spektrális eloszláson kívül a megvilágítás intenzitását (PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density, fotoszintetikusan aktív fotonáram-sűrűség ($\mu\text{mol}/\text{m}^2/\text{s}$)) és a fotoperiódus hosszát is figyelembe kell venni (Boros, 2021).

2.3 Fotoszintézis és fluoreszcencia

Fotoszintézis során a fényenergia kémiai energiává alakul, és ennek segítségével szerves anyagok képződnek. Ez egy redox folyamat, ahol az elektron egy elektrondonorról egy akceptorra úgy jut át, hogy a tagok közötti redoxpotenciál különbség áthidalásához fényenergiát használ. A növényeknél az elektrondonor a víz, az elektronakceptor pedig a szén-dioxid. Ezek alapján a fotoszintézis egyenlete:



A fotoszintézis végterméke, ha $n=6$, egy 6 szénmolekulából álló hexóz és 6-6 molekula víz és oxigén. 470 kJoule kötődik kémiai energiaként 1 mol szén-dioxid redukciója alatt (Allaga & Bódis, 2014; Tuba & Csintalan, 2009).

A fotoszintézist a fényszakaszra, a CO_2 -redukciós szakaszra és a diffúziós folyamatok szakaszára tudjuk felbontani. A fényszakaszban fizikai és fotokémiai folyamatok mennek végbe, amelyek a fény intenzitásától lineárisan függenek, ezek a fényenergia elnyelése, energiaszállítás a fotokémiai reakciókban közvetlenül részt vevő pigmentekre és a fényenergia átalakítása kémiai energiává. A vízbontás, NADPH- és ATP-képződés szintén itt mennek végbe körülbelül 10^{-15} - 10^{-3} másodperc alatt. A CO_2 -redukciós szakaszban történik a fényszakasz termékeivel (ATP és NADPH) a szén-dioxid fixációja és a szénhidrát szintre történő redukciója. Ezek közvetlenül nem fényigényes folyamatok, de nappal mennek végbe 10^{-4} - 10^{-2} másodperc alatt. A két szakasz egymástól elválasztható. A diffúziós folyamatok szakasza felelős a szükséges szén-dioxid felvételéért és a keletkezett oxigén leadásáért, vagyis a kloroplasztiszok és a környező légtér közötti gázcserét biztosítja, és egy időben megy végbe a légzéshez szükséges gázcserével (Allaga & Bódis, 2014; Tuba & Csintalan, 2009).

2.3.1 Kloroplasztisz

A fotoszintézis fény- és CO_2 -redukciós szakasza a kloroplasztiszban, a növényi zöld színtestben megy végbe. A kloroplasztisznak saját DNS-e van, a számuk a sejtben fajspecifikus, de függ a fényklímától is, körülbelül 30-100 db/sejt a leggyakoribb (Tuba & Csintalan, 2009).

A kloroplasztiszok a proplasztiszokból alakulnak ki úgy, hogy fényen a proplasztisz belső membránja betüremkedik, így létrejönnek a tilakoidok, a zsákszerű képződmények. Ha ezek egyszerű kettős membránból állnak és egyenesek, akkor sztrómatilakoidoknak hívjuk őket. Ha önmaguk körül feltekerednek, gránumtilakoidokká alakulnak. A kloroplasztisz alapállománya

a szróma. A kloroplasztisz tartalmazhat keményítőszemcséket, ha van benne gránum, akkor plasztoglobulusokat is, amelyek lipideket raktároznak (Tuba & Csintalan, 2009).

2.3.2 A fotoszintézis színanyagai

A fényenergia megkötését a fotoszintetikus pigmentek végzik, ez a fotoszintézis első lépése. Ezeknek két nagy csoportja a zöld és sárga színanyagok, vagyis a klorofillok és a karotinoidok. Mindkettő jól abszorbeálja a látható fényt, mivel delokalizált elektronfelhő húzódik végig a molekulájukban, és könnyen gerjeszthetők ezek külső elektronjai (Fehér, 2019).

A zöld színű klorofillok a legtöbb növényben jelen vannak, a magasabbrendűeknél a klorofill-a és klorofill-b. Alapszerkezetük a Mg-tartalmú tetrapirrolváz, és az ezt észteresítő fitollánc. A klorofill-a II. pirrolgyűrűjének harmadik szénatomjához metil-csoport, míg a klorofill-b-nél aldehidcsoport kapcsolódik. A fényelnyelő maximuma a klorofill-a-nak a vörös tartományban a 660 nm-nél, a másiknak a 643 nm-nél van. A másik fő abszorpciós sáv a kék tartományban van (Fehér, 2019; Tuba & Csintalan, 2009). A sárga színű karotinoidok erősen telítetlen 40 szénatomos poliizoprén származékok, amelyek minden fotoszintetizáló élőlényben jelen vannak. Két csoportjuk az oxigént nem tartalmazó karotinok (legfontosabb a béta-karotin) és az oxigént tartalmazó xantofillok (legfontosabbak a lutein, zeaxantin, anteraxantin, neoxantin és violaxantin). Abszorpciós sávjuk a kék tartományban található. A karotinoidoknak fontos szerepük van a tilakoid membránok stabilizációjában, a xantofillok az energia megkötésében és átadásában vesznek részt, ezenkívül védőpigmentek (Tuba & Csintalan, 2009). Az antocián flavánszármazék, a növények kékes-lilás elszíneződéséért felel, a fotoszintézisben nincs szerepe, de befolyásolja a levelek fényáteresztését és fényvisszaverését (Tuba & Csintalan, 2009).

2.3.3 A fényenergia abszorpciója

A látható fény energiája (147-587 kJ/mol) gerjesztett állapotba hozza az elnyelő pigmentek delokalizált elektronjait, melyek így alkalmasak lesznek fotokémiai reakciók elindítására. A gerjesztett állapotból vissza alapállapotba hőkisugárzással, belső konverzióval és fénykisugárzással (fluoreszcencia) juthat a molekula. Az elnyelt energia ilyenkor nem hasznosul a fotoszintézisben. A fotokémiai reakciókban résztvevő klorofillmolekulák egy elektrondonor és egy elektronakceptor között közvetítik az elektront az abszorbeált fényenergia

segítségével. Erre a klorofillmolekuláknak csak 1 %-a képes, melyek a reakciócentrumokban találhatóak. Az ezen kívül elhelyezkedő klorofilok és karotinoidok a gerjesztési energiát egy másik alapállapotban lévő molekulának adják át, ez az energiatranszfer, ha kémiai azonos molekulák között játszódik le, és energiamigráció, ha kémiai különböző pigmentek között. Így az elnyelt foton energiája eljuthat a reakciócentrumban lévő elektrontranszfert végző klorofill-a molekulához (Tuba & Csintalan, 2009).

A legtöbb növényben kétfajta fotokémiai rendszer található. Mindkettő reakciócentrumból és antennapigment molekulákból áll, ezt körülveszi a klorofill-a/b-pigment-fehérje rendszer, amely a fényt gyűjti. Az 1-es pigmentrendszerben kevesebb a klorofill-b, és több a klorofill-a mennyisége, mint a 2-es pigmentrendszerben. A pigmentrendszerek karotinoid tartalmát tekintve az 1-esben legnagyobb részt karotin, a 2-esben leginkább xantofill található. A pigmentrendszerek reakciócentrumbaiban található klorofill-a formák nevüket az abszorpció maximum hullámhosszáról kapták: az 1-esben a P₇₀₀, a 2-esben a P₆₈₀ klorofill-a forma található. A második pigmentrendszer fluoreszkál, az első nem (Allaga & Bódis, 2014; Fehér, 2019; Tuba & Csintalan, 2009).

2.3.4 Fluoreszcencia

A fluoreszcencia során az elnyelt fény egy része nem alakul át kémiai energiává, hanem fény formájában a növény gerjesztett elektronjai visszasugározzák a környezetbe. Ha nagy a fluoreszcencia, akkor rossz a növény fényhasznosítása, melynek oka a növény károsodásából is adódhat. A károsodást a fluoreszcencia már akkor jelzi, amikor még nincsenek látható tünetek a növényen, így mérése felhasználható a stressztényezők jellemzésére. A fluoreszcencia lehet azonnali, ha a reakciócentrumok telítettek, és lehet késleltetett, ha az elektrontranszportlánc egyik tagja blokkolva van.

2.4 Fotoreceptorok

A fotoreceptorokat a növények a napfény érzékelésére használják, a fényre, mint jelre reagálnak. A fotoreceptorok érzékenyek a fény mennyiségre (fotonok száma), a fény minőségre (hullámhossz-függőség), és a fényexpozíció időtartamára (Taiz et al., 2015). Az UV-B sugárzást az UVR8 fehérje érzékeli, az UV-A és a kék hullámhosszokat a kriptokrómok, fototropinok és a zeitlupe-k, a vörös és a távoli vörös fényt a fitokrómok. A legtöbb fotoreceptor fényelnyelő pigmentekhez, vagyis kromoforokhoz kötődő fehérjékből áll, ennek köszönhető a

spektrális érzékenység. A kromofor felelős a fényelnyelésért, míg a fotoreceptor fehérje a jelátvitelt szabályozza. A különböző fotoreceptorok jelátviteli útvonalai kölcsönhatásba lépnek, így integrálva a fénykörnyezetből származó információkat (Buchanan et al., 2015).

Az UV-B tartományban elnyelő receptoroknak szerepük van egyes gének expressziójának indukciójában, és csökkentik a hipokotil megnyúlását. A kriptokrómok fő szerepe a de-etiolációban, a cirkadián óra beállításában és a virágzásindukcióban van. Többek között a fototropinok irányítják a fototropizmust, a kloroplasztisz mozgását és a sztómanyitódást, valamint a hipokotil megnyúlásának és a levélkiterülések a szabályozásában is részt vesznek. A zeitlupe-knak a cirkadián óra és a virágzás fotoperiodizmusának szabályozásában van nagy szerepük. A fitokrómok a csírázásban, de-etiolációban, árnyékelkerülésben, virágzásindukcióban és a cirkadián óra beállításában vesznek részt (Allaga & Bódis, 2014; Buchanan et al., 2015). A következőkben a kriptokrómat, a fototropinokat és a fitokrómat mutatom be részletesebben a kísérleti eredményekben tapasztalt hatásuk miatt.

2.4.1 Kriptokrómok

A kriptokrómok olyan fotoreceptorok, amelyek a kék fényre adott válaszokat közvetítik. A flavin-adenin-dinukleotid kromofor aktiválása konformációs változást okoz a kriptokrómban, ezért más fehérjepartnerekhez is tud kötődni, így például közvetlenül is kötődhet specifikus DNS-kötő fehérjékhez, és szabályozhatja azok aktivitását. Tartós kék fény besugárzásnál a kriptokrómok elősegítik a hipokotil megnyúlásának visszaszorítását, a sziklevelek kiterülését, a membrán depolarizációját, a levélnyel megnyúlásának gátlását. A fitokróm és a kriptokróm egyaránt gátolja a szár megnyúlását. Kölcsönhatásuk fontos a virágzás szabályozásában, és a cirkadián ciklusok fenntartásához (Taiz et al., 2015). Utasi et al. (2023) kutatásukban korrelációt tártak fel a zöld fény mennyisége és a CRY 2 gén aktivitása között, ami alátámasztja, hogy a zöld fény a morfológiai tulajdonságokat is befolyásolhatja a kriptokróm által közvetített útvonalakon keresztül.

2.4.2 Fototropinok

A fototropinok is a kék fényre adott fotoválaszt közvetítik, és érzékenyek a kék fény intenzitására. A fototropinok a plazmamembránban helyezkednek el, két flavin-mononukleotid kromoforjuk van, amelyek fény hatására kovalensen kötődnek a molekulához, ami így konformációs változást szenved és kináz aktivitást mutat. A fototropikus válaszok

közvetítésében, a levélmozgások és a levélkiterülés aktiválásában is szerepet játszanak, emellett a fotoszintetikus hatékonyság és a növényi növekedés optimalizálását segítik elő, különösen gyenge fényviszonyok mellett. A fototropinok közvetítik a kloroplasztiszok akkumulációját és fény elkerülési reakcióját gyenge és erős megvilágítás esetén. A fototropin aktiválja a plazmamembrán H^+ -ATP-ázait, és szabályozza a sztómanyitódást (Taiz et al., 2015).

2.4.3 Fitokrómok

A fitokrómok kékeszöld színűek, két fehérjealegységből és egy-egy lineáris tetrapirrol kromofór csoportból épülnek fel. A sejtplazmában és sejtmagban is jelen vannak. Egyes növényekben, például Arabidopsisban a fitokrómokat öttagú géncsalád kódolja: PHYA, B, C, D, E. A gének által kódolt fehérjék hasonlítanak szerkezetükben, de a különbségek eltérő funkciókat eredményeznek (Allaga & Bódis, 2014).

A fitokrómok két különböző formában léteznek, és át tudnak alakulni egymásba. A biológiailag inaktív Pr forma abszorpciós maximuma a vörös hullámhossz-tartományban van. A foton elnyelésével megváltozik a Pr szerkezete, és kialakul a Pfr forma, ez a fitokrómok biológiailag aktív formája: ez indítja el a jelátvitelt. Fényelnyelési maximuma a távoli-vörös hullámhossz-tartományban van, foton elnyelésével visszaalakul Pr formává, vagyis inaktiválódik. Ez a fotoreverzibilitás. Az egymásba alakulás újra és újra megtörténik, de az átalakulás aránya függ a fitokróm típusától, a fény hullámhosszától és intenzitásától (Allaga & Bódis, 2014). Így a fitokrómok információt adnak a növény számára a közelben lévő vörös és távoli vörös fény arányáról. Ez azért fontos, mert a levelek elnyelik a vörös fényt, míg a távoli vöröst átengedik. Ezért az alacsony vörös – távoli vörös arány a versenytársak általi árnyékolást jelzi. Ez az Arabidopsisban például gátolja a magvak csírázását, és árnyékkerülési reakciót vált ki a növekedés során (Buchanan et al., 2015). Fontos, hogy a fitokrómkészlet soha nem alakul át teljesen Pfr vagy Pr formákká csak vörös, vagy csak távoli vörös besugárzás után, mert a formák abszorpciós spektruma átfedi egymást. Vörös besugárzás után a fitokrómoknak mindössze 88%-a lesz Pfr. Távoli vörös fény után pedig 98% Pr és 2% Pfr egyensúly érhető el (Taiz et al., 2015). A Pfr forma fény nélkül is átalakulhat Pr formává (ún. sötétkonvenzió). A Pfr megszűnhet még lebomlással. A Pr és Pfr formák foszforiláltsági állapotukban is különböznek.

A fotomorfózis a fény hatására bekövetkező morfológiai változás, melynek receptora a fitokróm. Eltérő fényintenzitást közvetítő hatására példa a burgonya etiolált hajtása sötétben, és erőteljes fényhajtásai a félhomályban, a káposzta belső világos és külső zöld levelei, valamint

a spárga és a zeller halványítása. A saláta csírázását a vörös fény serkenti, a távoli vörös pedig gátolja, és az utoljára kapott fényimpulzus hullámhossza a meghatározó. Fitokróm hatás lehet morfológiai változással nem járó fényreakció is, például a fenil-alaninammónia-liáz enzim szintézisét a sötétvörös fény növeli. Beszélhetünk rövid idejű (perc-óra) megvilágítást igénylő reakciókról (például levelek alvó mozgása hüvelyeseknél, vagy zabnál a vörös fény serkentheti a koleoptil, és gátolja a mezokotil növekedését) és hosszabb időt (több napot) igénylő reakciókról (például a virágindukció, antociánok szintézise, hipokotil megnyúlásának gátlása, sziklevelek megnagyobbodása, etilén előállítás) (Allaga & Bódis, 2014; Taiz et al., 2015). A sejtmagba jutva a fitokrómok szabályozzák a génexpressziót (Taiz et al., 2015).

A vörös fény hatásai távoli vörös fénnel csak korlátozott ideig visszafordíthatók, ennek az a magyarázata, hogy a fitokróm által szabályozott morfológiai válaszok egymáshoz kapcsolódó reakciók többlépcsős sorozatának végeredményei. A Pfr elsődleges tevékenysége befejezéséig lehet visszafordítani a folyamatokat. Például a disznóparéj és az Arabidopsis szármegnyúlásának vörös fénnel való gátlása percekben belül megfigyelhető (Taiz et al., 2015).

2.5 A fény hullámhosszának és intenzitásának hatásai

A különböző spektrumok növényfejlődésre gyakorolt hatásának mögöttes mechanizmusai nem ismertek részletesen, de számos kutatás foglalkozott a spektrumok összehasonlításával, együttes és egyéni, gátló és serkentő hatásaival. Sok vizsgálatban foglalkoznak a különböző hullámhosszú fények összetételével, ezeknek egymáshoz viszonyított arányával, a besugárzás intenzitásával vagy hosszával. Egyes kutatásokban, a mesterséges fényt, mint kiegészítő világítást használják reggel vagy este, máshol a teljes vegetációs idő alatt csak mesterséges fényt kapnak a növények. Számos kísérletben csak a palántákat vizsgálják, nem várják meg a terméshozást (Massa et al., 2008).

2.5.1 Spektrumok hatása egyenként

Csak egy szint alkalmazó kísérletnél X. Liu et al. (2012) nem értek el pozitív hatásokat, például a narancs, zöld és vörös megvilágítású paradicsompalánták levélszíne sárgászöld volt, magasabbak és gyengébbek lettek, a fluoreszcencia értékek is alacsonyabbak voltak, mint a fehér fényű lámpák alatt növekedők, a gyökernövekedés különösen gyenge volt a vörös és narancs kezelése alatt. A kék fénykezelésnél a levelek erezte lilás volt. A zöld megvilágítás

alatt volt a nettó fotoszintézis a legalacsonyabb az összes kezelés közül (kék, zöld, narancs, vörös, kék-vörös, kék-zöld-vörös).

A kék fény kiegészítő világításként más színekkel kombinálva a lombkorona méretét stimulálja, a termés színét javítja, a levélhalási indexet csökkenti, növeli a terméshozamot, javítja a termés minőségét (magasabb C-vitamin és glükóz koncentráció) és a betegségekkel szembeni ellenállóképességét (alternária és fonálféreg), növeli a fotoszintetikus kapacitást, a vízmegtartó képességet, serkenti a sztóma nyitódását (Xu et al., 2012). A kék fény növekvő aránya a fényreceptben csökkenti a növény magasságát, a teljes száraz tömeget (kompaktabb morfológia), a levélfelületet, a levélhossz/szélesség arányt és rövidebb szárat eredményez (Kalaitzoglou et al., 2021). A nagy mennyiségű kék fény serkenti a fehérje, karotinoid, antocianin és flavonoid bioszintézist a paradicsom levelében, amit a kriptokróm szabályoz (Utasi et al., 2023).

A vörös fény nélkülözhetetlen, mivel a klorofillok és fitokrómok egyik elnyelési csúcsa (Tuba & Csintalan, 2009). Önmagában alkalmazva a paradicsompalánták fotoszintézisének sebessége legalább harmadára csökkent a kék-vörös kezelések eredményeihez képest, valamint a növények abnormális szárnyúlást mutattak (Naznin et al., 2019).

A távoli vörös szabályozza a fitokróm által közvetített morfológiai és fiziológiai növényi válaszokat (Tuba & Csintalan, 2009). A távoli vörös fénykiegészítés hosszabb növényeket eredményez, de nem befolyásolja a levelek számát. Azokban a kezelésekben, amelyekben teljesen hiányzott a távoli vörös, a levélterület és a növény száraz tömege alacsonyabb volt, viszont az egységnyi levélterületre jutó klorofill és karotinoid tartalom, és a klorofill-a és klorofill-b aránya szignifikánsan magasabb volt (Kalaitzoglou et al., 2019).

A fény zöld tartománya mélyen behatol a levél mezofillumába és az alsó lombkoronarétegekbe, elősegíti a fotoszintézist, a gázcserét és a szén-gyapadást a legmélyebben található kloroplasztiszokban és a belső lombkoronában (Terashima et al., 2009).

2.5.2 A vörös és kék fény együttes hatása

A vörös és kék fény együttes alkalmazása akár kiegészítő világításként reggel vagy este, akár a teljes nevelés alatt jótékony hatással van a növénytermesztésre, és a arányuk is meghatározó. Több kutatásban is tapasztalták, hogy a vörös-kék fény változásokat eredményezett a morfológia és a termésmennyiség tekintetében: elősegítette a paradicsom növények növekedését, fokozta a szárazanyag felhalmozódást, a gyökerek hosszát és számát, a levelek és elágazódások számát, megnövelte a levélfelületet, a hajtásszámot, a teljes

terméstömeget és a növényenkénti termések számát, valamint a növény száraz és friss tömegét. Nagyobb volt a túlélési arány a paradicsompalántákon vörös-kék fénykezelés alatt. A fotoszintézis folyamatát úgy befolyásolta, hogy aktiválta a kulcsfontosságú fotoszintetikus enzimeket, elősegítette a fotoszintetikus pigmentek (klorofilok és karotinoidok) (viszont (Vitale et al., 2022) kutatásában csökkentette) és a fotoszintetikus termékek szintézisét és felhalmozódását a levelekben, és növelte a fotoszintetikus kapacitást és a fotoszintézis sebességét. A vörös-kék fénykiegészítés növelte a gázcsere paraméterek szintjét és a Rubisco aktivitást a paradicsomlevélben. A termésekben együttesen jelentősen fokozták a klorofill lebomlását, a likopin a β -karotin, az összes oldható szárazanyag, a fenolok és a C-vitamin koncentrációját pedig növelték (Naznin et al., 2019; Ngcobo et al., 2022; Wang et al., 2022). Vitale et al. (2022) kutatásában a vörös-kék fény hatására a termésekben alacsonyabb volt az aszkorbinsavtartalom, de magasabb volt a polifenoltartalom és az antioxidáns kapacitás a fehér fénykezeléshez képest.

2.5.3 Távoli vörös kiegészítés a fényreceptekben

Ha fényreceptben a vörös-kék fényt távoli vörössel egészítették ki, akkor arra a következtetésre jutottak, hogy a vörös-távoli vörös arány csökkenésével (vagyis, ha a receptben sok volt a távoli vörös fény) a növény magassága, biomasszája, a levélnyel szöge, levélhossz/szélesség arány és a levélterület nőtt (Zhang et al., 2019), az egységnyi levélterületre eső levéltömeg csökkent, a virágzás felgyorsult, a növényenkénti termések száma és friss tömege, valamint a pirosra vált termések aránya szintén nőtt (Kalaitzoglou et al., 2019), az érett paradicsom termésének oldható cukortartalma viszont kismértékben csökkent (Zhang et al., 2019). A paradicsombogyókban a távoli vörös kiegészítés javította az általános fizikai-kémiai tulajdonságokat, mint például az összes oldható szárazanyag, a titrálható savasság és a pH, és ez az eredmény úgy is megmutatkozott Kim et al. (2020) kutatásában, hogy fogyasztókkal vizsgáltatták a paradicsomok érzékszervi tulajdonságait (aromát, édességet, savasságot és állagot), akik magasabbra értékelték a vörös-távolivörös LED-del kiegészítve nevelt paradicsomokat, mint a csak vörös LED-del kiegészítetteket vagy a nagynyomású nátriumlámpával kiegészítetteket, ugyanabban az érettségi stádiumban lévő paradicsomokat. Ez utóbbiak rendelkeztek a legkevésbé kívánatos minőségi tulajdonságokkal. Ji et al. (2019) azt tapasztalták, hogy a távolivörös kiegészítés a pillanatnyi nettó fotoszintézis sebességét nem befolyásolta, Zhang et al. (2019) kutatásában homogénebb lett a fényeloszlás a lombkoronán belül, viszont Kalaitzoglou et al. (2019) a levelek abszorpciójának csökkenéséről számolt be.

Továbbá a fényrecepthez hozzáadott távolivörös súlyosabb betegségtüneteket eredményezett a *Botrytis cinerea* fertőzés alkalmával Ji et al. (2019) kutatásában. Kalaitzoglou et al. (2019) azt állapították meg, hogy a paradicsom növények távoli vörös nélküli termesztését nem lehet kompenzálni egy egyszerű nap végi negyedórás távoli vörös kiegészítő kezeléssel, viszont a mesterséges fény vörös: távoli vörös arányának a napfény arányértéke fölé emelése negatívan hat a paradicsom növények növekedésére és korai termésére. Zhang et al. (2019) következtetése viszont az volt, hogy a félórás, a másfélórás, és az egész napos távoli vörös kiegészítés eredményei között nincs szignifikáns különbség.

2.5.4 Zöld fény hozzáadása a növénynevelő világításokhoz

A kék-zöld-vörös fényrecepteket a fehér fénnel és a vörös-kék fénykezelésekkel hasonlítják össze a leggyakrabban. A zöld fény hozzáadása a fényrecepthez csökkentette a magasságot (X. Liu et al., 2012; Vitale et al., 2022) és a virágok számát (Vitale et al., 2022)., lineárisan megnövelte a levélszámot, a fajlagos levélterületet, a szár hosszát, a csomópontok számát és a növényi biomasszát (Kaiser et al., 2019; Vitale et al., 2022). A zöld fénykiegészítés a nettó fotoszintézis sebességét és a sztóma vezetőképességét eltérően befolyásolta: javította Vitale et al. (2022) kutatásában, nem befolyásolta a lombkorona felső és középső levélrétegében Kaiser et al. (2019) kísérletében, és csökkentette a zöld fény arányának növekedésével Trojak et al. (2022) eredményeinél. A II. fotokémiai rendszer kvantumhozamát növelte a zöld fénykiegészítés (X. Liu et al., 2012; Vitale et al., 2022). A középső levélréteg leveleiben a klorofill a:b aránya és a karotinoid koncentrációja a zöld fény százalékos arányával nőtt (Kaiser et al., 2019; X. Liu et al., 2012). Trojak et al. (2022) kutatásában arra az eredményre jutott, hogy a zöld fény arányának növekedésével a transzspiráció és az antociánok szintje csökkent, javult a vízfelhasználás hatékonysága, a növények hatékonyabban használták a kék fényt.

2.5.5 A spektrumok egymáshoz viszonyított aránya

A spektrumösszetétel megtervezésekor amellet, hogy milyen spektrumokat használunk a fényreceptben, meg kell határoznunk ezek egymáshoz viszonyított arányát is. A spektrumok növényfejlődésre gyakorolt pozitív hatásait fentebb láthattuk külön-külön színenként elemezve, sőt a kombinált színekét is. A tényleges hatás azonban nagyban függ az alkalmazott spektrumok arányától, mivel nem megfelelő beállításnál elnyomhatják, gátolhatják egymás pozitív hatását, és a számunkra/növények számára kedvezőtlen feltételek nem kívánt változásokat

eredményezhet a növények életében. Az arányok mellett a növény életének különböző periódusaiban változhatnak, például palántanevelésnél célszerűbb magasabb arányban alkalmazni a kék fényt a vörössel szemben, hogy ne nyúljanak meg a növények. Később viszont a megfelelő vegetatív és generatív fejlődéshez a vörös fény túlsúlya szükséges. Ez a két spektrum a legfontosabb, ha emellett használunk másokat is, akkor azok jóval alacsonyabb arányban elegendők a fényreceptben. Továbbá nem utolsó szempont a kék fény előállításának magas energiaköltsége, amelyet csökkenthetünk azáltal, hogy a kék fény arányát csökkentjük a receptben a növények számára optimális szintig.

A vörös-kék fény különböző arányát tekintve Naznin et al. (2019) tanulmánya szerint a 10:1 vörös-kék arány a leghatékonyabb kezelés az 5:1 és 19:1 aránnyal szemben, míg Deram et al. (2014) kutatásában az 5:1 arányú fénykezelés teljesített a legjobban a növények életfolyamatait tekintve. Utasi et al. (2023) kutatásában megfigyelték, hogy a vörös és a zöld fény mennyisége pozitívan befolyásolta a szénhidráttartalmat, a virágzó növények számát, a biomasszatermelést, a nettó fotoszintézist, a levélfelület méretét és a klorofill tartalmat. A kék fény növekvő aránya növelte a karotinoid tartalmat, a fehérje-, antocianin- és flavonoidtartalmat és a sztóma konduktanciát. Ezen eredmények alátámasztják, hogy fontos beállítani a megfelelő spektrális összetételt, ezen belül különös tekintettel a vörös: kék arányra.

2.5.6 A kiegészítő megvilágítás intenzitása

A kiegészítő világítás jelentős előnyei mellett ismert, hogy viszonylag nagy mennyiségű energiát fogyaszt. A fényintenzitás vizsgálatával optimalizálhatjuk a növények fotoszintetikus reakcióit az energiaköltségek minimalizálása mellett.

A termésükért termesztett növények magasabb szénhidráttermelést és így magasabb napi PAR-t igényelnek, mint a vegetatív növényi részekért termesztett növények. $17,3 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ PAR mellett ($300 \text{ } \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 16 óra napi megvilágítás), a fényfelhasználás hatékonysága $1 \text{ g szénhidrát/mol PAR}$. Folyton növő paradicsomnál a fotoszintézisből származó szénhidrátok körülbelül 65-75%-át el kell juttatni a termésekhez, hogy növekedjenek. Így a napi PAR növelése jó lehetőség a gyümölcstermelés növelésére.

Természetes körülmények között alacsony PPFD mellett is hatékonyan kell tudniuk hasznosítani a fényt a növényeknek, amihez több klorofillra van szükségük. Magas besugárzási körülmények között a levelek kutikulája vastagabb, alacsonyabb a levélterületük és a klorofillkoncentrációjuk (túlzott vagy hosszan tartó erős besugárzás esetén a klorofill károsodhat, vagy meg is semmisülhet), ezért magasabb a reflektanciájuk és alacsonyabb a

fényabszorpciójuk, mint alacsony besugárzás esetén (Ke et al., 2022). A $350 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ -nál nagyobb PPFD-t az exponenciális növekedési szakaszban lévő fiatal növények nem tudják hasznosítani. Később, amikor a levelek egymást árnyékolják, magasabb PPFD-ket is hasznosíthatnak. Egy teljesen napsütéses júniusi nap PPFD értéke az északi féltekén körülbelül $1215 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (Schwarz et al., 2014). A paradicsomnövények rövid ideig a $2000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ -t is elviselik károsodás nélkül bőséges vízellátás mellett (Schwarz et al., 2014). Ke et al. (2022) kutatásában megállapította, hogy a hosszú távú túlzott fényhatás nagy mennyiségű reaktív oxigénfajta termelődéséhez vezet, ezáltal kimeríti az antioxidáns rendszerek kapacitását, és visszafordíthatatlan fotooxidatív károsodást okoz a kloroplasztisban és a sejtekben, így gátolja a fotoszintézist.

Eltérő fényintenzitásokat (60, 150, 240, 250 300, 330, 450, 500, 650, 700 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) összehasonlító kutatásokban azt tapasztalták, hogy a legtöbb vizsgált paraméter a besugárzás növekedésével arányosan változik (csökken vagy növekszik), de $240 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ értéknél éri el az optimumot, és e fölötti intenzitásokon a növények gyengébben teljesítenek. Az optimum eléréséig a magasabb PPFD növelte a friss- és száraztömeget, a szár átmérőjét, a növény erősségét, a gyökér méretét, a levelek klorofill és karotinoid tartalmát, és csökkentette a fajlagos levélfelületet, és a tömagasságot. A magasabb PPFD növelte a sztóma konduktanciát, és csökkentette az intercelluláris CO_2 koncentrációt, ezért magasabb lett a fotoszintetikus hatékonyság és a fotoszintézis sebessége is. A magasabb nettó fotoszintézis miatt magasabb lett a levelek oldható szénhidráttartalma. Ezen adatokból jól látható, hogy fontos a paradicsompalánták növekedéséhez a megfelelő fényintenzitás meghatározása, de azt is megállapították, hogy a válaszok fajtánként is eltérőek lehetnek (Ke et al., 2022; Utasi et al., 2023; Zheng et al., 2023). Deram et al. (2014) kutatásánál megfigyelték, hogy a magasabb fényintenzitás ($135 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) növelte a termésmennyiséget az alacsonyabb fényintenzitással szemben ($100 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$).

2.5.7 A világítás spektrális összetételének és a fény intenzitásának együttes hatásai

A fényintenzitás és a spektrális összetétel kölcsönhatásban szabályozza a paradicsomnövények növekedését és anyagcseréjét.

Utasi et al. (2023) azt állapították meg, hogy fiatal paradicsomnövények növekedésénél az optimális kék arány a fényreceptben 15% körüli (5, 10, 15, 20, 25, 30% közül, emellett volt a fényreceptben 10% zöld fény, a többi pedig vörös volt), de alacsonyabb fényintenzitás esetén ez eltolódhat magasabb kék arányra, ami azt jelzi, hogy a kék fény optimális szintje a fény

intenzitásától is függ. A kék fény által kiváltott szárnyulásgátlás erősebb volt alacsony fényintenzitás mellett, mint közepes vagy erős fénynél. Ezenkívül lineáris összefüggést mutattak ki a vörös fény aránya és az oldható szénhidrátok felhalmozódása között. A fényintenzitás növekedése és a kék fény arányának növekedése az antocianinok felhalmozódását idézte elő. A növények virágzását előrébb hozta a nagy fényintenzitás továbbá a kék fény aránya az említett 15%-os küszöbértékig.

2.5.8 A spektrumösszetétel szerepe a kertészetben

Az itt közölt tanulmányok fényében felmerülnek bizonyos kérdések az agrárvilágítás tervezésekor, mint például, hogy milyen szintre/arányra lesz szükség a távoli vörös, vörös, zöld és kék fényből bizonyos növények esetében. Az optimumok a növény életciklusa során változhatnak, és komoly kísérleti munka révén lehet csak kitapasztalni a hullámsáv-arányokat a megfelelő termelés érdekében mind a termés minőségének és mennyiségének, mind a növény egészségének és élettanának a szempontjából. Fontos, hogy megtaláljuk a megfelelő spektrum- és intenzitáskombinációkat és a megfelelő napi besugárzási időtartamot minden növény számára, ugyanis a fényreakciókban valószínűleg fajta szinten is különbségek vannak (Massa et al., 2008). Az eddigiek alapján azonban elmondható, hogy a színspektrumok legjobban együtt érvényesülnek (X. Liu et al., 2012).

2.6 Az UV fénykezelés hatásai

Az UV fényt (100-400 nm) is használják kiegészítő világításként a növénytermesztésben. Az UV-sugárzást általában UV-A (315-400 nm), UV-B (280-315 nm) és UV-C (100-280 nm) spektrális tartományokra osztják fel. Ezekről a tartományokról tudjuk, hogy az UV-C sugárzást az ózonréteg elnyeli, és hogy az UV-A sugárzás nem károsítja a növényeket (Castagna et al., 2013). Ahogyan Urban et al. (2016) összegezték az UV-sugárzásnak a biológiai anyagokra gyakorolt gátló és káros következményei közé tartozik a lipidperoxidáció, a fehérje polimerizáció és az enzimaktiváció. Ezen kívül jellemző lehet az abnormális ionáramlás, a sejtmembrán-permeabilitás növekedése és a sejtmembrán depolarizációja. A 250-260 nm-es tartomány képes elpusztítani a legtöbb mikroorganizmust a sejt DNS-ének pirimidin-dimer képződéssel történő megváltozása miatt, és ezt a hatását használják fel a növényvédelemben.

2.6.1 Az UV-A kiegészítő világítás a termesztés alatt

Mivel az UV spektrumból a Földet elérő sugárzás legnagyobb része UV-A fény, ezért számos helyen ezt alkalmazzák a fényreceptek összeállításában. Vörös fényt kiegészítő UV-A LED-ek alatt termesztett paradicsompalánták szignifikánsan nagyobb levélfelülettel és nagyobb hipokotil átmérővel rendelkeztek, emellett nagyobb volt az össztömegük és a hajtástömegük is, jelentősen felgyorsult a növekedésük és fejlődésük, tömörebbekké váltak, a szervek növekedése kiegyensúlyozottá vált, szemben a csak vörös fény alatt növekedett növényekkel (Brazaityté et al., 2010, Khoshimkhujayev et al., 2014). A termékek minőségét is befolyásolta az UV-A kiegészítő világítás, ezeknél a növényeknél alacsonyabb volt a repedezési arány, megnövekedett az oldható szárazanyag tartalom, a titrálható savasság és az aszkorbinsav-tartalom. A termékek számában, vagy a pigmentek (például a likopin vagy a β -karotin) eloszlásában nem volt különbség (Kobayashi & Tabuchi, 2022), de a pigment molekulák alakja eltérő volt a két kezelés között, vagyis UV-A-n roncsolódtak. Az UV-A kezelés a karotinoid tartalomra nem volt egyértelmű hatású (csökkentette: Kobayashi & Tabuchi (2022), vagy növelte: Lee et al. (2021)).

A kombinált UV-kezelés (UV-AB) elsősorban a fenolok (klorogénsav, kávéssav, cikóriasav, luteolin-7-glükózid és más flavonoidok) mennyiségét, illetve a likopin felhalmozódását növelte a termésben (Lee et al. 2021) a paradicsomnövényt 5-6 nappal a betakarítás előtt megvilágítva.

2.6.2 Az UV-B sugárzás káros hatása

Az UV-B sugárzás intenzitását a sztratoszférikus ózonréteg vastagsága befolyásolja, és magas energiatartalma miatt ez a sugárzás károsítja leginkább a növényekben a genetikai állományt, a II. fotokémiai rendszert, a sejtmembránokat és számos anyagcsere-folyamatot. Okozhat géncsendesítést a DNS-ben, felelős lehet az enzimek inaktiválásáért, fotoszintetikus vagy hormonrendszeri rendellenességekért és a reaktív szabad gyökök képződéséért. Emiatt az UV-B sugárzás fontos stressztényező a növények számára, és mivel a nukleinsavak és fehérjék nagy hatékonysággal nyelik el, de károsodnak ezáltal, ezt használják ki a kártevők elleni védekezésnél, fertőtlenítésnél is.

Számos növényfaj kifejlesztett mechanizmusokat az UV-B elleni védekezésre, például a flavonoidok és poliaminok felhalmozódása enyhítheti az UV-B fény káros hatásait (Eissa Piri, 2011). Emellett a védekezés fotoprotektív pigmentek felhalmozódásán és morfológiai

válaszokon (például alacsonyabb, kompaktabb növekedés, levelek elfordulása, vastagabb viaszos kutikula fejlesztése, kloroplasztiszok a sejtek belsőbb régióiba vándorlása) keresztül is megvalósul (Fehér, 2019). Mivel az UV-B sugárzás a dózistól és a növény érzékenységtől függően serkenti a másodlagos anyagcserét, beleértve az egészséget javító fitokemikáliák előállítását (antioxidáns molekulák), és például a növényi természetes védekezőképességet is stimulálja (UV-védő molekulák felhalmozódásának fokozása), alkalmazzák ezt a stresszkezelést a növénytermesztésben. Castagna et al. (2013) kutatásában például a betakarítás utáni UV-B kezelés növelte az aszkorbinsav és a karotinoidok koncentrációját paradicsomtermés húsában és héjában, viszont a keménységet negatívan befolyásolta, mivel a paradicsom a kezelés után megpuhult.

Az UV-B fény viszont általában csak akkor hatásos, ha több órán vagy napon keresztül alkalmazzák. Ez korlátozza a használatát üvegházi körülmények között (Urban et al., 2016).

2.6.3 A betakarítás utáni UV-C besugárzás hatása a paradicsombogyókra

A fizikai növényvédelemnek megvan az az előnye, hogy könnyen kombinálható akár kémiai, akár biológiai kezelési módszerekkel, illetve ki is válthatja azokat. Egy ilyen megoldás lehet az UV-C-vel történő növényvilágítás. Az UV-C fényről régóta ismert, hogy közvetlen és közvetett gátló és károsító hatást fejt ki az élő sejtekre, ezért általánosan használják fertőtlenítési célokra. Az UV-C fény halálos hatását sikeresen használták ki a betakarítás utáni betegségek leküzdésére, így meghosszabbítva a gyümölcsök és zöldségek eltarthatóságát (Urban et al., 2016).

Az UV-C nagyon rövid idő alatt is (akár 60 másodperc) képes nagy mennyiségű energiát szolgáltatni, ami oxidatív stresszt okozhat a növényben, ha az antioxidáns molekulák és antioxidáns enzimek nem képesek hatékonyan közömbösíteni a keletkezett reaktív oxigénfajtákat (Urban et al., 2016).

Magasabbrendű növényekben megfigyelték az UV-C fény károsító hatásait a kloroplasztiszokon (plastokinonok elpusztítása, II. fotokémiai rendszer károsítása), a mitokondriumokon (mitokondriális transzmembrán potenciál elvesztése, az ion mobilitás és eloszlás megváltozása, valamint reaktív oxigén formák termelődése és oxidatív stressz) és általában a membránokon (tilakoidok szerkezetének károsítása, lamellás membránok szerkezeti integritásának megzavarása), illetve gátló hatását a fotoszintetikus elektrontranszportra, és a Calvin-ciklus enzimeire is. Lehetséges azonban olyan dózisok meghatározása, amelyek a várt hatást biztosítják anélkül, hogy a növényi szervekre negatív hatással lennének. Az UV-C fény

terepi körülmények közötti felhasználására olyan lámpákat alkalmaznak, amelyek már egy másodperc határidővel képesek serkenteni a növényvédelmet. Aarouf & Urban (2020) kimutatták, hogy a csak 1 másodperces UV-C villanásos kezelések, melyeket 3-4-szer ismételték 48 óránként, hatékonyabbak voltak a 60 másodperces kezeléseknél a *Botrytis cinerea* elleni védekezésben paradicsom növényen. Szerintük a dózisok számítanak az UV-fény megfigyelt hatásaiban, nem pedig az expozíció ideje.

Az UV-C fényt az egészséget javító fitokemikáliák termelésének serkentésére, a termések eltarthatóságának növelésére (mivel késlelteti az öregedést és lassítja a termések lágyulását), és a stresszhez való alkalmazkodás serkentésére is ki lehet használni. Ezek összefügghetnek az UV-C-nek a reaktív oxigéngyökök termelésére kifejtett hatásával (Urban et al., 2016). A reaktív oxigén fajták, mint például a hidrogén-peroxid gyors felhalmozódása a kórokozók támadási helyén közvetlenül mérgező a kórokozókra, ám ezen túlmenően olyan jelátviteli útvonalakat is elindíthatnak, amelyek más védekező mechanizmusok aktiválásáért felelősek (mint például másodlagos metabolitok termelése, amelyek közül sok védekező vegyület) (Rivera-Pastrana et al., 2014). Az UV-C kezelések másodlagos anyagcserére gyakorolt hatásai közül kiemelkedő a fenolok (flavonoidok) képződésére kifejtett pozitív hatás, ami fokozott UV-szűrő és antioxidáns tulajdonsággal jár együtt. A flavonoidok a növényi szövetek felső rétegeiben halmozódnak fel, mert az UV-C erősebb hatással van a héjban lévő flavonoidok koncentrációjára (Rivera-Pastrana et al., 2014). Az UV-C kezelések fokozták az antioxidáns enzimek működését is (Urban et al., 2016). Bravo et al. (2013) azt találták, hogy a paradicsom karotinoid és likopin-tartalma megemelkedett az UV-C kezelés hatására, viszont negatív hatása volt a lutein és zeaxantin tartalmára, de jelentős pozitív hatása lehet a paradicsom aszkorbinsav tartalmára. C.-H. Liu et al. (2012) kutatásában a 4 és 8 kJ m⁻²-es UV-C besugárzás növelte a paradicsom termés összes fenoltartalmát, az antioxidáns aktivitást és a galluszsav, klorogénsav, sziringinsav, p-kumársav és kvercetin tartalmát, és elősegítette az összes flavonoid felhalmozódását.

Short et al. (2018) kutatásában a *Tetranychus urticae*-val fertőzött szamócán 60 másodperc UV-C sugárzás után a lombkoronán 5-nél kevesebb élő atka volt, és nem volt takácsatkaszövedék. A kezeltlen kontrollokon több mint 175 atka volt és a lombzat 65%-a hálós volt, a levelek sárgultak. Janisiewicz et al. (2016) munkájában lisztharmattal fertőzött szamócán az UV-C besugárzás több mint negyedére csökkentette a kárt, és nem befolyásolta a levél fotoszintézisét. Csökkentette a beteg gyümölcsök mennyiségét, javította a termés hozamot és a gyümölcs minőségét. Charles et al. (2008) azt tapasztalták, hogy az UV-C fény a paradicsom szürkepenészes rothadását megakadályozza azáltal, hogy enzimeket és toxinokat tartalmazó

fizikai gátat alakít ki, így a kórokozó diffúzióját gátolja. Az UV-C fény emellett plazmolízist indukált a terméshéj sejtjeiben, ami egy sejtfalra rakódó réteg kialakulásához vezetett, amely korlátozta a *Botrytis cinerae* fejlődését.

3 Alkalmazott módszerek

3.1 A kutatás körülményei

A kutatás során vizsgált paradicsom növényeket laboratóriumi körülmények között neveltük 2023. 04. 14. és 08. 07. között 17 héten keresztül. Kezdetben alacsony volt a hőmérséklet, így nehezen csíráztak a magok. Balkonparadicsom *Vilma* fajtával dolgoztunk, 15 + 15 darab cserépbe 3-3 magot vetettünk perlitbe 1-2 cm mélyre. A 6. héten a cserepekben növekvő 3 növényből kiválasztottuk a legerősebbeket, azokat meghagytuk és tovább neveltük, a többit kihúztuk. A 30 cserepet megszámoztuk, 1-15-ig a távoli vöröses, 16-30-ig a zöldes fény alá tettük a növényeket. Hetente öntöztünk tápoldattal. A törzsoldat összetétele az 1. táblázatban szerepel. A növények növekedését hetente fényképeztük. A virágok beporzását a 8. héttől kézzel végeztük, úgy, hogy a virágokat enyhén megütögettük.

1. táblázat: A törzsoldat receptje.
(Forrás: Schwarz et al., 2014)

Törzs- oldatok	Makrotápanyagok	Mol wt	Oldatkonc. M	Oldat ml	g/1000 ml
A	KNO ₃	101,11	1	1000 ml	101,11
B	Ca(NO ₃) ₂ x 4 H ₂ O	236,15	1	1000 ml	236,15
E	K(H ₂ PO ₄)	136,09	1	1000 ml	136,09
D	MgSO ₄ x 7 H ₂ O	246,48	1	1000 ml	246,48
H	K ₂ SO ₄	174,27	0,25	1000 ml	21,784
C	NH ₄ H ₂ PO ₄	115,08	1	250 ml	28,77
N	NaCl	58,44	1	250 ml	14,61
	Mikrotápanyagok				
1	MnCl ₂ x 4 H ₂ O	197,91	0,011	1000 ml	2,177
2	ZnSO ₄ x 7 H ₂ O	287,54	0,004	1000 ml	1,150
3	CuSO ₄ x 5 H ₂ O	249,68	0,0008	1000 ml	0,200
4	(NH ₄) ₆ Mo ₇ O ₂₄ x 4 H ₂ O	1235,86	0,0005	1000 ml	0,618
5	H ₃ BO ₃	61,83	0,047	1000 ml	2,906
	Vas törzsoldat				
Fe	Fe-EDTA	367,05	0,0068	1000 ml	2,500

3.1.1 A fénykezelés

A paradicsomok megvilágításához 2 db Multispektrum LED világító panelt (LEDIUM Kft. egyedi terméke) alkalmaztunk különböző spektrum összetétellel. A LED panelek 5 csatornával rendelkeznek: 365 nm UV, 450 nm royal blue, 520 nm green, 660 nm deep red és 730 nm far red.

A fényrecept mindkét lámpánál tartalmazott vörös és kék fényt 120-120 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ fotonfluxus sűrűséggel. Ezen kívül az egyik lámpánál távoli vörös, a másikonál zöld fényt adtunk a recepthoz 40 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ fotonfluxus sűrűséggel. Így a kutatás alapjául szolgáló különböző spektrum összetételű kezelések a következők voltak: 1.: kék – vörös – távoli vörös 3:3:1 arányban (+FR) és 2.: kék – zöld – vörös 3:1:3 arányban (+Z) (1.-2. kép).

A növényeket magvetés után közvetlenül a lámpák alá helyeztük 16 órás fotoperiodusban: a világítás kezdete 05:00, a vége 21:00. Mindkét lámpa alá 15-15 db cserepet tettünk, de a 11. héttől már csak 12 db növényt hagytunk fénykezelésenként, hogy jobban elférjenek. Véletlenszerűen dobtuk ki a 3-3 növényt.



1-2. kép: Bal oldalon a kék-vörös-távoli vörös fényrecept alatt növekedő növények. Jobb oldalon a kék-zöld-vörös fényrecept alatt növekedő növények.
(Forrás: Saját fénykép)

3.1.2 Betakarítás

A paradicsom terméseket 3 menetben takarítottuk be hetente, az első betakarítás (Sz1) 14 hetes növényekről történt (csak a távoli vörös fényt kapó paradicsomok voltak érettek). A kísérlet eredménye miatt a zöld fényt kapó növényekről csak egy héttel később tudtuk megkezdeni a szüretet, a 15. héten (Sz1). További két betakarítás történt (Sz2, Sz3), majd az utolsó betakarítás alkalmával (17. hét) felszámoltuk az állományt. Ekkor a zöld terméseket is összegyűjtöttük, így érett és éretlen terméseket is vizsgáltunk (J, É).

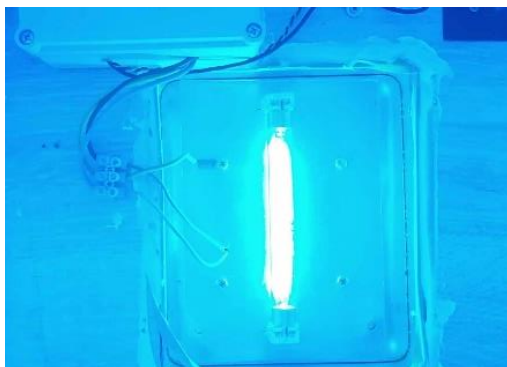
A leszűretelt termések tömegét konyhai mérlegen megmértük, egy részüket félretettük 1 vagy 2 hetes tárolásra 5 °C-os hűtőszekrénybe (T0, T1, T2), a többit fénykezelésenként különválasztva összetörtük, és a paradicsomlevet Eppendorf csövekben lefagyasztottuk a beltartalmi mérések elvégzéséig (3.-4. kép). A tárolt paradicsomokból is ugyanígy készítettünk mintát. Egyszerre 5-6 db ugyanabból a kísérleti anyagból származó paradicsomot törtünk össze.



3-4. kép: Bal oldalon paradicsom bogyók méréshez való előkészítése. Jobb oldalon a fagyasztásra váró minták.
(Forrás: Saját fénykép)

3.1.3 UV-C világítás

Mindkét fénykezelés alól a betakarított termések felét UV-C megvilágítással kezeltük. Az UV-C besugárzást fluoreszcens germicid lámpacső (HNS 4W G5, spektrális csúcs 254 nm-en, Osram) biztosította, a cső alatt mintalappal. Fadoboz zárta az UV-C lámpát és a mintalemezt, amely védelmet nyújtott számunkra a sugárzás ellen (5.-6. kép). A terméseket először csészevégükkel felfelé körülbelül 20 cm-re a lámpák alá helyeztük a mintalapra. 10 percig tartott a besugárzás, majd minden termést 180°-kal elforgattunk, hogy a másik felület is érje a fény, ezt is 10 percig világítottuk. Körülbelül 4 - 8 kJ/m²-es volt az UV-C besugárzási dózis.



5-6. kép: Bal oldalon az UV-C lámpacső. Jobb oldalon az UV-C lámpa fa burkolatú doboza.
(Forrás: Saját fénykép)

3.2 A kísérlet felépítése

A kutatásban a paradicsom növényeken mért adatokat a kétféle fénykezelés függvényében hasonlítottuk össze. A terméseket a fénykezeléseken kívül összehasonlítottuk az alapján is, hogy kaptak-e a szüret után UV-C kezelést vagy sem, illetve, hogy a szedés után frissen (1-2 napon belül) lettek-e a minták lefagyasztva, vagy tárolva voltak egy vagy két hétig. Ezenfelül vizsgáltuk, hogy melyik minta melyik héten lett betakarítva a növényekről. A következő rövidítéseket alkalmaztuk a fentieket összesítve:

- Fénykezelés: +FR, +Z (távoli vörös és zöld fénykiegészítés)
- UV-kezelés: +UV, 0UV (a termés kapott vagy nem kapott UV kezelést)
- Tárolás: T0, T1, T2 (nem, egy, vagy két hétig tároltuk)
- Szedés: Sz1, Sz2, Sz3 (első, második, harmadik szedési időpont)
- Érettség: J, É (jó vagy éretlen)

3.3 A teljes növényen alkalmazott mérések

A teljes növényen mérendő változókat (reflektancia, fluoreszcencia, fotoszintézis, SPAD) minden növényen a kilencedik (15 db +FR és 15 db +Z) és a tizenkettedik (12 db +FR és 12 db +Z) héten mértük.

3.3.1 Reflektancia mérések és vegetációs indexek

A reflektancia mérésekhez Qmini spektrométert (RGBPhotonics, Németország) használtunk (7.-8. kép), amellyel először egy sötét (zaj) majd egy fehér spektrumot rögzítettünk. Ezután 250-1050 nm-es tartományban, 0,3 nm-es felbontásban felvételeztük a paradicsom egy már teljesen kifejlett felső levélkéjét. Egy növényen háromszor mértünk három levélkén. A növényeken mért spektrumokat a Waves nevű programmal a mérések közben is tudtuk figyelni.

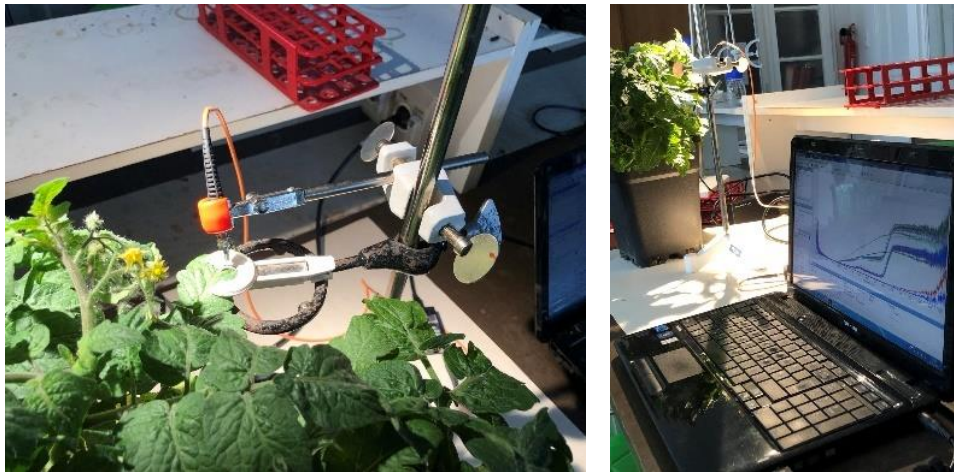
A reflektancia mérések adataiból különböző vegetációs indexeket számoltunk ki, amelyek növényélettani szempontból és a kutatás szempontjából értékes információkat adnak. Ezek közül az adatelemzésekben felhasznált indexek az MTCI, ARI1 ([http2](http://2)).

- MTCI: Merris Terrestrial Chlorophyll Index, a növényzet zöldességét, klorofill tartalmát mutatja meg, vagyis a lombzat egészségességét, a növény fejlődését és fotoszintetikus teljesítőképességét.

$$MTCI = \frac{754\text{ nm} - 709\text{ nm}}{709\text{ nm} - 681\text{ nm}} \quad (1)$$

- ARI1: Anthocyanin Reflectance Index 1, antocián tartalommal kapcsolatos index. Antociánt elsősorban a fiatal és az öregedő levelekben találhatunk, viszont a stresszelt növényzetre is jellemző a magasabb levél-antocián tartalom.

$$ARI1 = \frac{1}{550\text{ nm}} - \frac{1}{700\text{ nm}} \quad (2)$$



7-8. kép: Bal oldalon a reflektancia méréshez előkészített növény, jobb oldalon a lemért hullámhosszok.
(Forrás: Saját fénykép)

3.3.2 SPAD

Az összklorofill tartalmat SPAD-502Plus roncsolásmentes klorofill mérővel mértük (9. kép).



9. kép: SPAD mérés a leveleken.
(Forrás: Saját fénykép)

3.3.3 Fluoreszcencia mérések

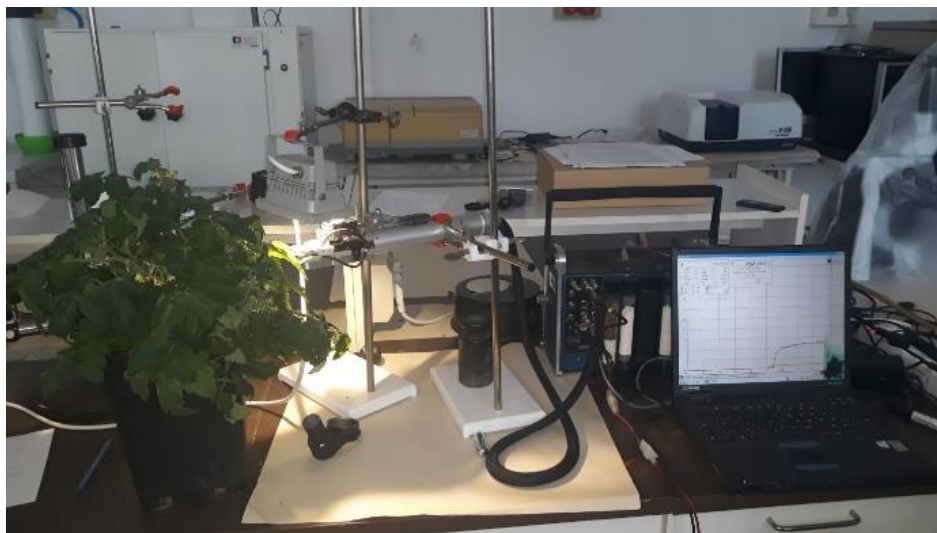
A fluoreszcencia mérésekhez FMS-2 (Hansatech, Németország) fluorométert használtunk (10. kép). A mérés során az előzetesen 15 percen keresztül sötétben tartott leveleket kis intenzitású, modulált fénnel megvilágítva rövid időn belül (30-40 milliomod másodperc) egy lokális maximumot látunk a fluoreszcencián (F_0), ez az alapfluoreszcencia. Ezután intenzív telítési fényimpulzus ($15000 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), majd folyamatos aktinikus megvilágítás ($1500 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) következett, melyek a reakciócentrumokat zárt állapotba hozták, így kaptuk a maximális fluoreszcenciát (F_m). Ezek különbsége a változó fluoreszcencia (F_v). A PSII maximális fotokémiai hatásfokát a változó és maximális fluoreszcencia aránya (F_v/F_m) fejezi ki. 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). Az F_m' a steady-state-ben a telítési impulzusok után mért maximális fluoreszcencia, kisebb az F_m -nél, mert már zajlanak a nem-fotokémiai folyamatok a fényen. Az $\text{NPQ} = (F_m - F_m')/F_m'$ megmutatja a fölösleges gerjesztési energia hő formájában történő leadását, arányos a xantofill deepoxidációval, és mutatja az antenna komplex működésének gyengülését, a PSII inaktivációját is. $\Phi\text{PSII} = (F_m' - F_s)/F_m'$ a PSII reakciócentrumaival kapcsolatos, számszerűsíti a nem-ciklikus elektrontranszport kvantumhozamát, illetve az abszorbeált és a fotokémiai folyamatban hasznosuló fotonok arányát. A fentebb említett paraméterek közül mi az F_v/F_m , az NPQ és a ΦPSII adatokat értékeltük (Lichtenthaler et al., 2005).



10. kép: Fluoreszcencia mérés.
(Forrás: Saját fénykép)

3.3.4 Fotoszintézis mérések

A fotoszintetikus CO₂ felvétel méréséhez infravörös gázanalizátoros módszert (CIRAS-2, PPSystems, UK) használtunk (11. kép). A nettó fotoszintézist mértünk, mivel a kamrában lévő minta a CO₂ felvétel mellett ad is le CO₂-t légzés és fotorespiráció által. Ezenkívül mértük a transzspirációt is. A méréseket előre beállított, telítési fényintenzitás mellett végeztük.



11. kép: Nettó fotoszintézis és transzspiráció mérés.
(Forrás: Saját fénykép)

3.3.5 Pigmenttartalom meghatározás

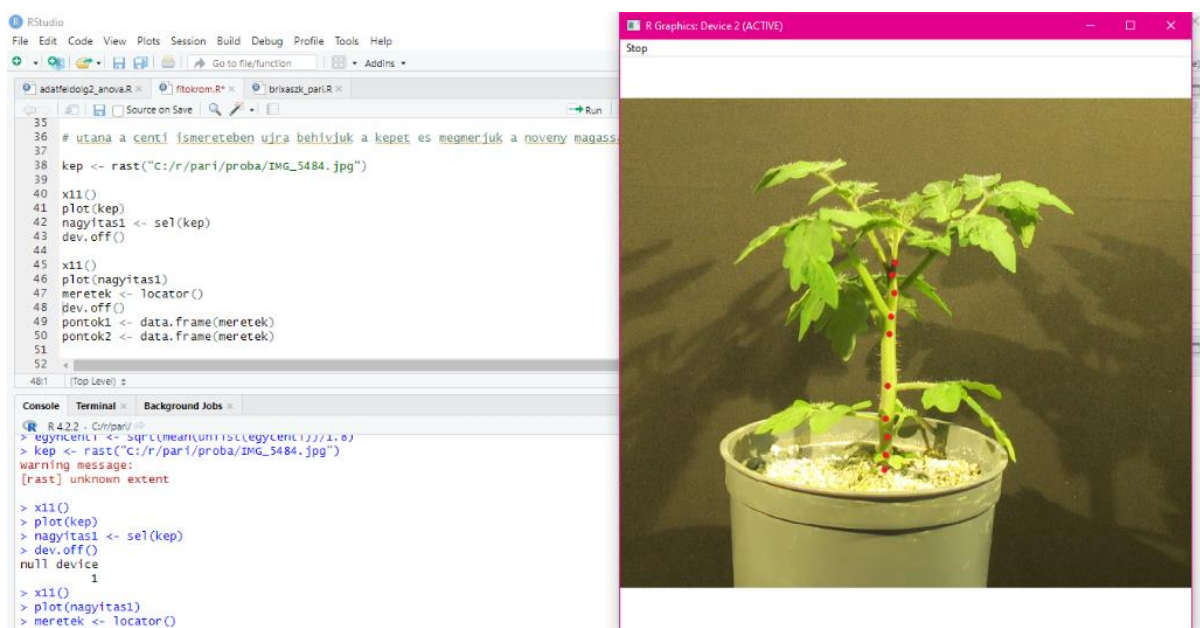
A paradicsom lefagyasztott leveleiből két-két 1 cm²-es korongot dörzsmozsárba raktunk 0,080-0,120 g kalcium-karbonáttal (a klorofillt roncsoló anyagok megkötése végett) és egy kevés kvarchomokkal. Eldörzsöltük 1 ml acetonnal, Eppendorf csőbe töltöttük, és kiegészítettük acetonnal 2 ml-re. A mintákat 10 percig, 4°C-on 10000-es fordulatszámon centrifugáltuk. Ezután a pigmentoldatból 1,2 ml-t küvettába pipettáztunk és elvégeztük a mérést spektrofotométerrel. A referencia folyadék aceton volt (Lichtenthaler & Buschmann, 2001).

3.3.6 Növény friss és száraz tömeg

A 17. héten a betakarítás után felszámoltuk az állományt és a gyökereket leválasztva a hajtásról külön-külön megmértük őket. Egy hét elteltével ezt megismételtük a száraz növényeken.

3.3.7 Növénymagasság

A növekedés vizsgálatát képanalízissel végeztük. A növényekről készült fényképekből véletlenszerűen kiválasztottunk 5-5-öt a fénykezeléseknek megfelelően minden hétről. R program segítségével a képeken megjelöltük a növényt a perlit felszínénél és fölötté az összes nóduszát az utolsó levélig, ami már jól látszott (14. kép). Ezt a 7. hetitől a 11. hetiig készült képeken csináltuk, utána a 17. hétig a növények sűrűsége miatt csak a növény alja és teteje közötti magasságot mértük.



12. kép: A növény magasságának meghatározása képanalízissel.
(Forrás: Saját fénykép)

3.4 Paradicsom bogyókra vonatkozó mérések

3.4.1 Bogyótömeg

A bogyók tömegét egyenként mértük meg konyhai mérlegen, és kezelésként feljegyeztük őket.

3.4.2 Összes antioxidáns kapacitás

0,5 g paradicsomlé mintát 2 ml 70%-os etanollal homogenizáltunk, majd 10 percig centrifugáltuk 13000 rpm-en. 200 µl felülúszó és 1 ml FRAP (Ferric Reducing Antioxidant

Power) oldat keverékének abszorbanciáját küvettában lemértük spektrofotométerrel 593 nm hullámhosszon. A vak minta 200 µl 70%-os etanol volt (Benzie & Strain, 1996). Az eredményt aszkorbinsav-ekvivalensben kapjuk 1 g növényi mintára vonatkoztatva aszkorbinsav kalibráció segítségével (mg/g).

3.4.3 °Brix

A paradicsom termések °Brix fokát ATAGO™ Digital Refractometer PR-201α műszerrel mértük úgy, hogy egy kis paradicsomlevet öntöttünk a mérőfelületre (15. kép).

Az összes szárazanyag-tartalmat a °Brix tartalomból a következő képlettel fejeztük ki: összes szárazanyag = $1,01 \times \text{°Brix} - 0,11$. A cukortartalmat a °Brix tartalomból a következő képlettel fejeztük ki: $Y = 0,8941 \times X + 0,4668$, ahol $Y = \text{°Brix}$, $X = \text{cukor \%}$. (Helyes, 2007)



13. kép: °Brix tartalom mérés.
(Forrás: Saját fénykép)

3.4.4 Malondialdehid (MDA)-tartalom

0,1 g paradicsomlé minta és 1 ml jéghideg 0,1% triklórecetsav homogenizátumát Eppendorf csövekben vortexeltük, majd centrifugáltuk 10 percig 4 °C-on 13.000 rpm-mel. Zárható üveg kémcsőben 400 µl felülúszót (és vak oldatnak ugyanennyi 0,1 % triklórecetsavat) és 1 ml 0,5% tiobarbitursav + 20% triklórecetsav oldatot 100°C-on 30 percig inkubáltunk, majd 10 percen keresztül jégen lehűtöttük. A felülúszó abszorbanciáját lemértük spektrofotométeren 532 nm-en, majd a malondialdehid ekvivalens meghatározásához extinciókoefficiens használtunk: $\epsilon_{\text{MDA}} = 155 \text{ mM}^{-1} \text{ cm}^{-1}$. $\text{MDA}_{\text{ekv.}} = A / 155000 \times 10^6$ (Li et al., 2021), a kapott MDA-mennyiség mértékegysége nmol/g friss tömeg volt.

3.4.5 Titrálható savasság

A savtartalom hígítatlan centrifugált paradicsomléből 0,05%-os N nátrium-hidroxid (NaOH) mérőoldattal történő titrálással, fenolftalein indikátor segítségével került meghatározásra (színátcsapás: színtelenből rózsaszín). Az összes savtartalmat (m/m%) citromsav egyenértékben adtuk meg az alábbi képlet alapján:

$$\text{Titrálható sav (\%)} = \frac{\text{NaOH fogyás (cm}^3\text{)} \times \text{NaOH faktor} \times \text{citromsav egyenérték} \times \text{hígítás} \times 100}{\text{bemért mennyiség (cm}^3\text{)}} =$$
$$\frac{\text{NaOH fogyás} \times 0,0521 \times 0,064 \times 1 \times 100}{1},$$

ahol a NaOH faktor a sósavval szembeni koncentráció-ellenőrzés során kapott érték $\times$ a NaOH normalitása, a citromsav-egyenérték pedig a három karboxil-csoporttal rendelkező citromsav moláris tömegéből származó adat.

(3)



14. kép: Savasság mérés.
(Forrás: Saját fénykép)

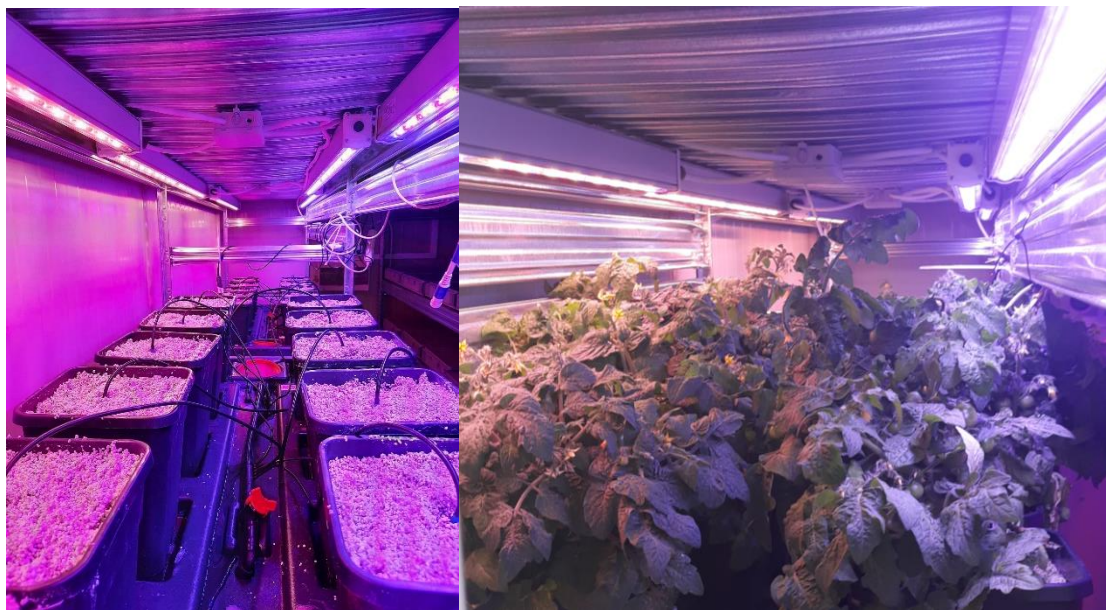
3.5 Statisztikai kiértékelés

A különböző műszereken mért adatokat Excel fájlokba gyűjtöttük össze. Ezeket R program segítségével dolgoztuk fel és ábráztuk. A különböző fényminőségi kezelések hatását (illetve a terméseknél az UV-C, a tárolás, a szedési idő és az érettség hatását is) a vizsgált paraméterekre egyutas varianciaanalízis (ANOVA) alkalmazásával értékeltük. A Student t-tesztet $P < 0,05$ szignifikanciaszinttel alkalmaztuk. A normalitás ellenőrzésére Flinger-Killeen teszteket végeztünk.

3.6 A kutatás megismétlése

A kutatást megismételtük 2023. 11. 29. és 2024. 03. 26. között némi változtatással. A paradicsom növényeket egy polcrendszeres növénynevelő konténerben vizsgáltuk 17 héten keresztül, ahol a hőmérséklet végig egyenletesen szabályozott volt, és automatikus volt a csepegtető öntözés is. A keringtetett tápoldatot szükség esetén utántöltöttük vagy cseréltük. A törzsoldat megegyezett az előző kutatásban használttal. A növények növekedését hetente fényképeztük. A fajta itt is a *Vilma* balkonparadicsom volt. Összesen 40 növényt neveltünk 20 nagyobb cserépben, cserepenként kettőt (15.-16- kép), közegnek agyaggolyót és perlitet használtunk.

A paradicsom terméseket 4 menetben takarítottuk be hetente, az első betakarítás (Sz1) 14 hetes növényekről történt úgy, mint az 1. kísérletnél. Az utolsó betakarítás (Sz4) alkalmával a zöld bogyókat is betakarítottuk, majd felszámoltuk az állományt. Az érett terméseket azonnal feldolgozva, fagyasztva tároltuk a mérésekig.



15-16. kép: A fénykezelések a polcrendszereken. Bal oldalon vetés előtt, jobb oldalon a már fejlett növényállomány. Mindkét kép bal oldalán az R3B1 fénykezelés, a jobb oldalán pedig az R1B1 látható.
(Forrás: Saját fénykép)

3.6.1 Módosított fénykezelés

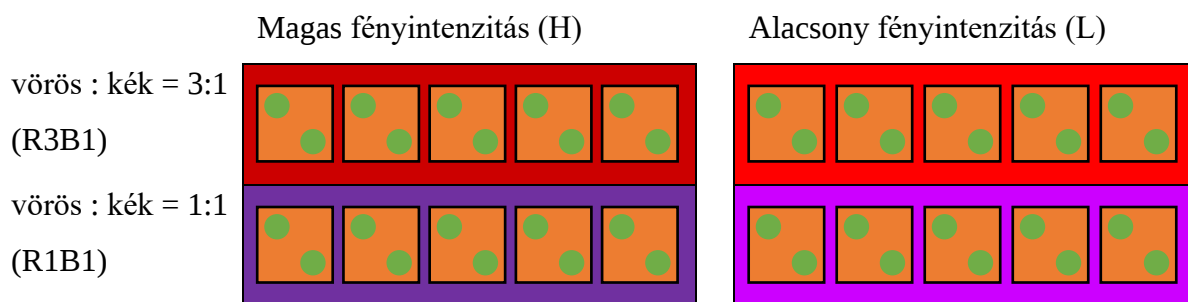
A paradicsomok megvilágításához a növénynevelő konténer LED lámpáit alkalmaztunk különböző spektrum összetétellel. A polcok szélére 3 pár 120 cm hosszú, 80°-os sugárzási szögű, változó spektrumú LED lámpatest került (Hortiled Multi 4DIM, Hortilux, Hollandia). A

lámpatestek be- és kikapcsolási idejét, valamint az egyes színcsatornák teljesítményét egy DALI (Digitally Addressable Lighting Interface) vezérlő (DLC-02 DALI Digital Lighting Controller, Mean-Well, Tajvan) állította be. A LED-ek 4 csatornával rendelkeznek: 450 nm kék, 660 nm mélyvörös, 730 nm távoli-vörös és egy fehér LED.

A növényeket magvetés után közvetlenül a lámpák alá helyeztük 16/8 órás világos/sötét fotoperiodusban. Négy különböző fényreceptet állítottunk be, kétféle fényösszetételt, illetve kétféle fényintenzitást vizsgáltunk. A fényrecept mindegyik fénykezelésnél tartalmazott zöld és távoli vörös fényt ugyanolyan arányban, azaz az első kísérlet kétféle fénykezelését egyben alkalmaztuk, mert mindkettő mellett tapasztaltunk pozitív hatásokat. Emellett az egyik növénycsoport lámpáinál a vörös : kék fény aránya 1:1 volt (R1B1), a másik növénycsoport lámpáinál a vörös : kék fény aránya 3:1 volt (R3B1). Ezen belül mindkét fényösszetételű kezelésnél beállítottunk kétféle fényintenzitást: egy magasabbat ($246 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ fotonfluxus sűrűséggel) (H) és egy alacsonyabbat ($200 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ fotonfluxus sűrűséggel) (L) a növények és a LED lámpák közötti távolság manipulálásával. Az előző kísérlet fényintenzitása ezeknél magasabb, $280 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ volt. A négy fénykezelést a 2. táblázat tartalmazza, pontos elhelyezkedésüket pedig az 1. ábra.

2. táblázat: A második kísérlet fénykezelései.
(Forrás: Saját táblázat)

Intenzitás kód	Vörös:kék arány kód	Fényintenzitások spektrumonként ($\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$)					vörös:kék arány	vörös:távoli vörös arány
		kék	zöld	vörös	távoli vörös	összesen		
H	R1B1	109±13	39±3	97±8	38±3	245±23	0,89	2,55
H	R3B1	48±3	38±3	162±27	36±4	248±30	3,38	4,51
L	R1B1	82±9	30±4	81±12	30±4	193±23	0,99	2,72
L	R3B1	45±7	32±2	130±13	32±2	206±16	2,94	4



1. **ábra:** A növények elhelyezkedése a különböző kezeléseknél. Az ábrán a barna négyzetek a cserepeket jelölik, a zöld körök pedig a paradicsom növényeket (2 db/cserép). Az első polcrendszeren a növények közelebb helyezkedtek el a fénytestekhez (magas fényintenzitás), a második polcrendszeren pedig távolabb (alacsony intenzitás). Mindkét polcrendszeren a falhoz közeli oldal (az ábrán a felső sor) felett világított az R3B1 LED, elől (alsó sor) pedig az R1B1 LED.

(Forrás: Saját ábra)

3.6.2 Módosított UV-C kezelés

Ebben az ismétlésben kizárólag az éretlen, zöld terméseket világítottuk meg UV-C fénnel a szüret után azonnal, minden fénykezelés terméseinek felét. Az alkalmazott expozíció 12 perc volt, 2 perccel hosszabb, mint az első kísérletben, mert ott semmilyen hatást nem váltott ki a kezelés. Ezután utóérleltük, és a bepirosodott bogyókat pürésítettük és fagyasztottuk a mérésekig. Az utóérlelt bogyók közül az UV-C fénnel nem kezelt bogyók egy hét alatt érték be, míg az UV-C fénnel kezelték 2 hét alatt.

3.6.3 Mérések

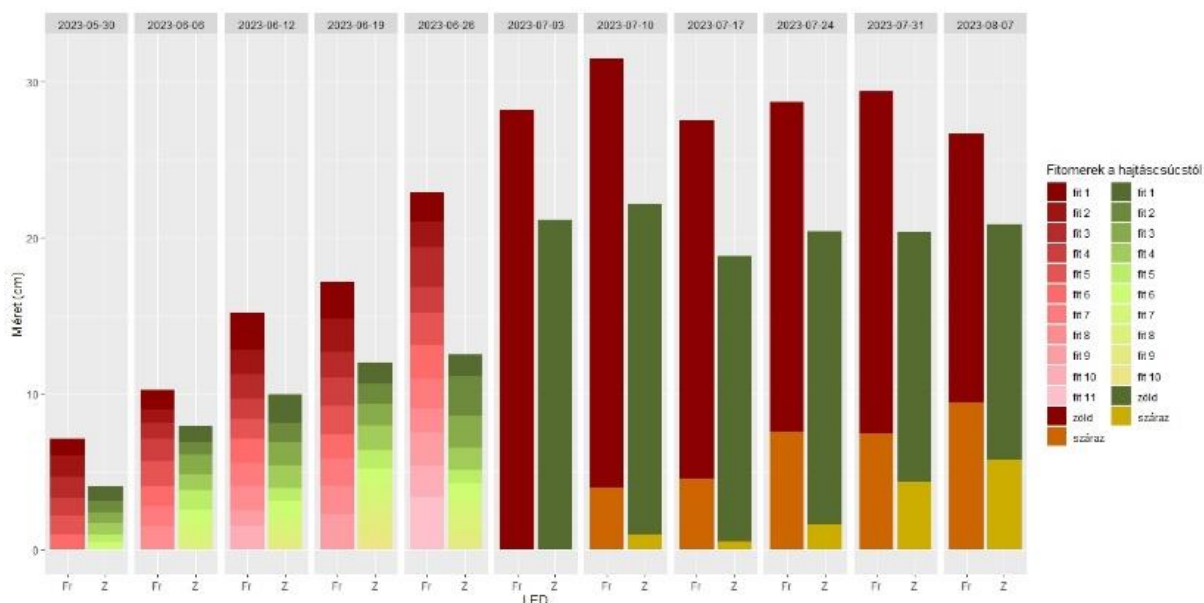
Ennél a kísérletnél is két alkalommal mértük a SPAD-ot, a fotoszintézist, a fluoreszcenciát és a reflektanciát ugyanazokkal a módszerekkel. A mérések a 7. és a 10. héten történtek, ellentétben az előző kutatásban, ahol a 9. és a 12. héten mértünk, de itt a növények hamarabb elérték azt a fejlettségi stádiumot, ahol a mérések aktuálisak. Mértük a növények friss és száraztömegét, és mértük a bogyók átlagos tömegét. Az érett bogyóknak vizsgáltuk a titrálható savasságát, a °BRIX tartalmát és az összes antioxidáns kapacitását a fentebb ismertetett eljárásoknak megfelelően. Az utóérlelt terméseken ezek mellett mértünk MDA tartalmat is. Az adatok kiértékelését R programmal végeztük.

4 Eredmények és értékelésük

4.1 A különböző fényreceptek hatása a morfológiai tulajdonságokra

4.1.1 Növénynövekedés

A növények növekedését tekintve jól látható fénykezelésenként, hogy a termésszíneződésig (06.26.) szinte lineáris a növekedés (2. ábra). A +FR növényeknek hosszabbak a fitomerjei (levélből, nódusból, internódiumból és rügyből álló fejlődési egység) és több is van belőlük, mint a +Z növényeknek, ezt mutatja az ábrán a színátmenet. Ezt a különbséget a fitokróm hatásnak köszönhetjük, amely a +FR-nél árnyékelkerülési reakciót indított el, így megnyúltak a növények (Buchanan et al., 2015; Taiz et al., 2015). Ezt láthatjuk a 17. képen, amelyen +FR növény van. A mellette lévő 18. képen egy ugyanakkor fényképezett sokkal kompaktabb +Z növény látható. A növények mindkét fénykezelés alatt ugyanakkor kezdtek el kopaszodni, ez a 2. ábra utolsó oszlopain látszik. A színkezelések között nem volt szignifikáns különbség a hajtás és a gyökér friss és száraztömeg tekintetében.



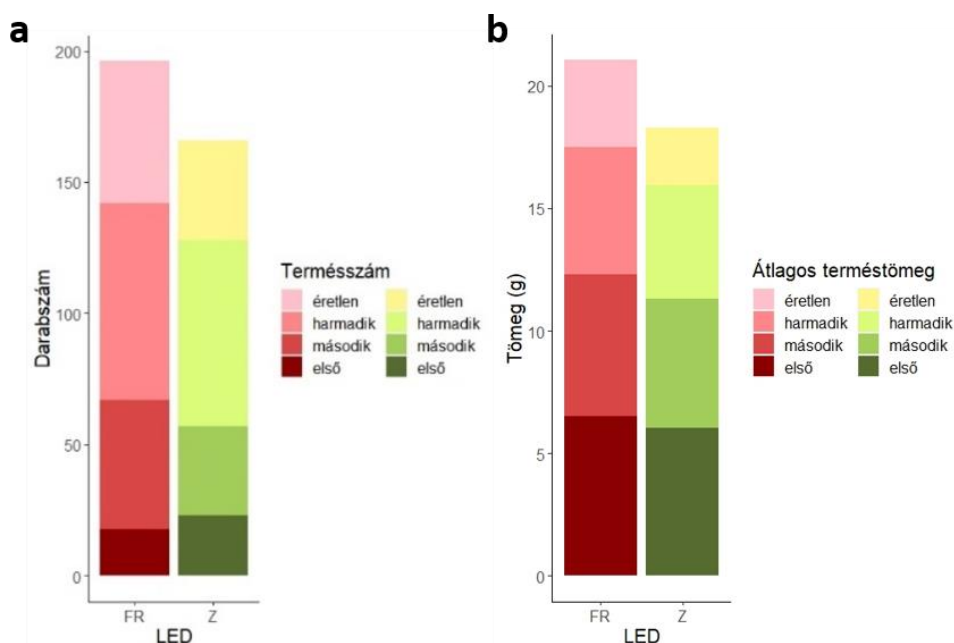
2. **ábra:** A növény növekedése fénykezelésenként, hetente. A színátmenetek a fitomerek számát és méretét mutatják. A színátmenet nélküli oszlopok alján az eltérő színek a növények felkopaszodott szárméretét jelzik. (Forrás: Saját ábra)



17-18. kép: +FR és +Z növények a 13. héten.
(Forrás: Saját fénykép)

4.1.2 Termésmennyiség

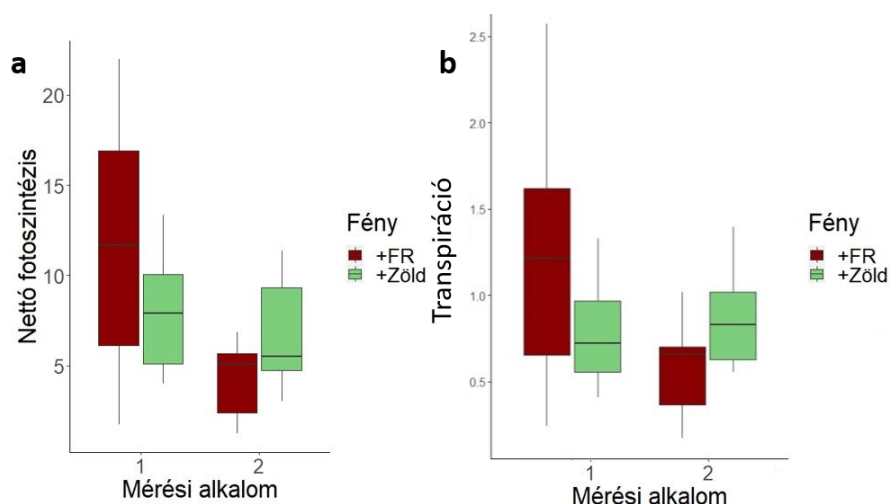
A +FR-ről egy héttel előbb tudunk termést szüretelni, mint a +Z-ről, mivel a fitokróm hatás lerövidítette a virágzásig eltelt időt a +FR-nél, a zöld fény viszont kikapcsolta a kriptokróмок hatását, így gátolta a +Z növények fotomorfogenezisét (Buchanan et al., 2015; Taiz et al., 2015). Más kutatásokhoz hasonlóan a távoli vörös fénykiegészítés növelte a termések tömegét (Ji et al., 2019; Kalaitzoglou et al., 2019) és darabszámát (Vitale et al., 2022), ez szintén a fitokróмокnak tulajdonítható hatás. Ezt mutatja a 3. a) és b) ábra, ahol a fénykezeléseken kívül a szedési időpontok szerint is csoportosítottuk a termések számát és átlagtömegét, ugyanis minél később volt a szüret, annál kisebbek voltak a paradicsomok.



3. ábra: A termések száma (a) és átlagos tömege (b) fénykezelésenként és szedési alkalmanként ábrázolva az éretlen termésekkel együtt.
(Forrás: Saját ábra)

4.2 A fényreceptek hatása a paradicsom fotoszintetikus tulajdonságaira

A párologtatás mértéke egyenesen arányos volt a fotoszintézissel (4. a) és b) ábra). Az 1. méréskor a +FR nettó fotoszintézise szignifikánsan ($p=0,038$) nagyobb volt, mint a +Z. A 2. méréskor ez megfordult, +Z alatt volt magasabb ($p=0,015$). A +FR nettó fotoszintézise szignifikánsan magasabb volt ($p<0,001$) az első mérés alkalmával, a +Z viszont nem volt szignifikáns különbség a két mérési időpontban. Ebből az látható, hogy a különbségekért elsősorban a +FR kezelt növények fotoszintézis- és transzspiráció-csökkenése volt felelős.



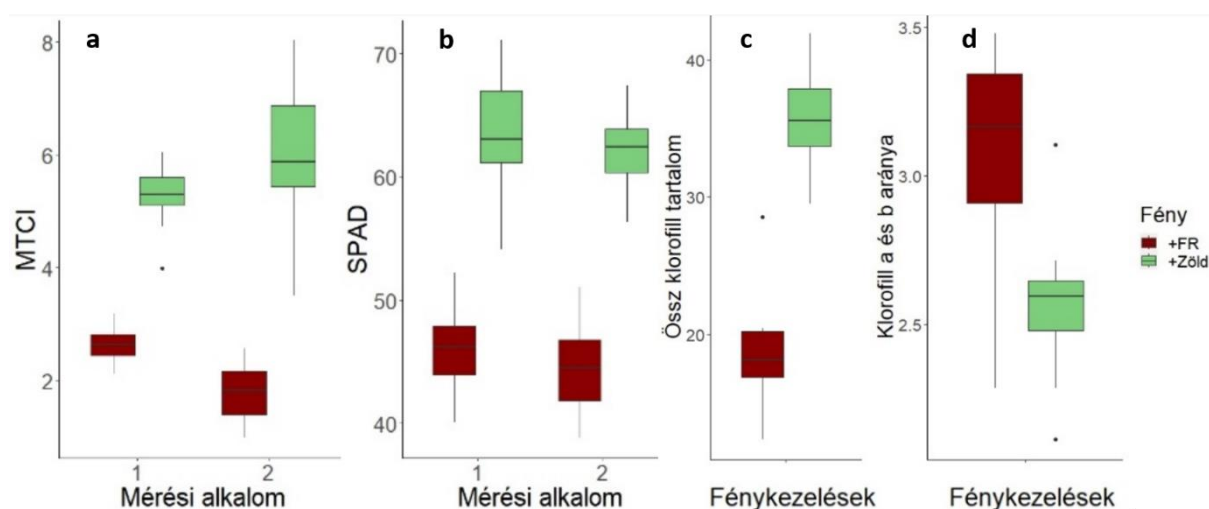
4. ábra: A paradicsomnövények nettó fotoszintézise ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (a) és párologtatása ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (b) fénykezelésenként és mérési alkalmanként.

(Forrás: Saját ábra)

A klorofilltartalommal arányos változók egyenesen arányosak voltak egymással (5. a), b) és c) ábra). A levelek SPAD és MTCI értéke mindkét mérés alkalmával szignifikánsan magasabb volt ($p<0,001$) a +Z-ben, mint a +FR-ben, és ezt látjuk az összklorofill esetében is, emellett az összklorofill tartalom az összkarotinoid tartalommal is egyenes arányban állt. A klorofill-a és -b aránya a +FR-ben magasabb volt, mint a +Z-ben (5. d) ábra). A +Z besugárzás alatt termesztett növények levélszíne sötétebb volt az eltérő pigmentösszetétel miatt (18. kép). Ugyanilyen eredményeket kapva Kalaitzoglou et al. (2019), X. Liu et al. (2012) és Vitale et al. (2022) arra a következtetésre jutottak, hogy a fotoszintézis gyengülése a klorofill-szint (különösen a klorofill-a) csökkenése miatt következik be, amely közvetlenül részt vesz a fotoszintetikus aktivitás meghatározásában. Ezt mi a 2. mérés +FR kezelése esetében tapasztaltuk (csökkent fotoszintézis, alacsonyabb pigmenttartalom). Az 1. mérésnél viszont az alacsonyabb fotoszintetikus pigmenttartalom ellenére a paradicsomlevél magasabb levélfotoszintézis intenzitást mutatott. Mivel a távoli vörös nem fotoszintetikusan aktív

sugárzás, ez a hatás az Emerson-fokozó hatásnak köszönhető (X. Liu et al., 2012). A fotoszintetikus pigmentek leszabályozása a +FR növényekben biztonsági stratégiát jelenthet a fényelnyelés csökkentésére, így elkerülhető a PSII fénykárosodása korlátozott fotoszintetikus aktivitás mellett. Ezt alátámasztja a klorofill a/b arány növekedése a +FR-ben, amely általában a nagyobb fényintenzitásnak kitett levelekben fordul elő. A csökkent klorofill-b főként a nagy energiájú kék hullámhosszok elnyelésében játszik szerepet (Vitale et al., 2022).

A paradicsommal kapcsolatos jelenlegi eredmények arra utalnak, hogy a távoli vörös hiánya negatív hatással volt a fotoszintézisre az Emerson-fokozó hatás hiánya miatt a +Z kezelésben (1. mérés) (Kalaitzoglou et al., 2019).



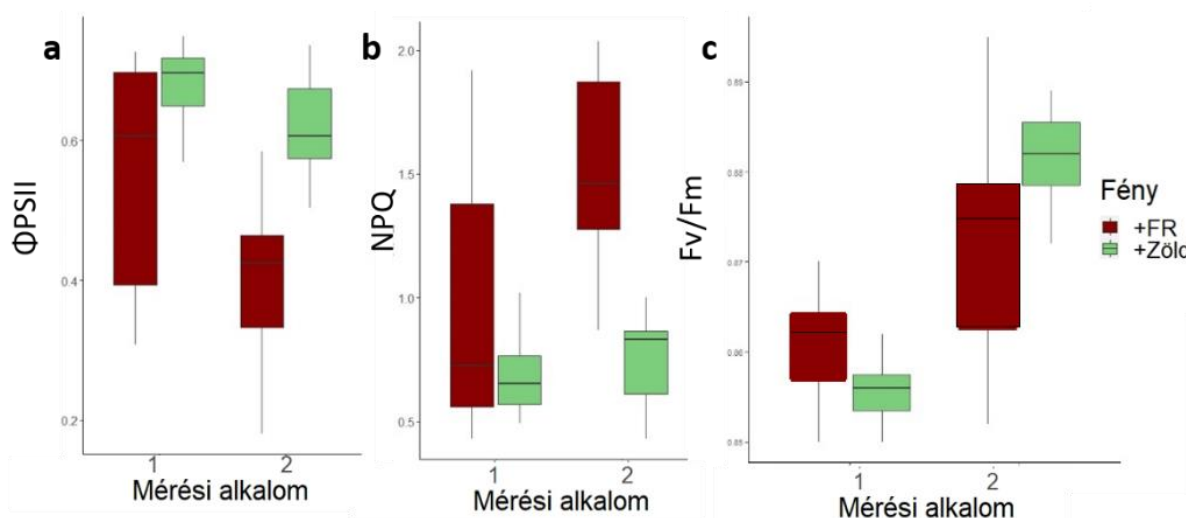
5. ábra: A klorofilltartalom alakulása az MTCI vegetációs index (a), a SPAD mérés (b), és a leveleken mért pigmenttartalom (c) alapján, valamint a klorofill-a és klorofill-b aránya (d) fénykezelésként és mérési időpontként a leveleken mért pigmenttartalom alapján.
 (Forrás: Saját ábra)

A fotokémiai reakcióban közvetlenül résztvevő pigmentek a reakciócentrumokban lévő klorofill-a pigmentek. Ezen pigmentek fényelnyelését, vagyis a nem ciklikus energiatranszport kvantumhozamát a ΦPSII jellemzi (6. a) ábra). Mivel a +Z növényekben több klorofill van, így több reakciócentrumuk is van, ezért magasabbak a +Z ΦPSII értékei a mérési időponttól függetlenül (1. mérés: $p=0,003$; 2. mérés: $p<0,001$).

Az NPQ-érték (non-photochemical quenching) emellett jól mutatja a fölösleges gerjesztési energia hő formájában történő leadását (6. b) ábra), ami a +FR növényeknél volt több mindkét mérés alkalmával (1. mérés: $p=0,021$; 2. mérés: $p<0,001$). A túl sok gerjesztési energia miatt fokozott mértékben keletkeznek káros anyagok, például oxigéngyökök, amelyek a fotokémiai reakciócentrumokat károsíthatják, ezért a 2. mérésre a +FR-ben méginkább csökkent a ΦPSII ($p=0,005$). Ezzel fordítottan arányosan szignifikánsan növekedett az NPQ ($p=0,003$), amely mutatja az antenna komplex működésének gyengülését is. Az NPQ arányos

a xantofill pigmentek epoxidációs állapotában bekövetkező rövid távú reverzibilis változásokkal (Trojak et al., 2022). Védekezés képpen a xantofilok detoxifikálják az oxigéngyököket (Tuba & Csintalan, 2009), azonban ez a mechanizmus gyakran nem elégséges, a folyamatos +FR oxidatív stresszt válthatott ki, ezért csökkent a 2. mérés idejére a +FR nettó fotoszintézise a +Z kezelésben mért alá. (Vitale et al., 2022)

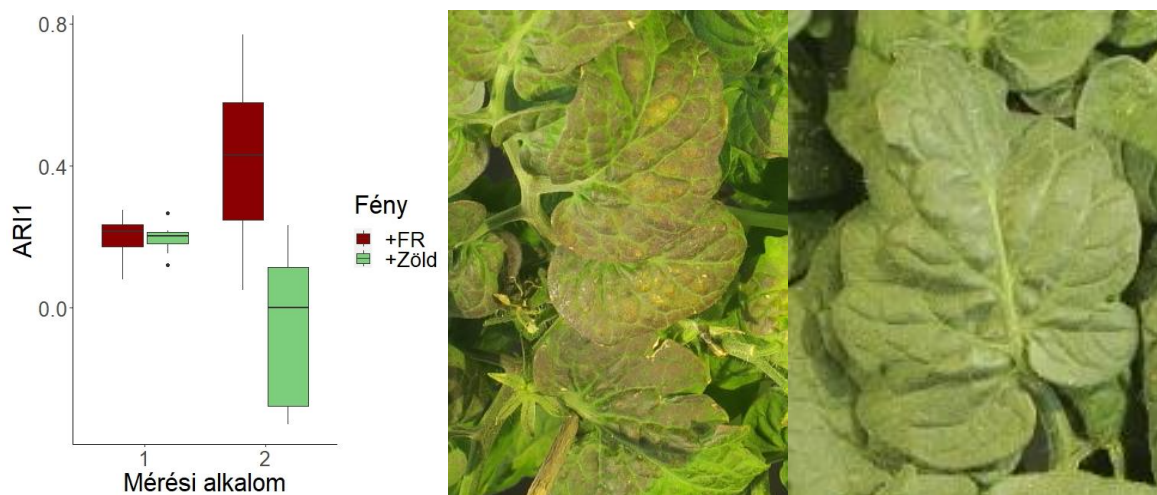
Az F_v/F_m , az 1. mérésnél a +FR kezelésben szignifikánsan magasabb ($p=0,004$) volt, mint a +Z kezelésben, míg a 2. mérésnél pont fordított helyzetet tapasztaltunk ($p=0,018$) (6. c) ábra). Ez is magyarázhatja, hogy az 1. mérésnél miért volt a +FR fotoszintézise magasabb a +Z-nél. Az F_v/F_m mindkét fénykezelésnél szignifikánsan alacsonyabb volt az 1. mérés alkalmával (+FR: $p=0,017$, +Z: $p<0,001$), mint a 2.-nál. A pigmenttartalom csökkenése arra utalhat, hogy mindkét fénykezelésnél valamivel kevesebb PSII volt a 2. mérésnél, ám azok maximális fotokémiai hatásfoka nőtt.



6. ábra: A Φ_{PSII} (a), az NPQ (b) és az F_v/F_m (c) fluoreszcenciamérés eredményei fénykezelésenként és mérési időpontoként.
(Forrás: Saját ábra)

A növények kékes-lilás elszíneződéséért felelős antocián tartalmat tükröző ARI1 vegetációs index a 2. mérésnél a +FR alatt szignifikánsan magasabb volt, mint a +Z-nél ($p<0,001$) (7. ábra). Emellett a +FR az 1. mérésnél szignifikánsan alacsonyabb ($p=0,003$), míg a +Z szignifikánsan magasabb ARI1 értéket mutatott ($p=0,001$), mint a 2.-nál. A kék-vörös fénykezelést távoli vörössel vagy zölddel kiegészítő kutatások is hasonló eredményekre jutottak (Lanoue et al., 2019; Trojak et al., 2022; Vitale et al., 2022). A fitokrómok kulcsszerepet játszanak a paradicsomban az antocianin (antocianidin-glikozidok) bioszintézisében. Az antocianinokról kimutatták, hogy fényvédő szerepet töltenek be, és segítenek helyreállítani az egyensúlyt a fényelnyelés és a CO_2 -megkötés között, így csökkentve a fotooxidatív károsodás

lehetőségét (Lanoue et al., 2019). Trojak et al. (2022) kutatásában az antocianinok fokozott felhalmozódása +FR-ben csökkentette a fotoszintetikusan aktív pigmentek által elnyelt fény mennyiségét, ezáltal csökkentette a kvantumhozamot, ez nálunk is látszik az 6. a) ábrán. A zöld hullámhosszok megfordíthatják a kriptokrómok kék fény által közvetített jeleit, ezért gátlódhat az antocianintermelés (Vitale et al., 2022). A fénykezelések hatására kialakult levélszín különbségek jól látszódnak a 19. és 20. képeken.



7. ábra: Az antociántartalom alakulása az ARI1 vegetációs index szerint fénykezelésenként és mérési időpontoként.

19-20. kép: Antociános színváltozás az augusztus 7-i +FR és +Z leveleken.
(Forrás: Saját ábra, saját kép)

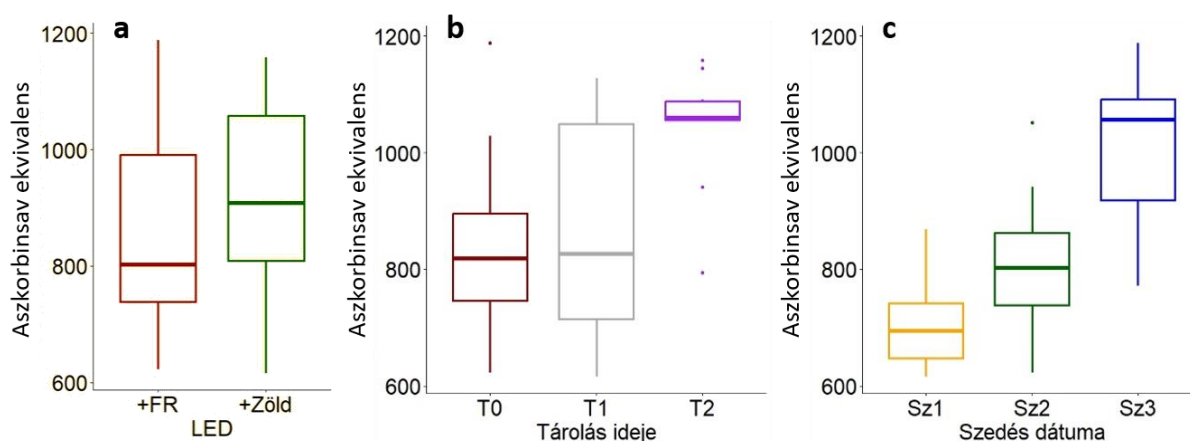
A különböző fényreceptek alatt nevelt paradicsomok fentebb tárgyalt fotoszintetikus tulajdonságait összefoglalva láthatjuk a 3. táblázatban, ahol az adatok átlagai és szórása szerepelnek.

3. táblázat: A transzspiráció, a fotoszintézis, az Fv/Fm, az NPQ, a Φ PSII, a SPAD, az MTCI és az ARI1 index értékek átlagai és szórása fénykezelésenként és mérési alkalmanként.
(Forrás: saját táblázat)

LED	+FR	+Z	+FR	+Z
Mérés	1	1	2	2
Transzspiráció	1.18 (± 0.5)	0.78 (± 0.08)	0.64 (± 0.13)	0.88 (± 0.08)
Fotoszintézis	11.7 (± 48.94)	7.99 (± 9.92)	4.75 (± 8.93)	6.53 (± 8.53)
Fv/Fm	0.85	0.86	0.87	0.88
NPQ	1.01 (± 0.29)	0.69 (± 0.02)	1.53 (± 0.14)	0.8 (± 0.06)
Φ PSII	0.55 (± 0.02)	0.68	0.39 (± 0.02)	0.62 (± 0.01)
SPAD	46.06 (± 12.94)	63.68 (± 22.56)	45.39 (± 21.49)	62.13 (± 12.86)
MTCI	2.67 (± 0.11)	5.16 (± 0.52)	1.82 (± 0.28)	5.99 (± 1.44)
ARI1	0.22 (± 0.01)	0.19	0.42 (± 0.05)	0.02 (± 0.12)

4.3 A fényreceptek hatása a paradicsom termékek beltartalmára

A paradicsom egyik legfontosabb beltartalmi paramétere az antioxidáns kapacitás, amely meghatározza zöltség egészségességét. A paradicsom termésében található fő antioxidánsok a karotinoid pigmentek, a likopinok, az aszkorbinsav és a fenolos vegyületek. (C.-H. Liu et al., 2012). Vitale et al. (2022) azt tapasztalták, hogy a különböző fénykezelések módosították a paradicsom terméseinek antioxidáns tulajdonságait, ami azt bizonyítja, hogy a fényspektrum manipulálásával bioaktív vegyületekben gazdagabb zöltségek nyerhetők. A vörös-kék fény különösen erősen fokozta a termékek antioxidáns tulajdonságait. A mi kutatásunkban az összes antioxidáns kapacitás a +Z terméseknél volt magasabb, de éppen nem szignifikánsan ($p=0,051$) (8. a) ábra). Továbbá azt tapasztaltuk, hogy utóérés során magasabb lett az antioxidáns kapacitás ($p<0,001$), a tárolás szerinti T0-ban volt a legalacsonyabb, egy hétre rá még éppen nem volt szignifikáns a növekedés ($p=0,057$), de T2-ben szignifikánsan magasabb lett, mint T1-ben ($p=0,009$) (8. b) ábra). Szedés szerit az Sz3 bogyók antioxidáns tartalma szignifikánsan magasabb volt, mint az egymástól nem különböző Sz1 és Sz2 ($p<0,001$) bogyóké (8. c) ábra). Ezek alapján a minél érettebb, és a minél hosszabb ideig a növényen tartott termékek a legegészségesebbek.



8. ábra: A termékek összes antioxidáns kapacitásának eredményei aszkorbinsav ekvivalensben kifejezve fénykezelésenként (a), tárolási (b) és szedési időpontoként (c).
(Forrás: Saját ábra)

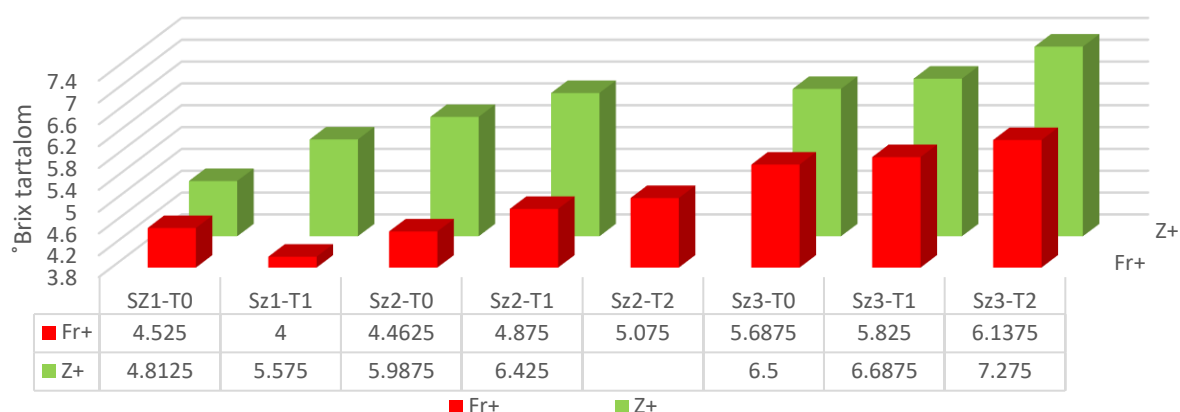
A vörös, kék és UV-fény hullámhossza különösen erősen befolyásolja a polifenolok felhalmozódását, fokozva az antioxidáns kapacitást és a reaktív oxigénfajták közönbösítésének képességét a paradicsom gyümölcseiben. Az vörös-kék kezelés által kiváltott magasabb antioxidáns kapacitás a kriptokrómokkal hozható összefüggésbe, amelyek a flavonoidok és a likopin szintjének növekedését idézik elő (Vitale et al., 2022). Különböző fajknál fotooxidatív

stressz léphet fel a gyümölcsökben az érés során. Így nem zárható ki, hogy a +FR alatti növekedés a fotoszintetikus és fotokémiai aktivitás csökkentésén keresztül oxidatív stresszt indukálhat a levelekben és a gyümölcsökben, aktiválva a védelmi rendszereket (Vitale et al., 2022).

A sejtekben túlzottan felhalmozódott reaktív oxigénfajták, beleértve a hidrogén-peroxidot, lipid-peroxidációt okozhatnak, ezáltal veszélyeztetve a membrán stabilitását, és mérgező termékeket eredményezhetnek. A többszörösen telítetlen zsírsavak peroxidációja során MDA képződik, mely az egyik legreaktívabb aldehid forma. A sejtekben tovább diffundálva DNS és fehérje károsodást okozhat (Li et al., 2021).

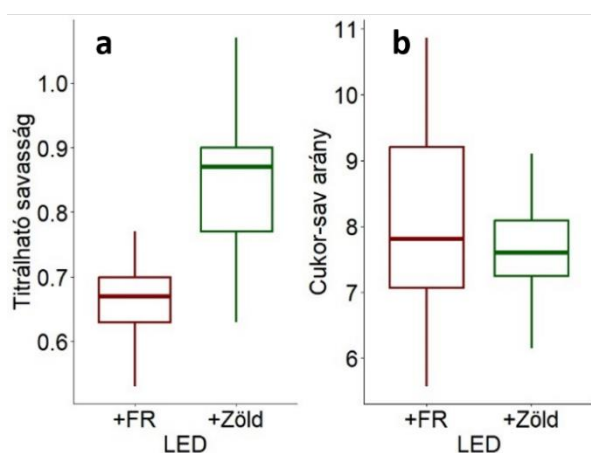
Kutatásunkban az érettség és a fénykezelés nem eredményezett szignifikáns különbségeket az MDA tartalomban, ellentétben Li et al. (2021) kutatásával. Munkájukban az MDA felhalmozódása növekvő tendenciát mutatott a paradicsom érése során, és a kék fénykezelés szignifikánsan növelte az MDA szintet, míg a vörös és vörös-kék kezelések alacsonyabb MDA-tartalmat eredményeztek a termésben. A tárolás és a szedés esetében viszont a legkésőbbi időpontok (T2 és Sz3) alkalmával magasabb volt az MDA-szint, mint a frissebb vagy a hamarabb betakarított termésekben (tárolás szerint: $p=0,039$, szedés szerint: $p=0,039$).

Az oldható cukortartalom és a titrálható savtartalom a bogyó minőségének mutatójaként szolgál, mivel ezek aránya határozza meg az ízt. A °BRIX tartalmat a fénykezelés, a szedés és a tárolás is befolyásolta (9. ábra). A °BRIX értékek egyenesen arányosak az összes szárazanyag és cukortartalommal, mivel ezeket a °BRIX adatokból származtattuk. A +Z °BRIX foka szignifikánsan magasabb volt ($p<0,001$), mint a +FR terméseké, ezt Zhang et al. (2019) azzal magyarázták, hogy a termések mennyiségének és méretének növekedése a +FR fény hatására a gyümölcs minőségének rovására megy. A +Z magasabb °BRIX fokát az is befolyásolhatja, hogy jobb volt ezen növények fotoszintetikus teljesítménye. A szedés ideje szerint csoportosítva az Sz3 terméseiben szignifikánsan magasabb volt a °BRIX, mint az Sz1-ben és az Sz2-ben ($p<0,001$; $p<0,001$). A szedési kategóriákon belül a tárolási időt tekintve a °BRIX tartalom a T2-ben szignifikánsan magasabb, mint a T0-ban ($p=0,035$). Jól látszik ezen kívül az adatok átlagán, hogy ha sorba állítjuk a szedési időpontokat (Sz1, Sz2, Sz3) és azokon belül a tárolási időpontokat (T0, T1, T2) mindkét fénykezelésnél lineárisan növekszik a °BRIX (ha nem is mindenhol mutatkozott szignifikánsnak az eltérés). A tárolás szerinti cukortartalom növekedés nem meglepő, mivel a paradicsom utóérő, és minden cukortartalmú termésben az érés során a keményítők cukorra alakulnak (Tuba & Csintalan, 2009). Az ábra szerint a növényen minél később érnek a bogyók, annál édesebbek és ezt nem lehet a korán leszedett termések hosszú idejű tárolásával felülmúlni.



9. ábra: A termékek átlagos °BRIX tartalma fénykezelésenként (z tengely), szedési időpontonként, azon belül tárolás hosszaként (x tengely).
(Forrás: Saját ábra)

A savtartalom szignifikánsan csökken az éréssel ($p < 0,001$), míg a cukortartalom nő, így az éretlen termékek cukor/sav aránya nagyon alacsony volt ($p < 0,001$) az érettekhez képest. A fénykezelések ugyanúgy befolyásolták a savasságot, mint a cukortartalmat, vagyis a +Z növények titrálható savassága szignifikánsan magasabb volt ($p < 0,001$), mint a +FR növényeké (10. a) ábra). Ebből az következik, hogy a fénykezelésenkénti cukor/sav arányban nem volt szignifikáns különbség, viszont a +FR fénykezelés alatt nagyobb volt a szórás (10. b) ábra). Mindkét fénykezelés alól „jó” ízű paradicsomokat takarítottunk be, mivel az eredmények azt mutatják, hogy átlagosan 7-10 között volt a cukor/sav arány, ami általános vélemények szerint a „jó” ízű paradicsomok jellemző értéke (Helyes, 2007). A termékek tárolása nem eredményezett szignifikánsan eltérő savasságot és cukor/sav arányt sem. A szedés ideje alapján az SZ3 savassága alacsonyabb volt az SZ2-nél és az SZ1-nél is ($p = 0,014$, $p < 0,001$)



10. ábra: A termékek titrálható savassága (a) és cukor/sav aránya (b) fénykezelésenként.
(Forrás: Saját ábra)

Az UV kezelés szerint a termésekben sem a °BRIX tartalomban, sem az összes antioxidáns kapacitásban, sem az MDA tartalomban, sem a titrálható savasságban nem volt szignifikáns különbség. Ez adódhatott abból, hogy a már érett terméseket kezeltük az UV-C fénnel, és nem az érett zöld bogyókat, mint C.-H. Liu et al. (2012), ezért a kutatás ezen pontja további vizsgálatokat igényel.

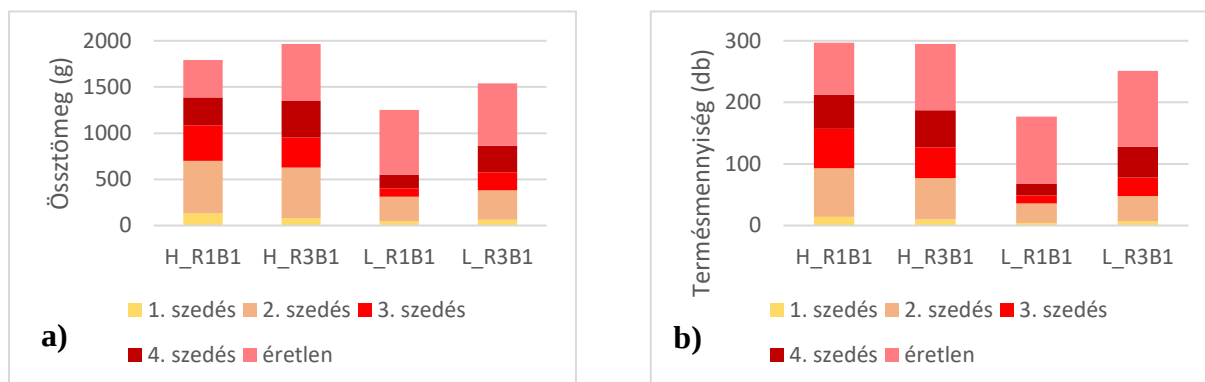
4.4 Az ismételtes eredményei

4.4.1 Morfológiai tulajdonságok

A növényeknek a végső magasságát vizsgálva azt kaptuk, hogy az alacsony fényintenzitást (L) kapó növények magasabbak voltak (átlagosan 31,7 cm), mint a magas fényintenzitást (H) kapóak (átlagosan 27,6 cm), ez az eredmény egyezik Ke et al. (2022); Utasi et al. (2023) és Zheng et al. (2023) eredményeivel, ahol megállapították, hogy az alacsony besugárzás árnyék érzetet kelthet a növényekben, ezért fokozott növekedés figyelhető meg. Ezen kutatásunk növényei átlagosan magasabbak voltak az első kísérlet növényeinél, ahol a +Fr átlagmagassága 26,7 cm, a +Z átlagmagassága pedig 20,9 cm volt. A különböző spektrum arányok nem eredményeztek megfigyelhető különbséget a növénytörzs magasságában, de az R3B1 növények elágazóbbak voltak (5,8 db elágazás), mint az R1B1 kezelésűek (4,5 db elágazás). A növények gyökereinek és hajtásainak friss és száraztömegében nem volt különbség a négy fénykezelés között, viszont az első kísérlethez képest sokkal nagyobbak voltak. A friss tömegek a következőképpen alakultak: 1. kísérlet hajtás: 68,4 g, 2. kísérlet hajtás: 114,7 g, 1. kísérlet gyökér: 14,2 g, 2. kísérlet gyökér: 26,2 g. Ezen méretbeli különbségek a két kísérlet között valószínűleg abból adódhattak, hogy a 2. kísérletben jobban szabályozott volt a hőmérséklet és az öntözés.

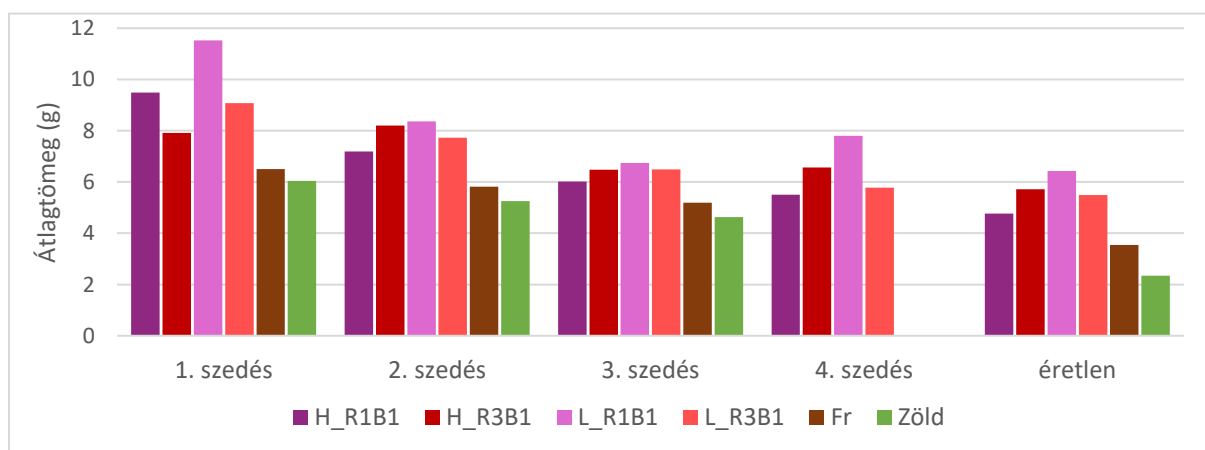
A termésmennyiségről és az össztömegről elmondhatjuk, hogy ez a két adat teljesen korrelál egymással. L fényintenzitáson kevesebb és kisebb termések fejlődtek, mint H intenzitáson (11. ábra). Ez az eredmény megegyezik Deram et al. (2014) kutatásában leírtakkal: a fényintenzitás növelése megnöveli a termésmennyiséget. Az R3B1 spektrumarány nagyobb terméseket adott mindkét fényintenzitáson, mint az R1B1, de a termésmennyiségben ez a főlény csak az alacsony intenzitáson figyelhető meg. Az első kutatás terméseinek össztömegét (+Fr=~1000 g, +Z=~750 g) magasán felülmúlta a második kutatásbeli összes tömeg (L_R3B1: 1539 g, L_R1B1: 1250 g, H_R3B1: 1964 g, H_R1B1: 1793 g), ahogyan a darabszámot is

(L_R3B1: 251 db, L_R1B1: 177 db, H_R3B1: 295 db, H_R1B1: 297 db, +Fr=~200 db, +Z=~170 db).



11. ábra: A termékek össztömege (a) és a termékek mennyisége (b) fénykezelésenként és szedési alkalmanként ábrázolva az éretlen termésekkel együtt.
(Forrás: Saját ábra)

Az átlagtömeget tekintve láthatjuk (12. ábra), hogy minden fénykezelés termésmeretei csökkentek a szedési időpontokkal. Mindegyik szedésnél a legmagasabb értéket L_R1B1 mutatta, de ezen volt a legkevesebb termés, és az össztömeg is itt volt a legalacsonyabb, így összességében nem teljesített jól. Ezután a H_R3B1 következik, ahol az össztömeg a legmagasabb. A 2. kísérlet összes fénykezelése jobban teljesített az 1. kísérletnél az átlagtömeget tekintve minden szedés alkalmával valószínűleg szintén az optimálisabb környezeti feltételek miatt.

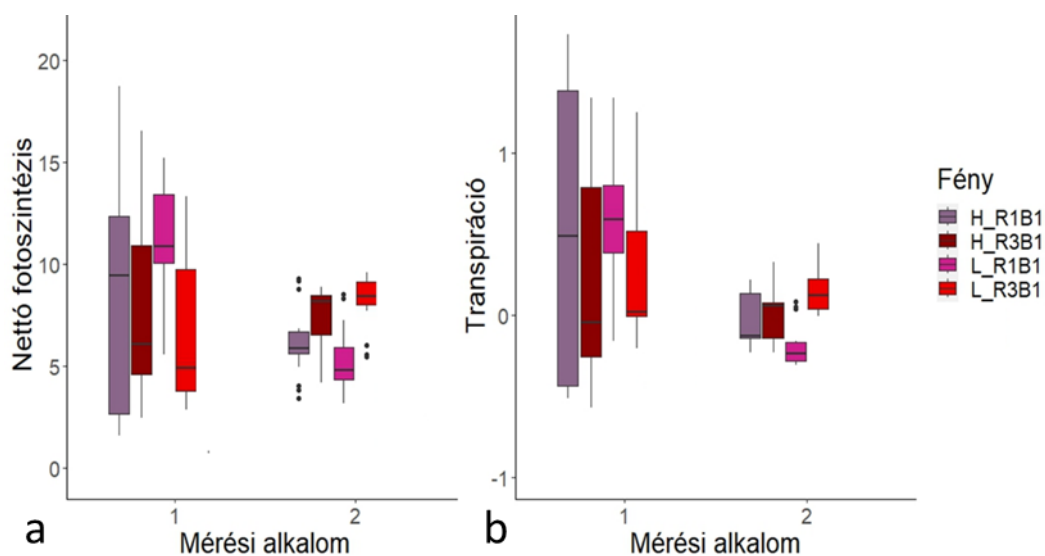


12. ábra: A termékek átlagtömege fénykezelésenként és szedési alkalmanként ábrázolva az éretlen termésekkel és az első kísérlettel együtt.
(Forrás: Saját ábra)

A 2. kísérletben a növények gyorsabban nőttek, és korábban virágoztak, mint az 1. kísérletben, de a termékek betakarítását mindkét kísérletben a 14. héten tudtuk elkezdni.

4.4.2 Fotoszintetikus tulajdonságok

A nettó fotoszintézis a második kísérletben az első mérési alkalomról a másodikra csökkent az 1:1 vörös-kék arányú fénykezeléseknél (H_R1B1: $p=0,036$, L_R1B1: $p<0,001$) úgy, mint az első kísérlet alkalmával, ahol szintén 1:1 volt a vörös-kék arány (4. táblázat, 13. ábra). A fotoszintézis H_R3B1 alatt nem változott, míg az L_R3B1 alatt növekedett ($p=0,031$) a második mérésre. Az első mérés alkalmával a fotoszintézis a magas fényintenzitás mellett nem különbözött a két fénykezelésnél, alacsony intenzitáson viszont a fotoszintézis az R1B1 alatt magasabb volt, mint az R3B1 ($p=0,034$). A második mérésnél a 3:1 vörös-kék arányú kezelések esetében tapasztaltuk a magasabb fotoszintézis eredményeket. Összességében elmondható, hogy a vörös arányának növekedése elsősorban a kísérlet előrehaladtával fejtette ki pozitív hatását a fotoszintézisre.



13. ábra: A nettó fotoszintézis (a) és transzspiráció (b) alakulása a második kísérletben.
(Forrás: Saját ábra)

4. táblázat: A nettó fotoszintézis értékek átlagai és szórása fénykezelésenként és mérési alkalmanként a második mérési sorozatban.
(Forrás: saját táblázat)

Mérés	LED	Nettó fotoszintézis
1	+Fr	10.83 (± 46.84)
1	+Z	7.12 (± 9.67)
1	H_R1B1	8.59 (± 32.95)
1	H_R3B1	7.42 (± 18.68)
1	L_R1B1	11.2 (± 7.09)
1	L_R3B1	6.72 (± 13.03)
2	+Fr	3.1 (± 8.48)
2	+Z	4.87 (± 8.29)
2	H_R1B1	6.14 (± 2.42)
2	H_R3B1	7.31 (± 2.2)
2	L_R1B1	5.22 (± 2.16)
2	L_R3B1	8.32 (± 1.23)

5. táblázat: Az Fv/Fm, az NPQ, a Φ PSII, a SPAD, az MTCI és az ARII index értékek átlagai és szórása fénykezelésenként és mérési alkalmanként a második mérési sorozatban.
(Forrás: saját táblázat)

Mérés	LED	Fv/Fm	NPQ	Φ PS2	SPAD	MTCI	ARI1
1	H_R1B1	0.84	0.78 (± 0.08)	0.62	50.5 (± 2.82)	2.5 (± 0.03)	-0.09 (± 0.03)
1	H_R3B1	0.84	0.67 (± 0.01)	0.67 (± 0.01)	50.07 (± 9.95)	2.45 (± 0.16)	0.04 (± 0.03)
1	L_R1B1	0.86	0.91 (± 0.04)	0.62 (± 0.01)	47.24 (± 28.49)	2.26 (± 0.04)	-0.13 (± 0.02)
1	L_R3B1	0.85	0.88 (± 0.11)	0.62 (± 0.02)	49.96 (± 8.99)	2.5 (± 0.1)	-0.09 (± 0.05)
2	H_R1B1	0.87	1.6 (± 0.55)	0.45 (± 0.04)	47.11 (± 2.88)	2.91 (± 0.18)	-0.06 (± 0.01)
2	H_R3B1	0.85	1.31 (± 0.21)	0.53 (± 0.01)	50.19 (± 19.98)	2.75 (± 0.58)	-0.07 (± 0.01)
2	L_R1B1	0.88	1.84 (± 0.1)	0.57	48.81 (± 8.24)	3.05 (± 0.14)	-0.04
2	L_R3B1	0.87	1.5 (± 0.04)	0.44 (± 0.02)	47.76 (± 15.15)	2.41 (± 0.39)	-0.08

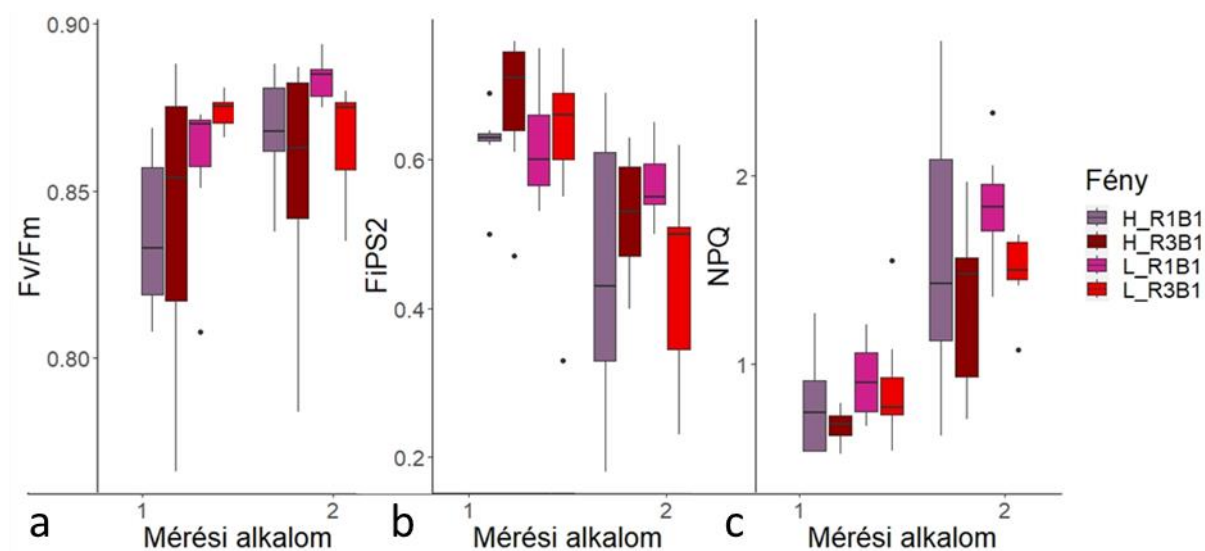
Az Fv/Fm az első mérésről a másodikra a 3:1 vörös kék arányú fénykezeléseknél nem változott, a többinél növekedett (H_R1B1: $p=0,0092$, L_R1B1: $p=0,0153$) (14. a) ábra). A második kísérletek Fv/Fm eredményeit vizsgálva az első mérésnél nem volt szignifikáns eltérés a kezelések között (kivéve, hogy L_R3B1 magasabb volt, mint H_R1B1 $p=0,0033$), a második mérésnél pedig az L_R1B1 kezelés volt a legmagasabb, a többi között nem volt különbség.

A Φ PS2 a második mérésre csökkent mindegyik fénykezelésnél, kivéve az L_R1B1-et, ahol nem változott (14. c) ábra). A második kísérletnél a Φ PS2 érték nem különbözött a fénykezelések között egyik mérés alkalmával sem (kivéve a második mérésnél, ahol L_R1B1 magasabb volt, mint L_R3B1 $p=0,0227$). Ke et al. (2022) kutatásában megfigyelték, hogy a magas PPFD csökkenti a II. fotorendszer kvantumhozamát és energiamegkötési hatékonyságát (Fv/Fm). Nálunk ez csak az Fv/Fm értéknél mutatkozott meg.

Az NPQ érték a második kísérletben az második mérésre jelentősen nőtt mindegyik fénykezelésnél úgy, mint a +Fr-nél az első kísérletben (14. b) ábra). Az NPQ a második kísérletnél az első mérésakor szinte minden fénykezelésnél megegyezett (kivéve, hogy L_R1B1 magasabb volt, mint H_R3B1 $p=0,01$), míg a második mérésakor az L_R1B1 szignifikánsan magasabb volt a többinél, ez magyarázhatja a gyengébb fotoszintézisét (Vitale et al., 2022).

Összességében a fotoszintetikus tulajdonságok szempontjából a legeredményesebb fénykezelés a H_R3B1 volt, mivel a fotoszintézis nem változott a két mérés között, sőt, a második mérésakor magas eredményt ért el. A leggyengébb fénykezelésnek az L_R1B1 bizonyult annak ellenére, hogy a második mérésre ennek volt a legmagasabb Fv/Fm értéke, és a $\Phi PS2$ értéke is magas volt. A $\Phi PS2$ értéke nem változott a két mérés között, míg minden más fénykezelésnél csökkent. A fotoszintézis viszont a második mérésre nagyot csökkent és a leggyengébb eredményt hozta. Legmagasabb NPQ értéke ennek a fénykezelésnek volt a második mérésakor.

A vörös-kék arányának növekedése azt eredményezte, hogy a fotoszintézis stabil volt a két mérés között, és a második mérésakor a 3:1 vörös-kék arányú fénykezelések jobban teljesítettek, mint az 1:1 arányúak. A fényintenzitás nem befolyásolta a fotoszintetikus tulajdonságokat kísérletünkben.

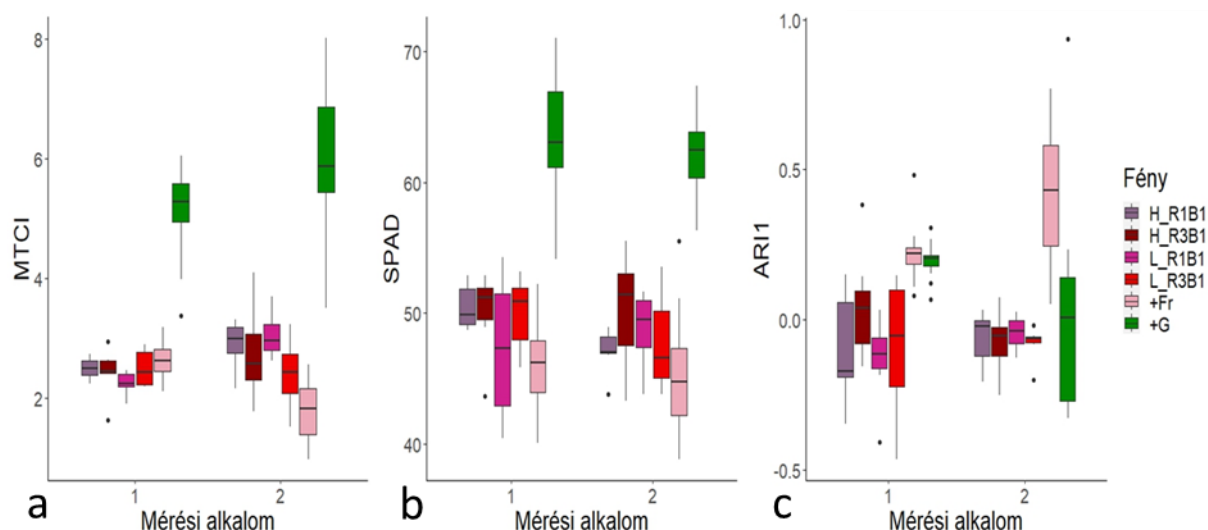


14. ábra: Az Fv/Fm (a), az NPQ (b) és a $\Phi PS2$ (c) fluoreszcenciamérés eredményei fénykezelésenként és mérési időpontoként a második kísérletben.
(Forrás: Saját ábra)

Az MTCI vegetációs index és a SPAD mérés is azt mutatja, hogy a második kísérletben a fénykezelések között nem volt jelentős eltérés a klorofill tartalomban egyik mérés alkalmával sem, és a mérések között sem változott ez az érték (15. a) és b) ábra). A vegetációs indexekkel

kifejezett pigmenttartalmak tehát nem magyarázzák meg a második mérés idejére a fluoreszcencia adatokkal igazolt fotoszintetikus hatékonyság csökkenését ($\Phi PS2$) és jelentősebb hődisszipációt (NPQ). Az első kísérletbeli +Z kezelés lényegesen nagyobb klorofill tartalmat eredményezett a levelekben, mint a második kísérlet fénykezelései mindkét mérés alapján, ez valószínűleg a távoli vörös spektrum hiányának eredménye (Kalaitzoglou et al., 2019). A +Fr alatt nevelkedő növények viszont valamivel kevesebb klorofillt tartalmaztak, mint a második kísérletben, ezt pedig a zöld-távoli vörös kombinált spektrum hatásának és az egyenletesebb környezeti körülményeknek tulajdoníthatjuk a második kísérlet során (Utasi et al., 2023; Vitale et al., 2022). Ellentétben Utasi et al. (2023) kutatásával, mi nem tapasztaltuk, hogy a vörös fény mennyisége pozitívan befolyásolta volna a klorofill tartalmat. Ennek lehet az az oka, hogy nem vizsgáltunk nagyobb vörös-kék arányú (9:1, 19:1) világítási rendszereket, ahol szembetűnőbbek lehetnek az eredmények. Szintén nem tapasztaltuk a fényintenzitás klorofillnövelő hatását, mivel a mi beállításaink (200 és $240 \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) a kutatások szerinti (Ke et al., 2022; Utasi et al., 2023; Zheng et al., 2023) legjobb eredménnyel jellemezhető $300 \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ alattiak voltak, és nem volt közöttük nagy különbség.

A második kísérletben mindkét mérés alkalmával azt láthatjuk, hogy a levelek nem tartalmazznak antociánokat, mivel az ARI1 index 0 körül mozog, és a kezelések között általában nem volt szignifikáns különbség (kivéve, hogy L_R1B1 alacsonyabb volt, mint H_R3B1 $p=0,0318$), továbbá, a leveleken sem tapasztaltunk lilás elszíneződéseket a mérések alkalmával (15. c) ábra). Míg Utasi et al. (2023) megfigyelték, hogy a fényintenzitás és a kék fény arányának növekedése antocianinok felhalmozódását idézte elő, mi az előbbi hatást nem tapasztaltuk. Az optimálisabb környezeti feltételek miatt a növényeken nem alakultak ki a stresszre utaló antociános levélszín változások a mérések időpontjára, amelyek két héttel korábbra estek, mint az első kísérletben. Később, a kísérlet vége felé itt is megjelentek lilás foltok a leveleken, de ez nem volt akkora mértékű, mint az első kísérlet alkalmával a +Fr kezelésnél.



15. ábra: A klorofilltartalom alakulása az MTCI vegetációs index (a) és a SPAD mérés (b) alapján, valamint az antociántartalom alakulása az ARI1 vegetációs index (c) szerint fénykezelésenként és mérési időpontoként a második kísérletben.
(Forrás: Saját ábra)

4.4.3 A termékek beltartalmi mutatói

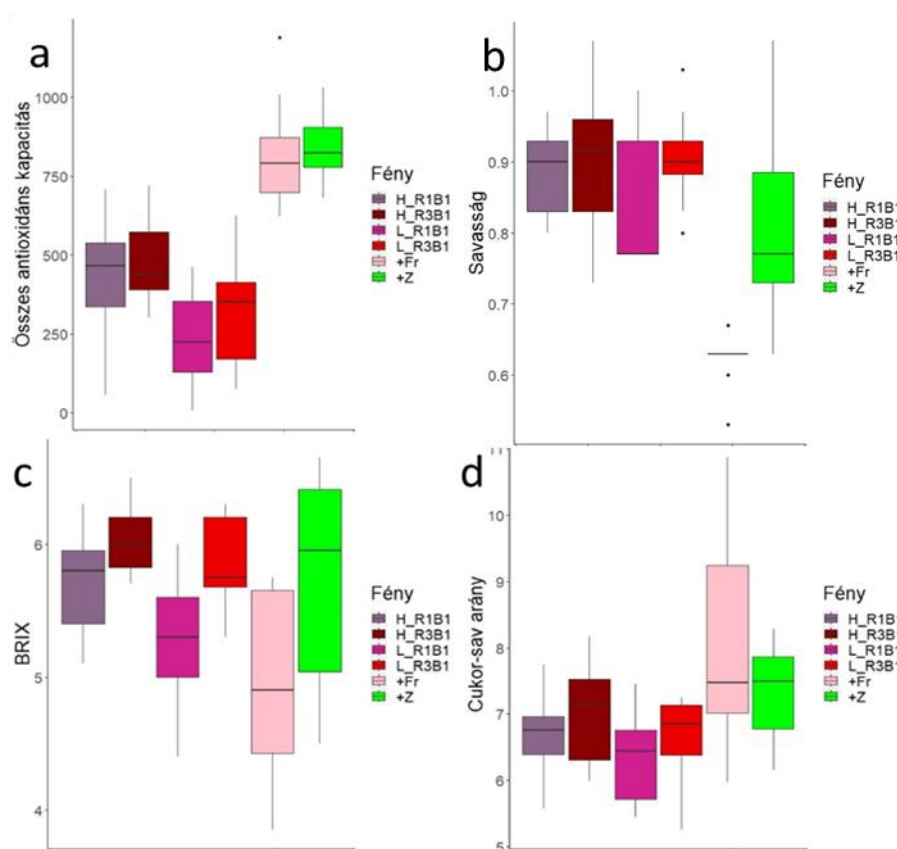
Az összes antioxidáns kapacitást leginkább a fény intenzitása befolyásolta (16. a) ábra). Az első kísérlet értékei a legmagasabbak, akkor a besugárzás $280 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ volt, ezután a második kísérlet magas intenzitású fénybeállításai következtek ($240 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$), a leggyengébb terméseket e tekintetben az alacsony fényintenzitáson kezelt növényekről szedtünk ($200 \mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$). A spektrumok eltérő aránya nem eredményezett szignifikáns különbségeket az antioxidánsok termelődésében.

A termékek savasságát tekintve a második kísérlet fénykezelései között nem volt szignifikáns eltérés (16. b) ábra), viszont savasabbak voltak, mint az első kísérlet +Fr fénykezelése, és az R3B1 alacsony és magas intenzitáson is savasabb volt a +Z fénykezelésnél is.

A °BRIX fokot leginkább a vörös-kék arány befolyásolta a második kísérletben (16. c) ábra), a 3:1 arány magasabb °BRIX fokot eredményezett, mint az 1:1. A 3:1 vörös: kék arányú kezelések magasabb fotoszintézise magasabb szénhidrát tartalmat eredményez (Ke et al., 2022; Utasi et al., 2023; Vitale et al., 2022; Zheng et al., 2023), és ez növeli a termékek °BRIX fokát. Leggyengébben az L_R1B1 fénykezelés teljesített, ez ugyanolyan eredményeket hozott, mint az első kísérlet +Fr fénykezelése, míg a többi a +Z fénykezelés eredményeivel volt hasonló.

A cukor-sav arányban nem volt különbség a második kísérlet fénykezelései között (16. d) ábra), és a H_R3B1 fénykezelésen kívül mindegyik alacsonyabb volt az első kísérlet fénykezeléseinél. Ez a második kísérlet magasabb savtartalmának köszönhető.

Összességében a beltartalmat tekintve a legjobban teljesítő kezelés a H_R3B1 volt, mivel ennél a kezelésnél magas volt a °BRIX fok és az antioxidáns tartalom is, és ezek voltak a legjobb ízű termékek a második kísérletben. A leggyengébben teljesítő fénykezelés, ahogy a fotoszintetikus tulajdonságoknál, itt is az L_R1B1, mivel alacsony volt a °BRIX foka és az antioxidáns kapacitása, illetve a cukor-sav aránya is.



16. ábra: A paradicsomtermékek összes antioxidáns kapacitása (a), savassága (b), °Brix fok (c) és cukor-sav aránya (d) a második mérés alkalmával.

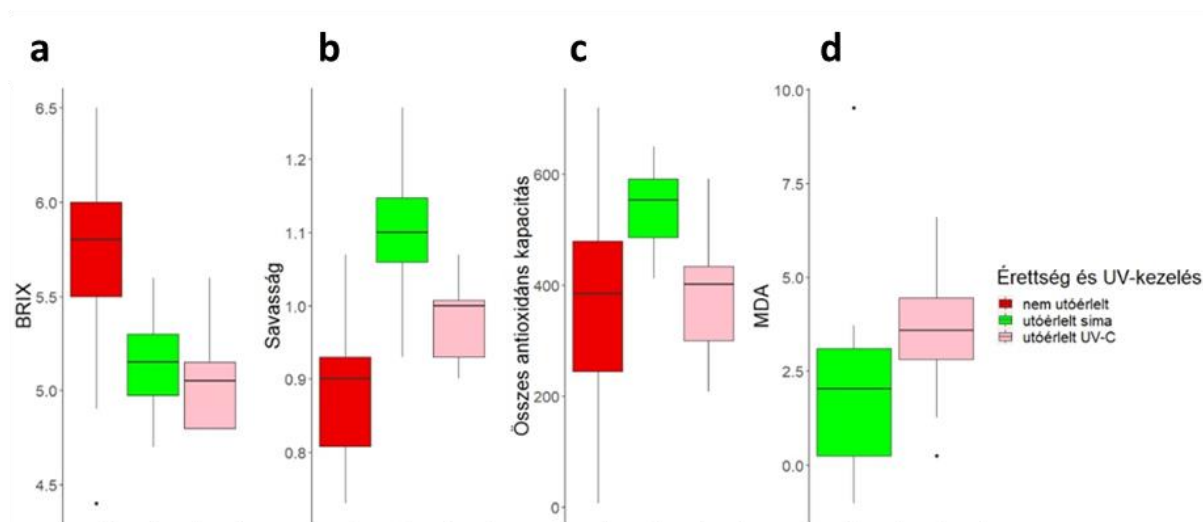
(Forrás: Saját ábra)

4.4.4 Az UV-C megvilágítás hatása az utóérlelésre

Az utóérlelés csökkentette a BRIX fokot ($p < 0,001$), de az UV-C kezelés nem befolyásolta (17. a) ábra). Az utóérlelés növelte a savasságot, a legsavasabbak az UV-C fénnel nem kezelt minták voltak, melyek egy hét alatt értek meg, így azok voltak a legkevésbé ízletes termékek, a legízletesebbek pedig az éretten szedett termékek voltak (17. b) ábra). A legmagasabb antioxidáns kapacitást az utóérlelt, UV-C-vel nem kezelt termékeknél mértük, de az UV-C

fénnyel kezelt utóérlelt termékekben sem volt kevesebb antioxidáns kapacitás, mint a frissekben (17. c) ábra). Ez ellentmond (C.-H. Liu et al., 2012) kutatásával, ahol emelkedett az antioxidáns tartalom az UV-C besugárzáskor. Az MDA tartalmat az UV-C kezelés megnövelte az utóérlelt termékekben az UV-C-vel nem kezeltékhez képest (17. d) ábra). UV-C hatására reaktív oxigéngyökök képződnek a termékekben, majd például MDA (Urban et al., 2016), ezek ellen való védekezéséppen antioxidánsok termelődnek (Rivera-Pastrana et al., 2014).

Összességében az utóérlelt paradicsomoknál a termékek ízét javította az UV-C kezelés, de messze elmaradt a frissen szedett paradicsomok cukor-sav arányától. Az utóérlelt termékek egészségességét viszont csökkentette az UV-C kezelés a kezeltlen mintákhoz képest azáltal, hogy csökkentette az antioxidáns kapacitást és növelte az MDA tartalmat. A tárolás idejét az UV-C fénykezelés egy héttel meghosszabbította, mivel ezek később pirosodtak be, mint a kezeltlen termékek. Az UV-C fénykezelésű bogyóknak csak egy része pirosodott be, a többi kifehéredett, amelynek oka az lehet, hogy azok még nem voltak érett zöld stádiumú termékek, vagy túl hosszú volt a besugárzási idő, így túl nagy dózisú UV-C világítást kaptak.



17. ábra: Az utóérlelt UV-C fénnel kezelt és kezeltlen (sima) termékek °BRIX tartalma (a), savassága (b), összes antioxidáns kapacitása (c), és MDA tartalma (d) összehasonlítva a frissen szedett (nem utóérlelt) termékekkel. Az UV-C kezelés nélküli utóérlelt 1 hetet, az UV-C kezelés utáni utóérés 2 hetet vett igénybe. (Forrás: Saját ábra)

5 Következtetések és javaslatok

Az első kutatásban beállított két fénykezelésnek (kék-zöld-vörös: +Z és kék-vörös-távoli vörös: +FR) számos pozitív hatását figyeltük meg. Az összesített eredmények azt mutatják, hogy a +Z kezelés alatt termesztett balkonparadicsom fotoszintetikus apparátusa hatékonyabban használja a fényt, mint a +FR kezelés mellett nevelt növényeké. A +Z fotoszintetikus teljesítményének javulása bizonyítja a spektrum zöld részének fontos szerepét. Ezenkívül a +Z több fotoszintetikusan aktív pigmentet, kompaktabb méretet és nagyobb fotokémiai hatékonyságot indukált, mint a +FR, ahol többek között az antociános elszíneződésű levelek arra utaltak, hogy ez a fénykezelés stresszreakciókat váltott ki a növényből. Ennek ellenére azonban a +FR fényrendszer alatti növényekről több és nagyobb bogyókat szüreteltünk már egy héttel a +Z terméseinek érése előtt. A termések beltartalmát tekintve elmondható, hogy a fénykezeléseken kívül a szedési idő és a termések tárolása is pozitívan befolyásolta az eredményeket, azaz magasabb cukor- és antioxidáns-tartalom mutatkozott mind a későbbi szedésű, mind a tárolt termések esetében. Az összes antioxidáns kapacitást tekintve nem volt különbség a két fénykezelés között, a °BRIX fokot és a titrálható savasságot viszont a +FR csökkentette, ami viszont a szubjektív jó íz (adott cukor-sav arány) tulajdonságot összességében így nem befolyásolta. A betakarított piros bogyójú termések kezelése UV-C megvilágítással nem eredményezett szignifikáns eltéréseket a paradicsom vizsgált beltartalmi paramétereiben.

A kutatás ismételtesében együtt alkalmaztuk a vörös és kék mellett a távoli vöröset és a zöldet is, látva mindkét fény előnyeit. A fényreceptben a vörös-kék arányban és a fény intenzitásában állítottunk be különbséget. A négy fénykezelés a magas (H) és alacsony (L) fényintenzitáson az 1:1 és 3:1 vörös-kék arányú fényrecept volt zöld és távoli vörös fénykiegészítéssel (H_R1B1, H_R3B1, L_R1B1, L_R3B1). Az eredmények azt mutatták, hogy a vörös arányának növekedése a kékkel szemben egyenletesebb fotoszintézist eredményezett, ami magasabb volt, mint az 1:1 vörös-kék arány mellett. Ezen felül a 3:1 arányú kezeléseknél magasabb lett a termések °BRIX értéke, jobb lett a cukor-sav arány, és a termések összömege is magasabb volt, mint az 1:1 arányú kezelések terméseinél. A különböző fényintenzitás is befolyásolta a beltartalmat és a termésmennyiséget: magasabb fényintenzitáson magasabb antioxidáns tartalommal rendelkeztek a bogyók, több termést szüreteltünk le ezen kezelések mellett, és a termések összömege is itt volt a magasabb. A legeredményesebb fénykezelés a H_R3B1 volt annak ellenére, hogy fluoreszcencia eredményei nem különböztek a többi mérésétől, a fotoszintézise stabil volt a mérések között, és magas értékeket mutatott. A

terméseinek magas volt az antioxidáns tartalma és a °BRIX foka, magas volt a termésmennyiség és az össztömeg. A leggyengébben teljesítő fénykezelés az L_R1B1 volt. Míg fluoreszcencia eredményei nem utaltak stresszre (kivéve az NPQ-t), fotoszintézise a második mérésre nagyot csökkent és a leggyengébb mértéket mutatta. A legnagyobb termés átlagtömeg ellenére ez a kezelés produkálta a legalacsonyabb termésmennyiséget és össztömeget alacsony antioxidáns tartalmú és °BRIX fokú bogyókkal.

A zölden szedett és utóérlelt paradicsomok beltartalmi mutatói (savasság, °BRIX) gyengébbek voltak, mint a friss, piros termékekéi, és az UV-C fénykezelés sem javította ezeket az értékeket sőt, magasabb káros anyag tartalma (MDA) és alacsonyabb antioxidáns tartalma miatt egészségesebbek lettek az UV-C fénnel nem kezelt utóérlelt termékek, amelyek hátránya azonban, hogy egy héttel hamarabb beértek, mint a kezelt bogyók, tehát az eltarthatóság szempontjából a kezelés hatásos lett volna.

A távoli vörös és zöld fény hatásairól szóló eredményeink megegyeznek számos kutatás eredményével, ahogyan a vörös-kék aránnyal és a fényintenzitással kapcsolatosan kapott eredményeink is. Az UV-C hatásaival kapcsolatban viszont a legtöbb kutatástól eltérő eredményeket kaptunk.

Vizsgálataink elsődleges célja az volt, hogy a fény különböző paramétereinek hatásáról a növények fiziológiai teljesítményére, morfológiájára és fotoszintetikus teljesítményére továbbá a termésmennyiség és a tápérték növelésére komplex képet kapjunk. Ahhoz, hogy ezen eredmények pótmegvilágítású üvegházi termesztésben gyakorlatban is jól hasznosuljanak, fontos kiterjeszteni a kutatást üvegházi kísérletekre és más, folytonnövő paradicsom fajtákra is.

További kutatásokat igényel a megfelelő fényrecept összeállításához a fényintenzitás vizsgálata, a spektrumok eloszlásának és egymáshoz viszonyított arányának vizsgálata és a fotoperiódus hosszának a vizsgálata. Ezen paraméterek egymásra való hatását is fontos komplexen elemezni, hogy gazdaságilag a leghatékonyabb fénykezelést tudjuk biztosítani a növények számára kiegészítő világítású üvegházak paradicsomtermesztésénél.

6 Összefoglalás

Az egészséges friss élelmiszerek iránti kereslet az elmúlt évtizedekben gyors ütemben nő. A paradicsom a világon a legnépszerűbb zöldségek közé tartozik, és rengeteg a benne lévő különféle antioxidáns vegyület. A szabadföldi növénykultúrákat egyre inkább fenyegetik a biotikus és abiotikus stresszek és az éghajlatváltozás. A kontrollált növénytermesztésben a korszerű üvegházak és a beltéri növénytermesztés vertikális farmjai hatékonyan oldják meg ezeket a problémákat a tápanyagösszetétel, a páratartalom, a hőmérséklet és a fény kontrolljával és a külső tényezőkkel való kölcsönhatások minimalizálásával. A mesterséges megvilágításban a LED-ek nagy lehetőséget rejtenek magukban többek között hullámhossz specifikusságuk miatt, mivel alkalmazásukkal meghatározott növényi tulajdonságok érhetők el, ami javíthatja az élelmiszer minőségét.

Kutatásom célja az volt, hogy felmérje, hogyan szabályozhatják a különböző összetételű fényspektrumok és fényintenzitások a fotoszintetikus aktivitást, a növekedést, a termésmennyiséget és a termékek bioaktív vegyületeinek szintézisét a *Solanum lycopersicum* 'Vilma' esetében. Emellett vizsgáltam, hogy a betakarítás utáni UV-C kezelés hogyan hat a termékek tárolhatóságára.

A beállított fénykezelések az első kísérlet során a kék-zöld-vörös 3:1:3 aránnyal (+Z) és kék-vörös-távoli vörös 3:3:1 aránnyal (+Fr) 280 $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ fotonfluxus sűrűséggel voltak jellemezhetők. A második kísérletben 200 (L) és 240 (H) $\mu\text{mol}/\text{m}^2\text{s}$ fényintenzitás alatt 3:1:3:1 (R1B1) és 3:2:9:2 (R3B1) kék-zöld-vörös-távoli vörös arányt állítottunk be, így a négy fénykezelés H_R1B1, H_R3B1, L_R1B1, L_R3B1 volt.

Vizsgálataink egyrészt a növények élettani paramétereinek (nettó fotoszintézis, párologtatás, reflektancia, fluoreszcencia, fotoszintetikus pigmentek mennyisége, növekedés, friss és száraz tömeg), másrészt a betakarított termékek mennyiségének (bogyók mennyisége és tömege) és beltartalmi mutatóinak (összes antioxidáns kapacitás, °Brix fok, malondialdehid tartalom, titrálható savasság) megismerésére terjedtek ki. További beltartalmi vizsgálatokhoz a termékek felét UV-C megvilágítással kezeltük.

Az első kísérlet eredményei azt mutatják, hogy a +Z fotoszintetikus apparátusa hatékonyabban használja a fényt, több fotoszintetikusan aktív pigmentet, kompaktabb méretet és nagyobb fotokémiai hatékonyságot indukált, mint a +FR, ahol az antociános elszíneződésű levelek stressz megjelenésére utaltak. A +FR termésmennyisége nagyobb volt, és korábban ért, mint +Z. A °BRIX fokot és a titrálható savasságot a +FR csökkentette a +Z kezeléshez képest.

A második kísérletben a magasabb vörös-kék arány egyenletesebb és magasabb fotoszintézist, magasabb °BRIX éréket, jobb cukor-sav arányt, magasabb termésmennyiséget eredményezett. Magasabb fényintenzitáson magasabb antioxidáns tartalmat, több termést, nagyobb összömeget értünk el. A vártnak megfelelően a legeredményesebb fénykezelés a H_R3B1 volt, a leggyengébben teljesítő fénykezelés pedig az L_R1B1.

Összefoglalva, a jelen tanulmány bemutatja, hogy bizonyos hullámhosszú és intenzitású kiegészítő LED-lámpák jól alkalmazhatók a termésmennyiség és a tápérték növelésére, továbbá megváltoztatják a növények növekedését, morfológiáját és fotoszintetikus teljesítményét. Értékes információkat kaptunk olyan fényreceptek kidolgozásához, melyek javíthatják a paradicsomnövények fotoszintetikus teljesítőképességét, növekedését és fejlődését és így a termések tápértékének minőségét is, mindezt ellenőrzött körülmények között, elősegítve az emberi táplálkozás számára előnyös antioxidánsok szintézisét.

Ezen kísérleti beállítás csak kis területét érinti „A LED világítás a növénytermesztésben” témakörnek, számos kutatást kell még elvégezni ahhoz, hogy a lehető legoptimálisabban működjön a mesterséges megvilágítás az üvegházakban.

7 Köszönetnyilvánítás

Ezúton is szeretnék köszönetet nyilvánítani konzulensemnek, Dr. Fóti Szilviának, aki segítségével és tanácsaival nagyban hozzájárult a kutatás sikeres elkészüléséhez. Továbbá 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. Köszönöm a rengeteg segítséget a kutatás folyamán Harsányi Ádám szaktársamnak. Köszönettel tartozom a Növényélettani és Növényökológia tanszék vezetőjének, hogy a mérésekhez használt műszereket, illetve vegyszereket a rendelkezésemre bocsátotta, ezzel segítve munkámat.

A kulturális és innovációs minisztérium ÚNKP-23-1 kódszámú új nemzeti kiválóság programjának a nemzeti kutatási, fejlesztési és innovációs alapból finanszírozott szakmai támogatásával készült.

8 Irodalomjegyzék

- Aarouf, J. – Urban, L. (2020): Flashes of UV-C light: An innovative method for stimulating plant defences. *Plos One*, 15(7 July), 11p. DOI: 10.1371/journal.pone.0235918
- Allaga, J. – Bódis, J. (szerk.) (2014): *Növénytan-Növényélettan jegyzet*. Kaposvár [K. n.]
- 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* (Vol. 239), 70-76. DOI: 10.1006/abio.1996.0292
- Boros, I. F. (2021): *Saláta (Lactuca sativa L.) fajták produkcióbíológiai jellemzése és komplex értékelése LED-es megvilágítási programok tesztelésével*. [PhD-értekezés] Budapest: Kertészettudományi Doktori Iskola. Letöltés dátuma: 2024. 01. 15. forrás: https://archive.uni-mate.hu/sites/default/files/boros_ildiko_fruzsina-ertekezes.pdf
- Bravo, S. – García-Alonso, J. – Martín-Pozuelo, G. – Gómez, V. – García-Valverde, V. – Navarro-González, I. – Periago, M. J. (2013): Effects of postharvest UV-C treatment on carotenoids and phenolic compounds of vine-ripe tomatoes. *International Journal of Food Science & Technology*, 48(8), 1744–1749. DOI: 10.1111/ijfs.12146
- Brazaitytė, A. – Duchovskis, P. – Urbonavičiūtė, A. – Samuolienė, G. – Jankauskienė, J. – Sakalauskaitė, J. – Šabajevienė, G. – Sirtautas, R. – Novičkovas, A. (2010): The effect of light-emitting diodes lighting on the growth of tomato transplants. *Zemdirbyste-Agriculture*, 97(2), 89-98. Letöltés dátuma: 2024. 01. 12. UDK 635.64.531.031.027.34
- Buchanan, B. B. – Gruissem, W. – Jones, R. M. (szerk.) (2015): *Biochemistry & molecular biology of plants*. Chichester: John Wiley and Sons kiadó
- Castagna, A. – Chiavaro, E. – Dall’Asta, C. – Rinaldi, M. – Galaverna, G. – Ranieri, A. (2013): Effect of postharvest UV-B irradiation on nutraceutical quality and physical properties of tomato fruits. *Food Chemistry*, 137(1–4), 151–158. DOI: 10.1016/j.foodchem.2012.09.095
- Charles, M. T. – Benhamou, N. – Arul, J. (2008): Physiological basis of UV-C induced resistance to *Botrytis cinerea* in tomato fruit. III. Ultrastructural modifications and their impact on fungal colonization. *Postharvest Biology and Technology*, 47(1), 27–40. DOI: 10.1016/j.postharvbio.2007.05.015
- Deram, P. – Lefsrud, M. G. – Orsat, V. (2014): Supplemental Lighting Orientation and Red-to-blue Ratio of Light-emitting Diodes for Greenhouse Tomato Production. *HortScience* (Vol. 49, Issue 4), 448-452. DOI: 10.21273/HORTSCI.49.4.448

- Eissa Piri. (2011): Effects of UV irradiation on plants. *African Journal of Microbiology Research*, 5(14), 1710-1716. DOI: 10.5897/ajmr11.263
- Fehér, A. S. (szerk.) (2019): *A növények élete Egyetemi jegyzet*. Szeged [K. n.]
- Helyes, L. (2007): *A paradicsom (Lycopersicon lycopersicum (L.) Karsten) termésképzésére ható abiotikus és biotikus tényezők értékelése különös tekintettel a beltartalmi összetevőkre*. [MTA értekezés] Gödöllő. Letöltés dátuma: 2024. 01. 11. forrás: <https://real-d.mtak.hu/118/1/Helyes.pdf>
- Janisiewicz, W. J. – Takeda, F. – Nichols, B. – Glenn, D. M. – Jurick, W. M. – Camp, M. J. (2016): Use of low-dose UV-C irradiation to control powdery mildew caused by *Podosphaera aphanis* on strawberry plants. *Canadian Journal of Plant Pathology*, 38(4), 430–439. DOI: 10.1080/07060661.2016.1263807
- Ji, Y. – Ouzounis, T. – Courbier, S. – Kaiser, E. – Nguyen, P. T. – Schouten, H. J. – Visser, R. G. F. – Pierik, R. – Marcelis, L. F. M. – Heuvelink, E. (2019): Far-red radiation increases dry mass partitioning to fruits but reduces *Botrytis cinerea* resistance in tomato. *Environmental and Experimental Botany*, 168, 9p. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2019.103889
- Kaiser, E. – Weerheim, K. – Schipper, R. – Dieleman, J. A. (2019): Partial replacement of red and blue by green light increases biomass and yield in tomato. *Scientia Horticulturae*, 249, 271–279. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.02.005
- Kalaitzoglou, P. – Taylor, C. – Calders, K. – Hogervorst, M. – van Ieperen, W. – Harbinson, J. – de Visser, P. – Nicole, C. C. S. – Marcelis, L. F. M. (2021): Unraveling the effects of blue light in an artificial solar background light on growth of tomato plants. *Environmental and Experimental Botany*, 184, 10p. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2021.104377
- Kalaitzoglou, P. – van Ieperen, W. – Harbinson, J. – van der Meer, M. – Martinakos, S. – Weerheim, K. – Nicole, C. C. S. – Marcelis, L. F. M. (2019): Effects of continuous or end-of-day far-red light on tomato plant growth, morphology, light absorption, and fruit production. *Frontiers in Plant Science*, 10, 11p. DOI: 10.3389/fpls.2019.00322
- Ke, X. – Yoshida, H. – Hikosaka, S. – Goto, E. (2022): Optimization of photosynthetic photon flux density and light quality for increasing radiation-use efficiency in dwarf tomato under led light at the vegetative growth stage. *Plants*, 11(1), 18p. DOI: 10.3390/plants11010121
- Khoshimkhujaev, B. – Kwon, J. K. – Park, K. S. – Choi, H. G. – Lee, S. Y. (2014): Effect of monochromatic UV-A LED irradiation on the growth of tomato seedlings. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 55(4), 287–292. DOI: 10.1007/s13580-014-0021-x

- Kim, H. J. – Yang, T. – Choi, S. – Wang, Y. J. – Lin, M. Y. – Liceaga, A. M. (2020): Supplemental intracanopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 261, 9p. DOI: 10.1016/j.scienta.2019.108985
- Kobayashi, T. – Tabuchi, T. (2022): Tomato Cultivation in a Plant Factory with Artificial Light: Effect of UV-A Irradiation During the Growing Period on Yield and Quality of Ripening Fruit. *Horticulture Journal*, 91(1), 16–23. DOI: 10.2503/hortj.UTD-272
- Kocsis, M. (2024): Paradicsomhajtatási helyzetkép. *Kertészet És Szőlészet*, 73(1), 6–7.
- Lanoue, J. – Zheng, J. – Little, C. – Thibodeau, A. – Grodzinski, B. – Hao, X. (2019): Alternating Red and Blue Light-Emitting Diodes Allows for Injury-Free Tomato Production With Continuous Lighting. *Frontiers in Plant Science*, 10, 14p. DOI: 10.3389/fpls.2019.01114
- Lee, M. – Rivard, C. – Pliakoni, E. – Wang, W. – Rajashekar, C. B. (2021): Supplemental UV-A and UV-B Affect the Nutritional Quality of Lettuce and Tomato: Health-Promoting Phytochemicals and Essential Nutrients. *American Journal of Plant Sciences*, 12(01), 104–126. DOI: 10.4236/ajps.2021.121007
- Li, Y. – Liu, C. – Shi, Q. – Yang, F. – Wei, M. (2021): Mixed red and blue light promotes ripening and improves quality of tomato fruit by influencing melatonin content. *Environmental and Experimental Botany*, 185, 10p. DOI: 10.1016/j.envexpbot.2021.104407
- Lichtenthaler, H. K. – Buschmann, C. (2001): Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy. *Current Protocols in Food Analytical Chemistry*, 1, DOI: 10.1002/0471142913.faf0403s01
- Lichtenthaler, H. K. – Langsdorf, G. – Lenk, S. – Buschmann, C. (2005): Chlorophyll fluorescence imaging of photosynthetic activity with the flash-lamp fluorescence imaging system. *Photosynthetica*, 43(3), 335-369. Letöltés dátuma: 2024. 01. 09. forrás: <https://ps.ueb.cas.cz/pdfs/phs/2005/03/07.pdf>
- Liu, C.-H. – Cai, L.-Y. – Lu, X.-Y. – Han, X.-X. – Tie-Jin, Y. (2012): Effect of Postharvest UV-C Irradiation on Phenolic Compound Content and Antioxidant Activity of Tomato Fruit During Storage. *Journal of Integrative Agriculture* (Vol. 2012, Issue 1), 159-165. DOI: 10.1016/S1671-2927(12)60794-9
- Liu, X. – Guo, S. – Chang, T. – Xu, Z. – Takafumi, T. (2012): Regulation of the growth and photosynthesis of cherry tomato seedlings by different light irradiations of light emitting

- diodes (LED). *African Journal of Biotechnology*. 11(22), 6169-6177. DOI: 10.5897/AJB11.1191
- Massa, G. D. – Kim, H.-H. – Wheeler, R. M. – Mitchell, C. A. (2008): Plant Productivity in Response to LED Lighting. *HortScience*44(7), 1951-1956. DOI: 10.21273/HORTSCI.43.7.1951
- Naznin, M. T. – Lefsrud, M. – Azad, M. O. K. – Park, C. H. (2019): Effect of different combinations of red and blue led light on growth characteristics and pigment content of in vitro tomato plantlets. *Agriculture (Switzerland)*, 9(9), 9p. DOI: 10.3390/agriculture9090196
- Ngcobo, B. L. – Bertling, I. – Clulow, A. D. (2022): Artificial daylength enhancement (pre-sunrise and post-sunset) with blue and red led lights affects tomato plant development, yield, and fruit nutritional quality. *Horticulture Environment and Biotechnology*, 63(6), 847–856. DOI: 10.1007/s13580-022-00447-1
- Pék, Z. – Csorbainé Gógán, A. – Dimény, J. – Helyes, L. – Ombódi, A. (szerk.) (2007): *Zöldségtermesztés*. Gödöllő [K. n.]
- Rivera-Pastrana, D. M. – Gardea, A. A. – Yahia, E. M. – Martínez-Téllez, M. A. – González-Aguilar, G. A. (2014): Effect of UV-C irradiation and low temperature storage on bioactive compounds, antioxidant enzymes and radical scavenging activity of papaya fruit. *Journal of Food Science and Technology*, 51(12), 3821–3829. DOI: 10.1007/s13197-013-0942-x
- Schwarz, D. – Thompson, A. J. – Kläring, H. P. (2014): Guidelines to use tomato in experiments with a controlled environment. *Frontiers in Plant Science*, 5(nov), 16p. DOI: 10.3389/fpls.2014.00625
- Short, B. D. – Janisiewicz, W. – Takeda, F. – Leskey, T. C. (2018): UV-C irradiation as a management tool for *Tetranychus urticae* on strawberries. *Pest Management Science*, 74(11), 2419–2423. DOI: 10.1002/ps.5045
- Taiz, L. – Zeiger, E. – Max Moller, I. – Murphy, A. (szerk.) (2015): *Plant Physiology and Development*. Sunderland, Massachusetts: Sinauer Associates kiadó
- Terashima, I. – Fujita, T. – Inoue, T. – Chow, W. S. – Oguchi, R. (2009): Green light drives leaf photosynthesis more efficiently than red light in strong white light: Revisiting the enigmatic question of why leaves are green. *Plant and Cell Physiology*, 50(4), 684–697. DOI: 10.1093/pcp/pcp034
- Török, G. (2023): Növényvilágításra hangolva. *Kertészet És Szőlészet*, 72(48), 6–8.
- Trojak, M. – Skowron, E. – Sobala, T. – Kocurek, M. – Pałyga, J. (2022): Effects of partial replacement of red by green light in the growth spectrum on photomorphogenesis and

- photosynthesis in tomato plants. *Photosynthesis Research*, 151(3), 295–312. DOI: 10.1007/s11120-021-00879-3
- Tuba, Z. – Csintalan, Z. (szerk.) (2009): *Növényélettani egyetemi jegyzet agrármérnök és környezetgazdálkodási agrármérnök hallgatók részére*. Gödöllő [K. n.]
- Urban, L. – Charles, F. – de Miranda, M. R. A. – Aarrouf, J. (2016): Understanding the physiological effects of UV-C light and exploiting its agronomic potential before and after harvest. *Plant Physiology and Biochemistry* 105, 1–11p. DOI: 10.1016/j.plaphy.2016.04.004
- Utasi, L. – Kovács, V. – Gulyás, Z. – Marcek, T. – Janda, T. – Darko, E. (2023): Threshold or not: Spectral composition and light-intensity dependence of growth and metabolism in tomato seedlings. *Scientia Horticulturae*, 313, 15p. DOI: 10.1016/j.scienta.2023.111946
- Vitale, E. – Velikova, V. – Tsonev, T. – Costanzo, G. – Paradiso, R. – Arena, C. (2022): Manipulation of light quality is an effective tool to regulate photosynthetic capacity and fruit antioxidant properties of *Solanum lycopersicum* L. cv. ‘Microtom’ in a controlled environment. *PeerJ*, 10, 23p. DOI: 10.7717/peerj.13677
- Wang, S. – Meng, X. – Tang, Z. – Wu, Y. – Xiao, X. – Zhang, G. – Hu, L. – Liu, Z. – Lyu, J. – Yu, J. (2022): Red and Blue LED Light Supplementation in the Morning Pre-activates the Photosynthetic System of Tomato (*Solanum lycopersicum* L.) Leaves and Promotes Plant Growth. *Agronomy*, 12(4), 13p. DOI: 10.3390/agronomy12040897
- Xu, H. L. – Xu, Q. – Li, F. – Feng, Y. – Qin, F. – Fang, W. (2012): Applications of xerophytophysiology in plant production-LED blue light as a stimulus improved the tomato crop. *Scientia Horticulturae*, 148, 190–196. DOI: 10.1016/j.scienta.2012.06.044
- Zhang, Y. ting – Zhang, Y. qi – Yang, Q. chang – Li, T. (2019): Overhead supplemental far-red light stimulates tomato growth under intra-canopy lighting with LEDs. *Journal of Integrative Agriculture*, 18(1), 62–69. DOI: 10.1016/S2095-3119(18)62130-6
- Zhen, S. – Bugbee, B. (2020): Far-red photons have equivalent efficiency to traditional photosynthetic photons: Implications for redefining photosynthetically active radiation. *Plant Cell and Environment*, 43(5), 1259–1272. DOI: 10.1111/pce.13730
- Zheng, Y. – Zou, J. – Lin, S. – Jin, C. – Shi, M. – Yang, B. – Yang, Y. – Jin, D. – Li, R. – Li, Y. – Wen, X. – Yang, S. – Ding, X. (2023): Effects of different light intensity on the growth of tomato seedlings in a plant factory. *Plos One*, 18(11), 13p. DOI: 10.1371/journal.pone.0294876

Internetes források

http1.: KSH.HU *A fontosabb zöldségfélék termesztése és felhasználása*. Letöltés dátuma: 2024.

04. 20. forrás: https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0024.html

http2.: INDEXDATABASE.DE Letöltés dátuma: 2024. 04. 20. forrás:

<https://www.indexdatabase.de/>

9 Ábrák és táblázatok jegyzéke

9.1 Táblázatok

1. táblázat: A törzsoldat receptje.....	21
2. táblázat: A második kísérlet fénykezelései.	32
3. táblázat: A transzspiráció, a fotoszintézis, az Fv/Fm, az NPQ, a Φ PSII, a SPAD, az MTCI és az ARII index értékek átlagai és szórása fénykezelésenként és mérési alkalmanként.....	39
4. táblázat: A nettó fotoszintézis értékek átlagai és szórása fénykezelésenként és mérési alkalmanként a második mérési sorozatban.	46
5. táblázat: Az Fv/Fm, az NPQ, a Φ PSII, a SPAD, az MTCI és az ARII index értékek átlagai és szórása fénykezelésenként és mérési alkalmanként a második mérési sorozatban.	46

9.2 Ábrák

1. ábra: A növények elhelyezkedése a különböző kezeléseknél. Az ábrán a barna négyzetek a cserepeket jelölik, a zöld körök pedig a paradicsom növényeket (2 db/cserép). Az első polcrendszeren a növények közelebb helyezkedtek el a fényttestekhez (magas fényintenzitás), a második polcrendszeren pedig távolabb (alacsony intenzitás). Mindkét polcrendszeren a falhoz közeli oldal (az ábrán a felső sor) felett világított az R3B1 LED, elöl (alsó sor) pedig az R1B1 LED	33
2. ábra: A növény növekedése fénykezelésenként, hetente. A színátmenetek a fitomerek számát és méretét mutatják. A színátmenet nélküli oszlopok alján az eltérő színek a növények felkopaszodott szárméretét jelzik	34
3. ábra: A termések száma (a) és átlagos tömege (b) fénykezelésenként és szedési alkalmanként ábrázolva az éretlen termésekkel együtt.....	35
4. ábra: A paradicsomnövények nettó fotoszintézise ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (a) és párologtatása ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (b) fénykezelésenként és mérési alkalmanként.....	36
5. ábra: A klorofilltartalom alakulása az MTCI vegetációs index (a) , a SPAD mérés (b) , és a leveleken mért pigmenttartalom (c) alapján, valamint a klorofill-a és klorofill-b aránya (d) fénykezelésenként és mérési időpontonként a leveleken mért pigmenttartalom alapján	37
6. ábra: A Φ PSII (a) , az NPQ (b) és az Fv/Fm (c) fluoreszcenciamérés eredményei fénykezelésenként és mérési időpontonként	38

7. ábra: Az antociántartalom alakulása az ARII vegetációs index szerint fénykezelésenként és mérési időpontonként.	39
8. ábra: A termések összes antioxidáns kapacitásának eredményei aszkorbinsav ekvivalensben kifejezve fénykezelésenként (a), tárolási (b) és szedési időpontonként (c).	40
9. ábra: A termések átlagos °BRIX tartalma fénykezelésenként (z tengely), szedési időpontonként, azon belül tárolás hosszaként (x tengely).	42
10. ábra: A termések titrálható savassága (a) és cukor/sav aránya (b) fénykezelésenként.	42
11. ábra: A termések össztömege (a) és a termések mennyisége (b) fénykezelésenként és szedési alkalmanként ábrázolva az éretlen termésekkel együtt.	44
12. ábra: A termések átlagtömege fénykezelésenként és szedési alkalmanként ábrázolva az éretlen termésekkel és az első kísérlettel együtt.	44
13. ábra: A nettó fotoszintézis (a) és transzspiráció (b) alakulása a második kísérletben.	45
14. ábra: Az Fv/Fm (a), az NPQ (b) és a ΦPSII (c) fluoreszcenciamérés eredményei fénykezelésenként és mérési időpontonként a második kísérletben.	47
15. ábra: A klorofilltartalom alakulása az MTCI vegetációs index (a) és a SPAD mérés (b) alapján, valamint az antociántartalom alakulása az ARII vegetációs index (c) szerint fénykezelésenként és mérési időpontonként a második kísérletben.	49
16. ábra: A paradicsomtermések összes antioxidáns kapacitása (a), savassága (b), °Brix fok (c) és cukor-sav aránya (d) a második mérés alkalmával.	50
17. ábra: Az utóérlelt UV-C fénnel kezelt és kezeletlen (sima) termések °BRIX tartalma (a), savassága (b), összes antioxidáns kapacitása (c), és MDA tartalma (d) összehasonlítva a frissen szedett (nem utóérlelt) termésekkel. Az UV-C kezelés nélküli utóérlelt 1 hetet, az UV-C kezelés utáni utóérés 2 hetet vett igénybe.	51

NYILATKOZAT

a szakdolgozat nyilvános hozzáféréséről és eredetiségéről

A hallgató neve: VENCZEL LILLA
A Hallgató Neptun kódja: GTE826
A dolgozat címe: KÜTÖNBRÖZŐ SPEKTRÁLIS ÖSSZETÉTELŰ LED-VILÁGÍTÁS HATÁSAI A PARADICSOM
A megjelenés éve: 2024 (SOLANUM LYCOPERSICON) ÉLETTANI VÁLTOZÓIRA
A konzulens intézetének neve: NÖVÉNYTERMESZTÉSI - TUDOMÁNYOK INTÉZET
A konzulens tanszékének a neve: NÖVÉNYÉLETTAN ÉS NÖVÉNYÖKOLÓGIA TANSZÉK

Kijelentem, hogy az általam benyújtott szakdolgozat egyéni, eredeti jellegű, saját szellemi alkotásom. Azon részeket, melyeket más szerzők munkájából vettem át, egyértelműen megjelöltem, és az irodalomjegyzékben szerepeltettem.

Ha a fenti nyilatkozattal valótlan állítottam, tudomásul veszem, hogy a záróvizsga-bizottság a záróvizsgából kizár és a záróvizsgát csak új dolgozat készítése után tehetek.

A leadott dolgozat, mely PDF dokumentum, szerkesztését nem, megtekintését és nyomtatását engedélyezem.

Tudomásul veszem, hogy az általam készített dolgozatra, mint szellemi alkotás felhasználására, hasznosítására a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem mindenkor szellemi tulajdon-kezelési szabályzatában megfogalmazottak érvényesek.

Tudomásul veszem, hogy dolgozatom elektronikus változata feltöltésre kerül a Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumába. Tudomásul veszem, hogy a megvédett és

- nem titkosított dolgozat a védést követően
- titkosításra engedélyezett dolgozat a benyújtásától számított 5 év eltelte után

nyilvánosan elérhető és kereshető lesz az Egyetem MATER Hallgatói Dolgozatok repozitóriumában.

Kelt: 2024 év 10 hó 15 nap

Venczel Lilla

Hallgató aláírása

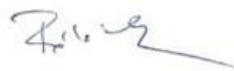
NYILATKOZAT

Venczel Lilla (hallgató Neptun azonosítója: GTE8ZG) konzulenseként nyilatkozom arról, hogy a szakdolgozatot áttekintettem, a hallgatót az irodalmi források korrekt kezelésének követelményeiről, jogi és etikai szabályairól tájékoztattam.

A szakdolgozatot a záróvizsgán történő védelemre javaslom / nem javaslom¹.

A dolgozat állam- vagy szolgálati titkot tartalmaz: igen nem^{*2}

Kelt: 2024. 10. 15.



belső konzulens

¹ A megfelelő aláhúzendó.

² A megfelelő aláhúzendó.