



INTÉZMÉNYI TUDOMÁNYOS DIÁKKÖRI KONFERENCIA

2024. május 24.

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

**Effects of LED lighting with different spectral composition on the
physiological variables of tomato (Solanum lycopersicum)**

Készítette: **Venczel Lilla**
GTE8ZG
Kertészmérnöki alapképzés
nappali tagozat
Szent István Campus

Témavezető: Fóti Szilvia, egyetemi docens, Növénytermesztési-
tudományok Intézet, Növényélettan és Növényökológia Tanszék

Lehetséges OTDK szekció: Agrártudományi szekció

**Gödöllő
2024.**

Tartalomjegyzék

1	Bevezetés és célkitűzések	1
2	Szakirodalmi áttekintés	3
2.1	A paradicsom hazai termesztésének és fogyasztásának jelentősége	3
2.2	Természetes fény és kiegészítő világítás.....	3
2.3	Fotoszintézis és fluoreszcencia	5
2.3.1	Kloroplasztisz	5
2.3.2	A fotoszintézis színanyagai.....	6
2.3.3	A fényenergia abszorpciója.....	6
2.3.4	Fluoreszcencia.....	7
2.4	Fotoreceptorok	7
2.4.1	Kriptokrómok.....	8
2.4.2	Fototropinok.....	8
2.4.3	Fitokrómok.....	9
2.5	Különböző fényhullámhosszok hatásai	10
2.5.1	Spektrumok hatása egyenként.....	10
2.5.2	A vörös és kék fény együttes hatása	11
2.5.3	Távoli vörös kiegészítés a fényreceptekben.....	12
2.5.4	Zöld fény hozzáadása a növénynevelő világításokhoz	13
2.5.5	A spektrumösszetétel szerepe a kertészetben.....	13
2.6	Az UV fénykezelés hatásai	14
2.6.1	Az UV-A kiegészítő világítás a termesztés alatt.....	14
2.6.2	Az UV-B sugárzás káros hatása.....	15
2.6.3	A betakarítás utáni UV-C besugárzás hatása a paradicsombogyókra.....	16
3	Alkalmazott módszerek	18
3.1	Kutatás körülményei	18
3.1.1	A fénykezelés	19
3.1.2	Betakarítás.....	19

3.1.3	UV-C világítás	20
3.2	Kísérlet felépítése	21
3.3	A teljes növényen alkalmazott mérések	21
3.3.1	Reflektancia mérések és vegetációs indexek	21
3.3.2	SPAD	22
3.3.3	Fluoreszcencia mérések	23
3.3.4	Fotoszintézis mérések	24
3.3.5	Pigmenttartalom meghatározás	24
3.3.6	Növény friss és száraz tömeg.....	24
3.3.7	Növénymagasság	25
3.4	Paradicsom bogyókra vonatkozó mérések	26
3.4.1	Bogyótömeg.....	26
3.4.2	Összes antioxidáns kapacitás	26
3.4.3	°Brix.....	26
3.4.4	Malondialdehid (MDA)-tartalom.....	27
3.4.5	Titrálható savasság.....	27
3.5	Statisztikai kiértékelés.....	27
4	Eredmények és értékelésük.....	28
4.1	A különböző fényreceptek hatása a morfológiai tulajdonságokra	28
4.1.1	Növénynövekedés	28
4.1.2	Termésmennyiség	29
4.2	A fényreceptek hatása a paradicsom fotoszintetikus tulajdonságaira	30
4.3	A fényreceptek hatása a paradicsom termések beltartalmára.....	34
5	Összefoglalás	38
6	Köszönetnyilvánítás.....	40
7	Irodalomjegyzék	41

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 frisspiaci paradicsomot (*Solanum lycopersicum*) korszerű üvegházakban termelik, ahol zömében biológiai növényvédelmet alkalmaznak, és környezeti tényezők helyes szabályozásával növelik a hozamot. Ezekben a létesítményekben télen ugyanúgy folyik a növénytermesztés, mint nyáron, 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 méginkább 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. Minden élőlény számára az energiaigényes folyamatokhoz szükséges energiát az 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, amelyek számos reakciót eredményeznek a fényre, mint jelre válaszolva. Így ezek a fotoreceptorok szabályozzák a fény felé mozgást, a növény növekedését, és közvetve az eredményesebb fotoszintézissel befolyásolják a termékek beltartalmát.

A termékek 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 hazai zöldségfogyasztás 20%-át a paradicsom adja, ami kedvező, mivel jótékony hatása van az egészségre a benne lévő sok antioxidánstól, melyek 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 kutatásom célja az volt, hogy felmérje, hogyan szabályozhatják a különböző összetételű fényspektrumok a fotoszintetikus aktivitást, a növekedést, a termésmennyiséget 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 a kísérlet során, 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 balkonparadicsomban.

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 (°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 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 reakciócentrumokból 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 reakciócentrumaiban 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 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 fotoperiodizmusa 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. A kriptokrómok elősegítik a hipokotil megnyúlásának visszaszorítását tartós kék fény besugárzásnál, 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).

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 fototróp válaszok közvetítésében, a levélmozgások és a levelek kiterülése aktiválásában is szerepet játszanak, emellett a fotoszintetikus hatékonyság és a növényi növekedés optimalizálását segítik elő, különösen gyenge fényviszonyok mellett. A fototropinok közvetítik a kloroplasztisz akkumulációt és a

fény elkerülési reakciókat gyenge és erős fényre. 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 versenytársaktól való 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, ennek receptora a fitokróm. Erre 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, 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 előállítása) (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 többlépéses 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 Különböző fényhullámhosszok 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 az 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 gyökérnövekedés különösen gyenge volt a vörös és narancs kezelések 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 vörös fény nélkülözhetetlen, mivel a klorofillok és fitokrómok egyik elnyelési csúcspontja (Tuba & Csintalan, 2009). Önmagában alkalmazva a paradicsompalánták fotoszintézisének sebessége legalább harmadára csökkent a kék-vörös kezelések eredményeihez képest, valamint a növények abnormális szárnyulást 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, az egységnyi levélterületre jutó klorofill és karotinoid tartalom, és a klorofill-a és klorofill-b aránya viszont 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 fényreceptbeli 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 (klorofillok 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.

A vörös-kék fény különböző arányát tekintve a fénykezelésekben 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 jól teljesített a korábban már említett kategóriában, a 10:1 és a 19:1 vörös-kék aránnyal, valamint 100% HPS (nagy nyomású nátrium lámpa), 50%:50% LED-HPS keverék, és egy kiegészítő világítás nélküli kezeléssel összehasonlítva. Ennél a kutatásnál megfigyelték, hogy a magasabb fényintenzitás ($135 \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) növelte a termésmennyiséget és a biomasszát is az alacsonyabb fényintenzitással szemben ($100 \mu\text{mol m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$).

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 HPS-sel 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 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 előállításában. 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, Khoshimkhujaev et al., 2014). A termések minőségét is befolyásolta az UV-A kiegészítő világítás, ezeknél a növényeknél alacsonyabb volt a repedezési arány, megnövekedett az oldható száraanyag tartalom, a titrálható savasság és az aszkorbinsav-tartalom. A termések 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, cikóriásav, luteolin-7-glükozid 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 (plasztokinonok elpusztítása, II. fotokémiai rendszer károsítása), a mitokondriumokon (mitokondriális transzmembrán potenciál elvesztése, az ion mobilitás és eloszlás megváltozása, valamint reaktív oxigén formák termelődése és az oxidatív stressz) és általában a membránokon (tilakoidok szerkezetének károsítása, lamellás membránok szerkezeti integritásának megzavarása), illetve gátló hatását a fotoszintetikus elektrontranszportra, és a Calvin-ciklus enzimjeire is. Lehetséges azonban olyan dózisok meghatározása, amelyek a várt hatást biztosítják anélkül, hogy a tárolt növényi szervekre negatív mellékhatásokkal lennének. Az UV-C fény tényleges felhasználására terepi körülmények között alkalmaznak olyan lámpákat, amelyek egy másodperc alatt még 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 stresszekhez való alkalmazkodás serkentésére is ki lehet használni. Ezek összefügghetnek az UV-C-nek a reaktív oxigéngyökök termelésére kifejtett hatásával, melyek jelátvivő szerepet töltenek be a betegség ellenálló növényekben, így a kórokozókat visszaszorítják (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 a fényfehérítés jelensége miatt az UV-C fénynek negatív hatása volt a β -karotin, 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 kezeletlen kontrollokon több mint 175 atka volt és a lombozar 65%-a hálós volt, a levelek sárgultak. Janisiewicz et al. (2016) munkájában lisztharmattal fertőzött szamócán az UV-C besugárzás több mint négyszeres kárcsökkenést eredményezett, és nem befolyásolta a levél fotoszintézisét. Csökkentette a beteg gyümölcs mennyiségét, és 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).

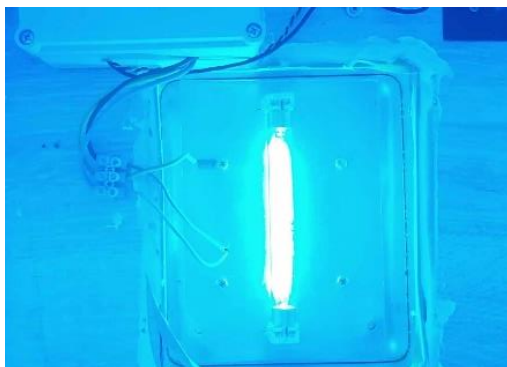
A leszűretelt termékek tömegét konyhai mérlegen megmértük, egy részüket félretettük 1 vagy 2 hetes tárolásra 5 °C-os hűtőszekrénybe (T0, T1, T2), a többit fénykezelésenként különválasztva összetörtük, és a paradicsomlevet Eppendorf csövekben lefagyasztottuk a beltartalmi mérések elvégzéséig (3.-4. kép). 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 termékek 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.

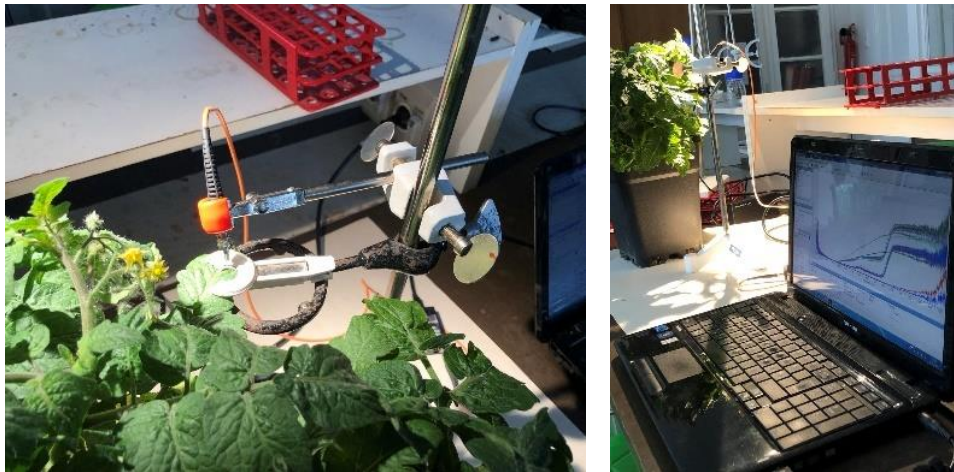
A reflektancia mérések adataiból különböző vegetációs indexeket számoltunk ki, amelyek növényélettani szempontból és a kutatás szempontjából értékes információkat adnak. Ezek közül az adatelemzésekben felhasznált indexek az MTCI, ARI1 ([http2](http://2)).

- 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

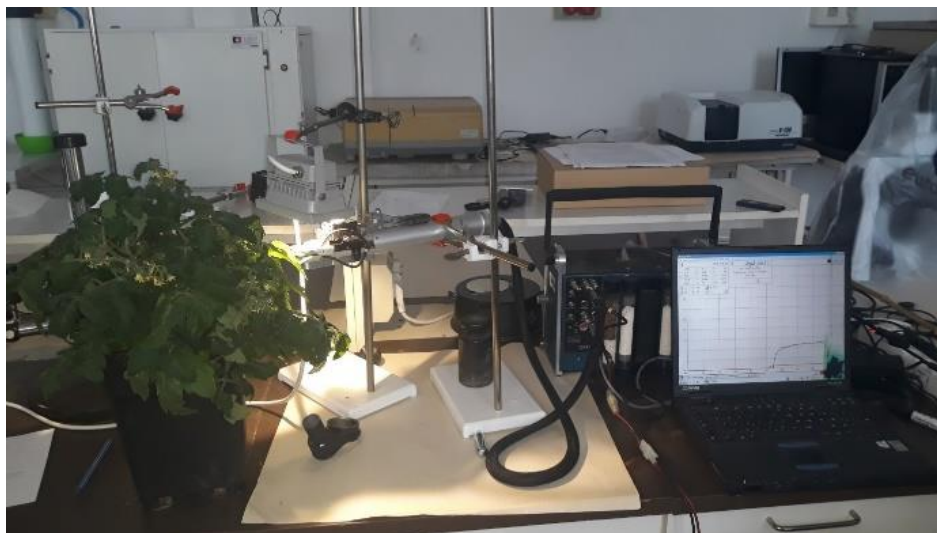
A fluoreszcencia mérésekhez FMS-2 (Hansatech, Németország) fluorométert használtunk (10. kép). A mérés során az előzetesen 15 percen keresztül sötétben tartott leveleket kis intenzitású, modulált fénnel megvilágítva rövid időn belül (30-40 milliomod másodperc) egy lokális maximumot látunk a fluoreszcencián (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

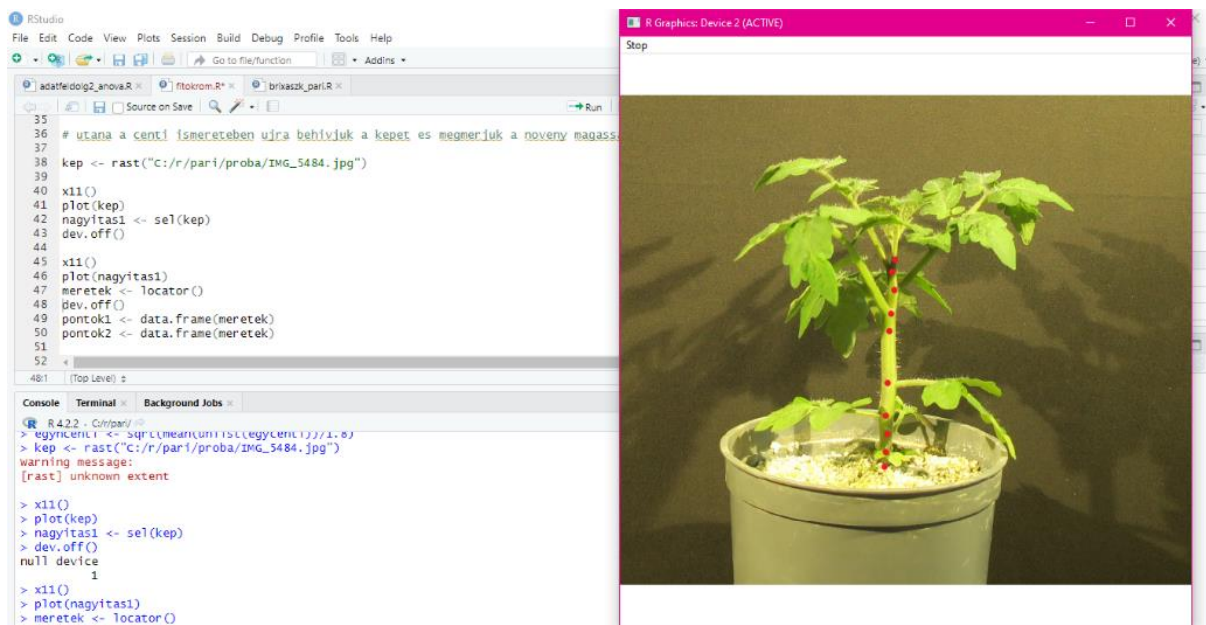
A 17. héten a betakarítás után felszámoltuk az állományt és a gyökereket leválasztva a hajtásról külön-külön megmértük őket. Egy hét elteltével ezt megismételtük a száraz növényeken (12.-13. kép).



12-13. kép: Bal oldalon a frissen felszámolt növényállomány. Jobb oldalon a kiszáradt növények.
(Forrás: Saját fénykép)

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.



14. 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)



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

3.4.4 Malondialdehyd (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 malondialdehyd 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 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:

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

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)

3.5 Statisztikai kiértékelés

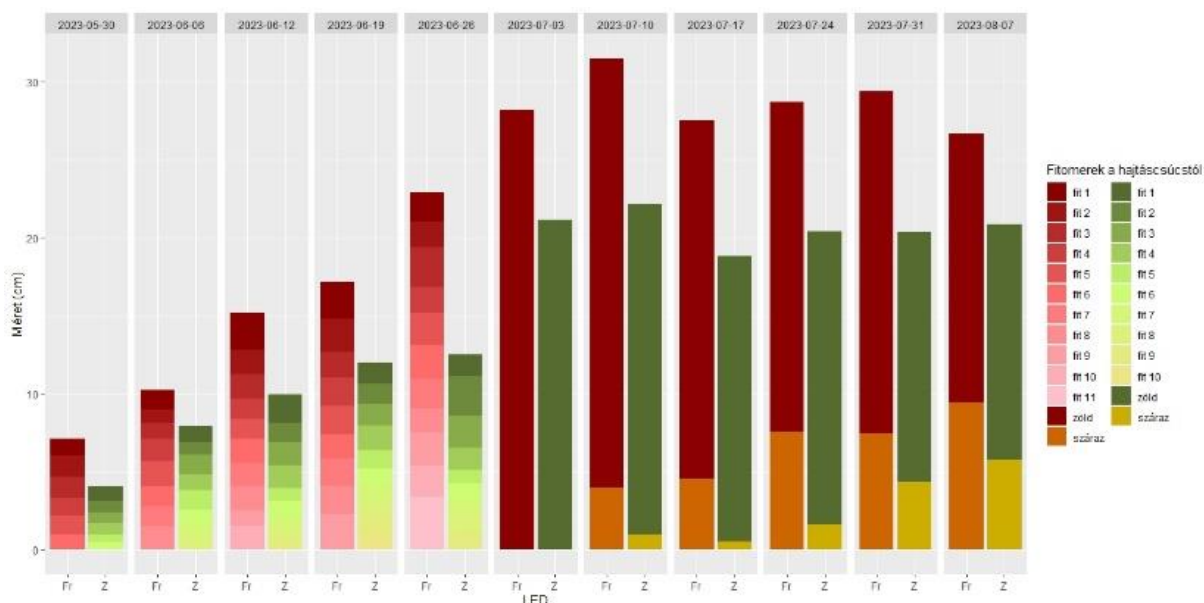
A különböző műszereken mért adatokat Excel fájlokba gyűjtöttük össze. Ezeket R program segítségével dolgoztuk fel és ábrázoltuk. A különböző fényminőségi kezelések hatását (illetve a terméseknél az UV-C, a tárolás, a szedési idő és az érettség hatását is) a vizsgált paraméterekre egyutas varianciaanalízis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

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 szinte lineáris a növekedés (1. 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 16. képen, amelyen +FR növény van. A mellette lévő 17. képen egy ugyanakkor fényképezett sokkal kompaktabb +Z növény látható. A növények mindkét fénykezelés alatt ugyanakkor kezdtek el kopaszodni, ez az 1. ábra utolsó oszlopain látszik. A színkezelések között nem volt szignifikáns különbség a hajtás és a gyökér friss és száraztömeg tekintetében.



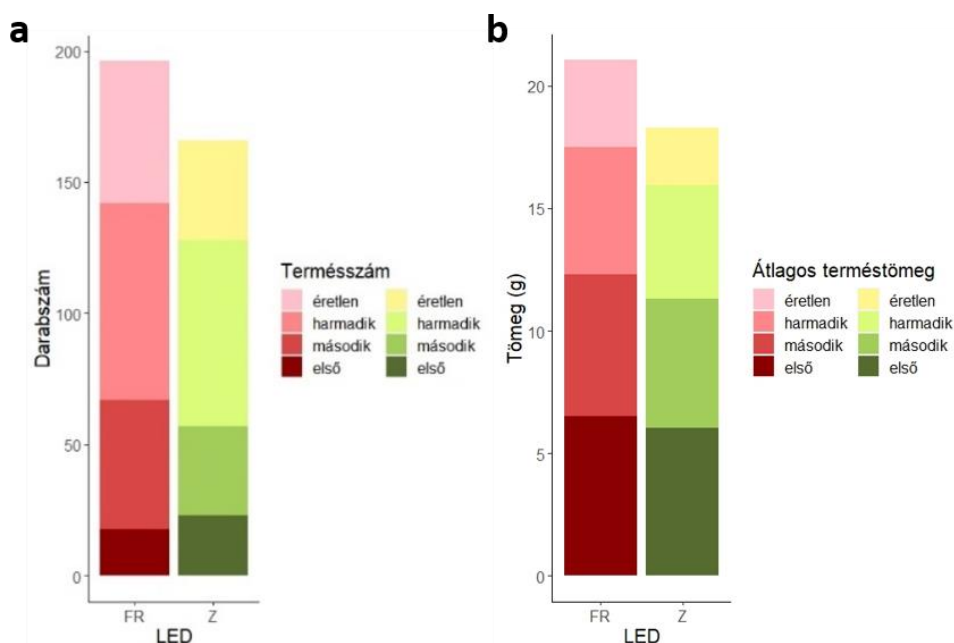
1. ábra: A növény növekedése fénykezelésenként, hetente. A színátmenetek a fitomerek számát és méretét mutatják. A színátmenet nélküli oszlopok alján az eltérő színek a növények felkopaszodott szárméretét jelzik. (Forrás: Saját ábra)



16-17. 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 kriptokrómok 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 fitokróm hatás. Ezt mutatja a 2. 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.

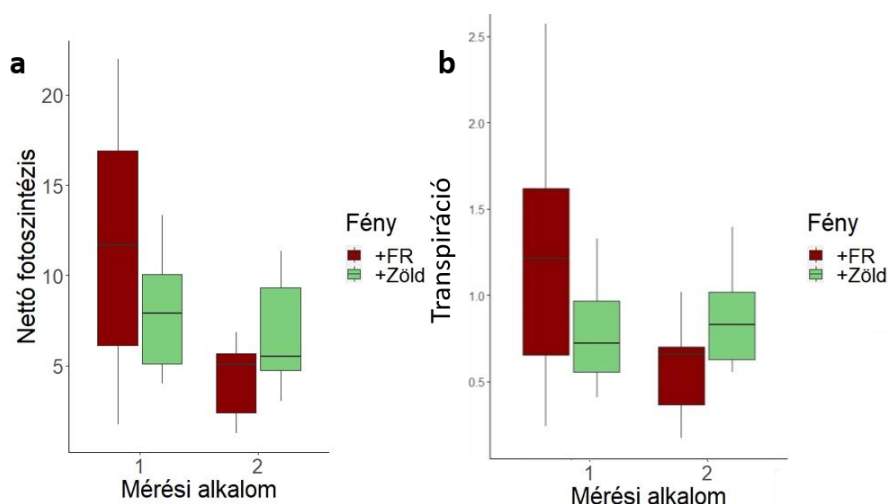


2. ábra: A termések száma (a) és átlagos tömege (b) fénykezelésenként és szedési alkalmanként ábrázolva az éretlen termésekkel együtt.

(Forrás: Saját ábra)

4.2 A fényreceptek hatása a paradicsom fotoszintetikus tulajdonságaira

A párologtatás mértéke egyenesen arányos volt a fotoszintézissel (3. 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.



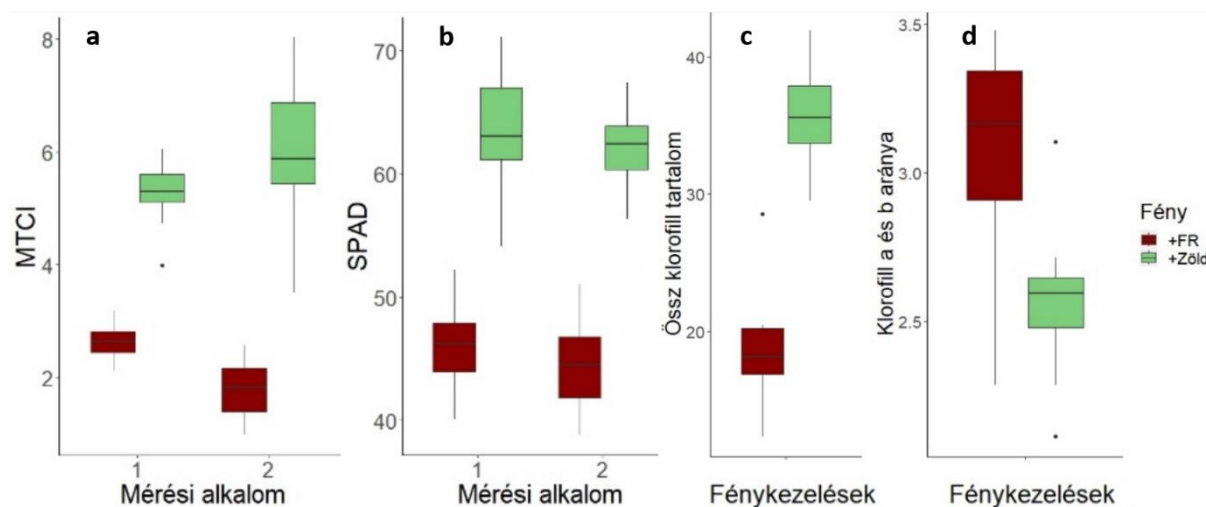
3. ábra: A paradicsomnövények nettó fotoszintézise ($\mu\text{mol CO}_2 \text{ m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (a) és párologtatása ($\text{mmol H}_2\text{O m}^{-2} \text{ s}^{-1}$) (b) fénykezelésenként és mérési alkalmanként.

(Forrás: Saját ábra)

A klorofilltartalommal arányos változók egyenesen arányosak voltak egymással (4. 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 (4. d) ábra). A +Z besugárzás alatt termesztett növények levélszíne sötétebb volt az eltérő pigmentösszetétel miatt (17. 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).



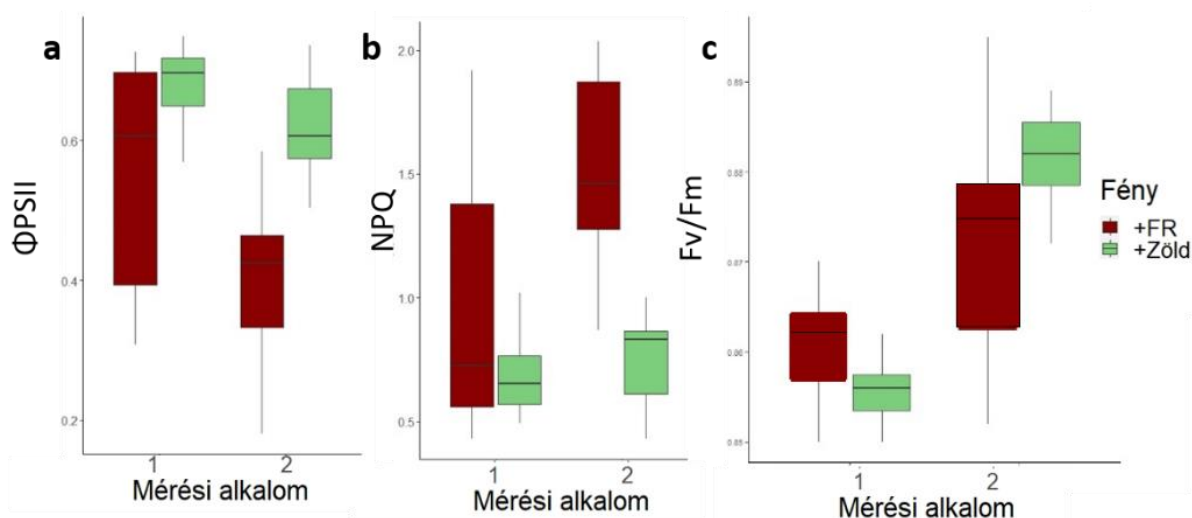
4. ábra: A klorofilltartalom alakulása az MTCI vegetációs index (a), a SPAD mérés (b), és a leveleken mért pigmenttartalom (c) alapján, valamint a klorofill-a és klorofill-b aránya (d) fénykezelésenként és mérési időpontokként a leveleken mért pigmenttartalom alapján.
(Forrás: Saját ábra)

A fotokémiai reakcióban közvetlenül résztvevő pigmentek a reakciócentrumokban lévő klorofill-a pigmentek. Ezen pigmentek fényelnyelését, vagyis a nem ciklikus energiatranszport kvantumhozamát a ΦPSII jellemzi (5. 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 (5. 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 xantofil pigmentek epoxidációs állapotában bekövetkező rövid távú reverzibilis változásaival (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 alá. (Vitale et al., 2022)

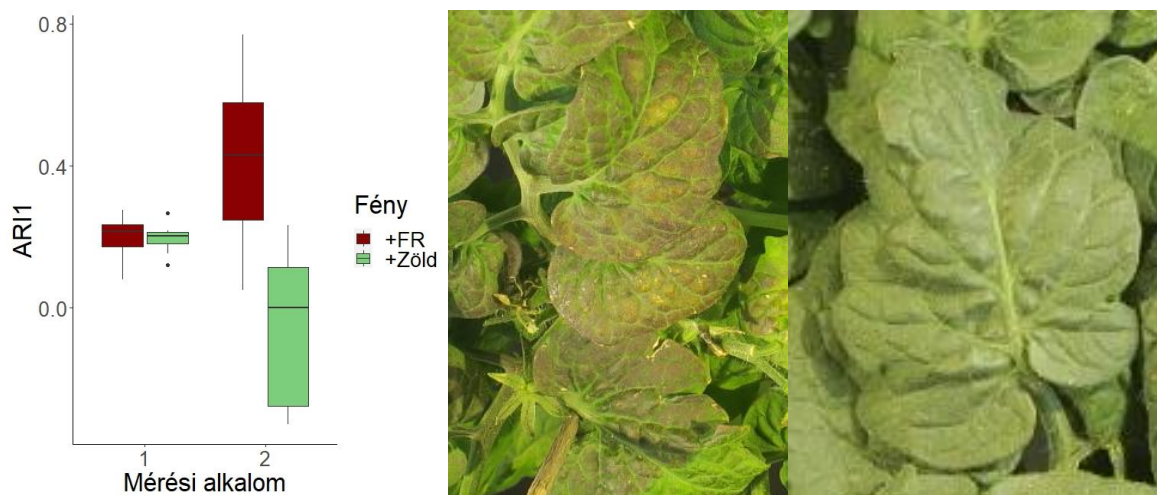
Az F_v/F_m , az 1. mérésnél a +FR kezelésben szignifikánsan magasabb ($p=0,004$) volt, mint a +Z kezelésben, míg a 2. mérésnél pont fordított helyzetet tapasztaltunk ($p=0,018$) (5. c) ábra). Ez is magyarázhatja, hogy az 1. mérésnél miért volt a +FR fotoszintézise magasabb a +Z-nél. Az F_v/F_m mindkét 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.



5. 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 ($p<0,001$) (6. 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 fotooksidatív 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 5. 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 18. és 19. képeken.



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

18-19. kép: Antociános színváltozás az augusztus 7-i +FR és +Z leveleken.
(Forrás: Saját ábra, saját kép)

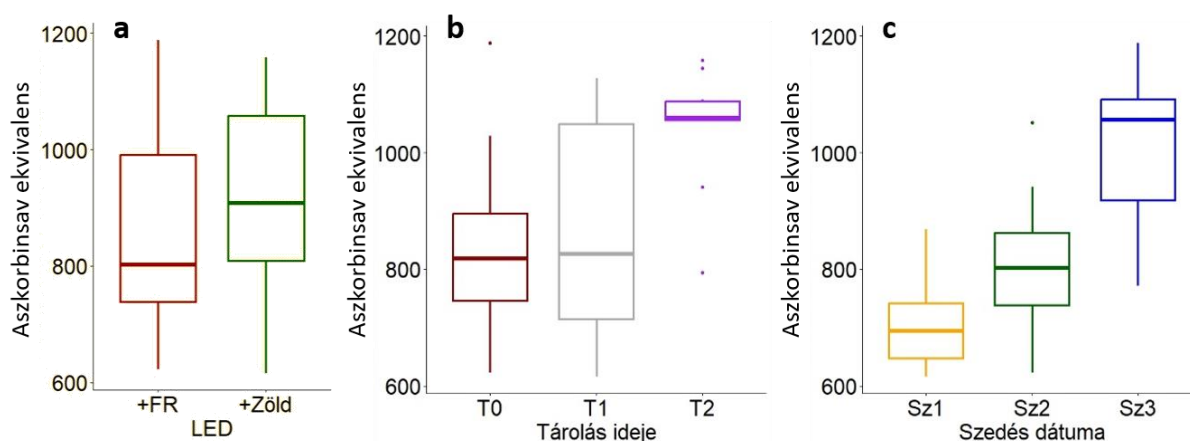
A különböző fényreceptek alatt nevelt paradicsomok fentebb tárgyalt fotoszintetikus tulajdonságait összefoglalva láthatjuk a 2. táblázatban, ahol az adatok átlagai és szórása szerepel.

2. táblázat: A transzspiráció, a fotoszintézis, az Fv/Fm, az NPQ, a ΦPSII, a SPAD, az MTCI, a PRI és az ARI1index 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)
ΦPSII	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 zöldség egészségességét. A paradicsom gyümölcsében 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 zöldségek nyerhetők az emberi étrendbe. Az 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 ($p=0,051$) (7. a) ábra). Továbbá azt tapasztaltuk, hogy az érett bogyókban magasabb volt az antioxidáns kapacitás ($p<0,001$), a tárolás szerint a T0 volt a legalacsonyabb, egy hétre rá még éppen nem volt szignifikáns a növekedés ($p=0,057$), de a T2 szignifikánsan magasabb, mint a T1 ($p=0,009$) (7. b) ábra). Szedés szerint az Sz3 bogyók antioxidáns tartalma szignifikánsan magasabb volt, mint az egymástól nem különböző Sz1 és Sz2 ($p<0,001$) bogyóké (7. c) ábra). Ezek alapján a minél érettebb, és a minél hosszabb ideig a növényen tartott termékek a legegészségesebbek.



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

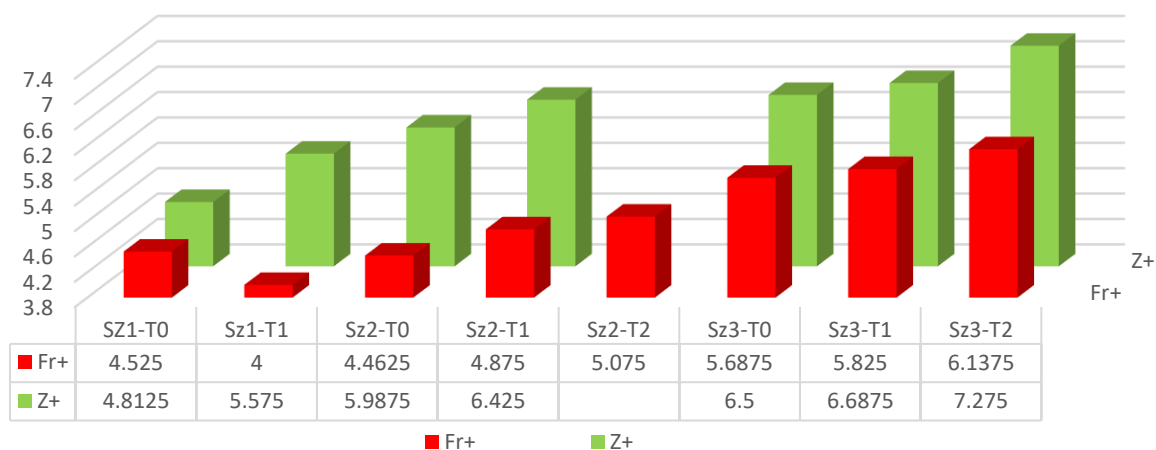
A vörös, kék és UV-fény hullámhossza különösen erősen befolyásolja a polifenolok felhalmozódását, fokozva az antioxidáns kapacitást és a reaktív oxigénfajták megkötő képességét a paradicsom gyümölcsében. Az vörös-kék kezelés által kiváltott magasabb antioxidáns kapacitás a kriptokrómokkal hozható összefüggésbe, amelyek a flavonoidok és likopinszint 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 tisztítórendszereket (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).

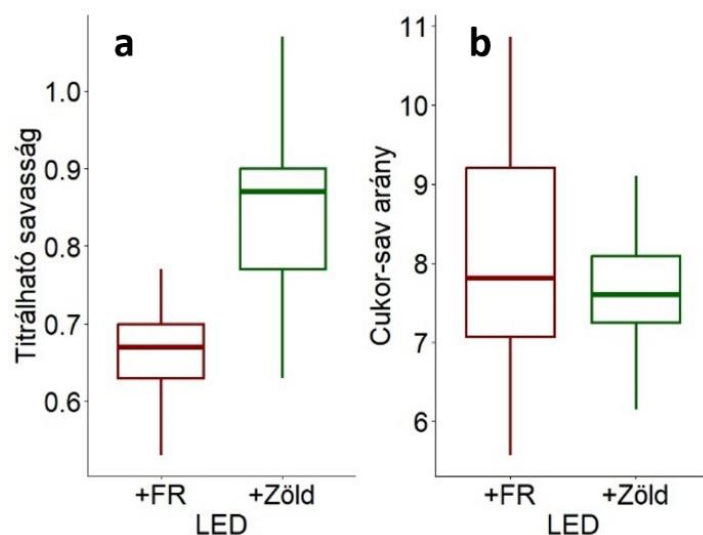
Kutatásunkban az érettség és a fénykezelés nem eredményezett szignifikáns különbségeket az MDA tartalomban, ellentétben Li et al. (2021) kutatásával. Munkájukban az MDA felhalmozódása növekvő tendenciát mutatott a paradicsom érése során, és a kék fénykezelés szignifikánsan növelte az MDA szintet, míg 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 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 (8. 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.



8. ábra: A termékek átlagos °BRIX tartalma fénykezelésenként (z tengely), szedési időpontoként, 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 (9. a) ábra). Ebből az következik, hogy a fénykezelésenkénti cukor/sav arányban nem volt szignifikáns különbség, viszont a +FR fénykezelés alatt nagyobb volt a szórás (9. 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 ($p = 0,014$, $p < 0,001$)



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

Az UV kezelés szerint a termékekben 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.

5 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.

A 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 termések kezelése UV-C megvilágítással nem eredményezett szignifikáns eltéréseket a paradicsom vizsgált beltartalmi paramétereiben.

Összefoglalva, a jelen tanulmány bemutatja, hogy bizonyos hullámhosszú kiegészítő LED-lámpák alkalmazhatók a termésmennyiség és a tápérték növelésére, továbbá megváltoztatják a növények fiziológiai teljesítményét, morfológiáját és fotoszintetikus teljesítményét. Értékes információkat kaptunk olyan fényreceptek kidolgozásához, melyek

javíthatják a paradicsomnövények fotoszintetikus teljesítőképességét, növekedését és fejlődését és így a termékek tápértékének minőségét ellenőrzött körülmények között, elősegítve az emberi táplálkozás számára előnyös antioxidánsok szintézisét.

A megfelelő fényrecept összeállításához a spektrális eloszláson kívül a megvilágítás intenzitását és a fotoperiódus hosszát is figyelembe kell venni, így ezek további kutatásokat igényelnek. Fontos lenne a hullámhossz összetételek hatásának további vizsgálata is, hogy optimalizálni tudjuk a távoli vörös fény indukálta nagyobb hozamot és korai virágzást, termésérést, illetve a zöld tartományból érkező fotonok termés beltartalomra és fotoszintézisre gyakorolt pozitív hatását. A kutatásokat fontos kiterjeszteni üvegházi kísérletekre és más paradicsom fajtákra is, hogy a gyakorlatban is alkalmazhatóak legyenek az eredmények.

A kutatási javaslatokból látszik, hogy ezen kísérleti beállítás csak kis területét érinti „A LED világítás a növénytermesztésben” témakört, számos kutatást kell még elvégezni, hogy a legjobban működjön a mesterséges megvilágítás az üvegházakban.

6 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.

7 Irodalomjegyzék

- Aarrouf, J., & Urban, L. (2020). Flashes of UV-C light: An innovative method for stimulating plant defences. *PLoS ONE*, 15(7 July). <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0235918>
- Allaga, J., & Bódis, J. (2014). *Növénytan-Növényélettan jegyzet*.
- Benzie, I. F. F., & Strain, J. J. (1996). The Ferric Reducing Ability of Plasma (FRAP) as a Measure of “Antioxidant Power”: The FRAP Assay. In *ANALYTICAL BIOCHEMISTRY* (Vol. 239).
- Boros, I. F. (2021). *Saláta (Lactuca sativa L.) fajták produkcióbíológiai jellemzése és komplex értékelése LED-es megvilágítási programok tesztelésével*.
- 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. <https://doi.org/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.
- Buchanan, B. B., Gruissem, W., & Jones, R. M. (2015). *BIOCHEMISTRY & MOLECULAR BIOLOGY OF PLANTS*.
- 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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. In *HORTSCIENCE* (Vol. 49, Issue 4).

- Eissa Piri. (2011). Effects of UV irradiation on plants. *African Journal of Microbiology Research*, 5(14). <https://doi.org/10.5897/ajmr11.263>
- Fehér, A. S. (2019). *A növények élete Egyetemi jegyzet*.
- Helyes, L. (2007). *A paradicsom (Lycopersicon lycopersicum (L.) Karsten) termésképzésére ható abiotikus és biotikus tényezők értékelése különös tekintettel a beltartalmi összetevőkre*.
- http1. (n.d.). *A fontosabb zöldségfélék termesztése és felhasználása*. Retrieved April 20, 2024, from https://www.ksh.hu/stadat_files/mez/hu/mez0024.html
- http2. (n.d.). *A database for remote sensing indices*. Retrieved April 20, 2024, from <https://www.indexdatabase.de/>
- 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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.3389/fpls.2019.00322>
- 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. <https://doi.org/10.1007/s13580-014-0021-x>

- Kim, H. J., Yang, T., Choi, S., Wang, Y. J., Lin, M. Y., & Liceaga, A. M. (2020). Supplemental intrac canopy far-red radiation to red LED light improves fruit quality attributes of greenhouse tomatoes. *Scientia Horticulturae*, 261. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1016/j.envexpbot.2021.104407>
- Lichtenthaler, H. K., & Buschmann, C. (2001). *Chlorophylls and Carotenoids: Measurement and Characterization by UV-VIS Spectroscopy*. <https://doi.org/https://doi.org/https://doi.org/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. In *PHOTOSYNTHETICA* (Vol. 43, Issue 3).
- 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. In *Journal of Integrative Agriculture* (Vol. 2012, Issue 1).
- 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)*.
- Massa, G. D., Kim, H.-H., Wheeler, R. M., & Mitchell, C. A. (2008). *Plant Productivity in Response to LED Lighting*.

- 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). <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1007/s13580-022-00447-1>
- Pék, Z., Csorbainé Gógán, A., Dimény, J., Helyes, L., & Ombódi, A. (2007). *Zöldségtermesztés*.
- 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. <https://doi.org/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). <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1002/ps.5045>
- Taiz, L., Zeiger, E., Max Moller, I., & Murphy, A. (2015). *Plant Physiology and Development, Sixth Edition*.
- 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. <https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1007/s11120-021-00879-3>
- Tuba, Z., & Csintalan, Z. (2009). *Növényélettani egyetemi jegyzet agrármérnök és környezetgazdálkodási agrármérnök hallgatók részére*.

- 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. In *Plant Physiology and Biochemistry* (Vol. 105, pp. 1–11). Elsevier Masson SAS. <https://doi.org/10.1016/j.plaphy.2016.04.004>
- 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. <https://doi.org/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). <https://doi.org/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. <https://doi.org/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. [https://doi.org/10.1016/S2095-3119\(18\)62130-6](https://doi.org/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. <https://doi.org/10.1111/pce.13730>