



Horticulture 4.0
Intelligens növényházak
a kertészeti szakképzésben

Intelligens növényházi technológiák

MESTERSÉGES MEGVILÁGÍTÁS DIGITALIZÁCIÓJA A NOVÉNYHÁZAKBAN



Horticulture 4.0 - Intelligens növényházak a kertészeti szakképzésben projekt kiadja a Horticulture 4.0 konzorcium: A kiadvány CC BY-NC 4.0 licenc alatt áll.

WEB: <https://h40.itstudy.hu/hu>



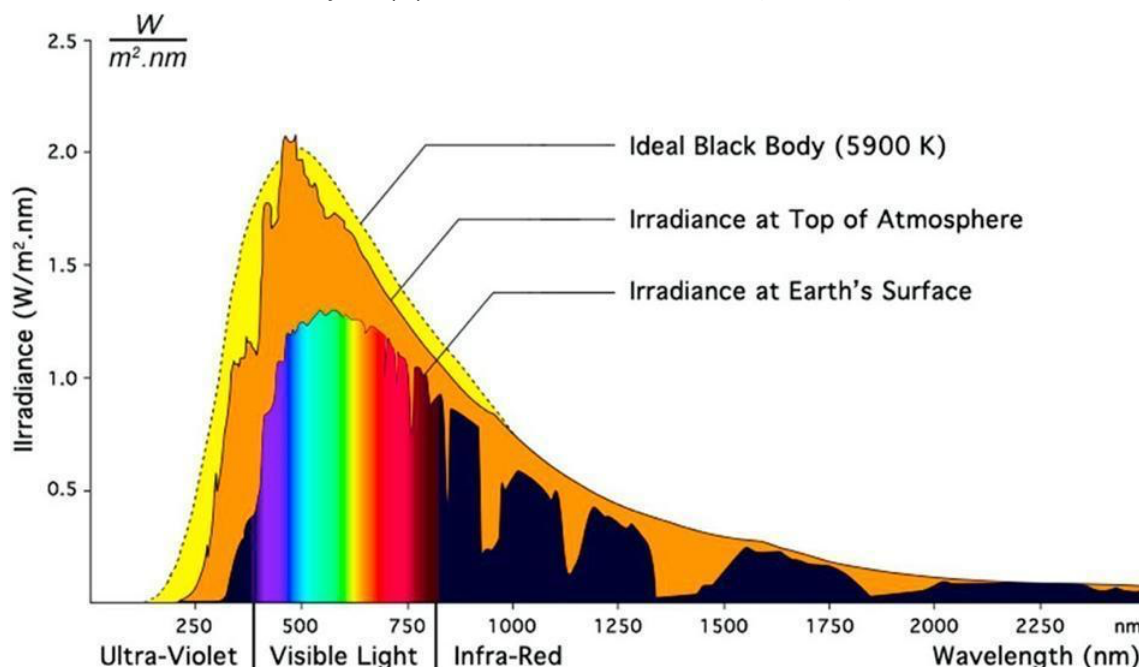
**Az Európai Unió
társfinanszírozásával**

Az Európai Unió finanszírozásával. Az itt szereplő vélemények és állítások a szerző(k) álláspontját tükrözik, és nem feltétlenül egyeznek meg az Európai Unió vagy az Európai Oktatási és Kulturális Végrehajtó Ügynökség (EACEA) hivatalos álláspontjával. Sem az Európai Unió, sem az EACEA nem vonható felelősségre miattuk.

1. A fény szerepe a növények életében

Fénynek nevezzük az elektromágneses sugárzásnak az emberi szem által látható (visible, VIS) hullámhosszúságú tartományát (400–780 nm), melynek kiemelt spektrumai: 400–420 nm – ibolya; 420–490 nm – kék; 490–540 nm – zöld; 540–640 nm – sárga; 640–780 nm – vörös. Ugyanez a tartomány játszik aktív szerepet a növények fotoszintézisében. **A fotoszintézis** az a biokémiai folyamat, melyben az élőlények a napfény energiáját felhasználva szerves anyagokból szerves anyagokat hoznak létre (1). A földre érkező napsugárzás hullámhossz szerinti intenzitását vizsgálva megállapítható, hogy ebben a látható tartományban van a legintenzívebb sugárzás (2). A növények tehát úgy alakultak ki, hogy a legintenzívebb sugárzást legyenek képesek hasznosítani (1. ábra). Ezt fotoszintetikusan aktív sugárzásnak nevezzük (Photosynthetically Active Radiation PAR).

1. ábra A teljes napspektrum a Föld felszínén és a légkör tetején (2).



A Nap sugárzó energiájának spektrumából kb. 40-48 %-ot tesz ki a fotoszintetikusan aktív sugárzás, amely függ a légkör jellemzőitől (borultság, relatív páratartalom, légszennyeződés) és a földrajzi helytől (szélességi kör). A fennmaradó mintegy 52-60 % sugárzóenergia túlnyomó része az infravörös tartományban (IR) helyet foglaló, hosszú hullámú hősugárzás. Ezen kívül, az ibolyántúli sugárzás (UV) is kifejt biológiai aktivitást (3).

A növényeknek a fény hasznosítására kialakult szerve a levél, amelynek méretétől és elhelyezkedésétől függ, hogy a fénysugárzásból mennyit képesek felvenni. A levelek méretét a levélfelülettel (leaf area - LA) fejezzük ki. Egy növény optimális körülmények között annál több fényt képes hasznosítani, minél nagyobb a levélfelülete. Növényállományban viszont a levélfelület növelésével csak bizonyos határig növekszik a fényhasznosítás, mivel a növények kölcsönös árnyékolása egy bizonyos mértéken túl gátolja azt. Növényállományban a növényzet levélfelületét nemcsak abszolút értékben, hanem a tenyésztőterülethez (At) viszonyítva is meg kell állapítani. A kettő arányát levélfelület-indexnek (LAI=LA/At) nevezzük. Növényfajtól függően a levélfelület-index növelése is csak egy bizonyos határig növeli a fényhasznosítást, e felett fellép az

önárnyékolás, vagyis az alsó levelek nem jutnak a fotoszintézishez elegendő mennyiségű fényhez (4).

A különböző növényfajok fényigénye eltérő. A fényigény vizsgálatánál a megvilágítás mennyiségén kívül a növényeket ért fényhatás időtartamát is figyelembe kell venni. A több fényt igénylő fajok közé tartoznak: a paradicsom, a paprika, a görögdinnye és a sárgadinnye. Közepes fényigényűnek számít a fejes- és a kelkáposzta, a bab, a cékla és a hagymafélék. Az árnyéktűrők közé sorolhatók: a zeller, a sárgarépa és a rebarbara. Ma már a legtöbb termesztett zöldségfaj fényigénye számszerűen is ismert, melyet a DLI (Daily Light Integral) fejez ki, az egy nap alatt az adott felületre beérkező fotonok mennyisége (napi fényintegrál), mértékegysége $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, mely kiszámítható a korszerű fénymérő szenzorok által szolgáltatott adatokból ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (5). Így például, olyan fényigényes növények neveléséhez, mint a paprika vagy a paradicsom, minimum $22 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, a kevésbé fényigényes jégsaláta esetén $11.5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, (6–9).

A növények reakcióit, a megvilágításban és a sötétben töltött idő arányára, fotoperiodizmusnak nevezik. A fotoperiodikus szabályozásnak kitett fejlődési jellemzők közé tartozik a virágzás, a rügyek nyugalma és a levelek öregedése. Ebből a szempontból három csoport különíthető el, melyek a következők (10):

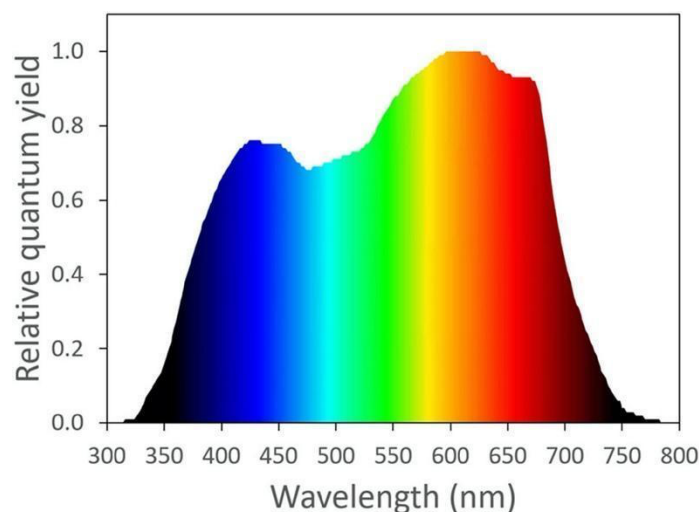
1. A rövidnappalos növények virágkezdeményei akkor alakulnak ki, ha a napi fotoperiódus legfeljebb 12 óráig tart. Ennél hosszabb fotoperiódusok a virágképződést gátolják vagy teljesen szüneteltetik. Termesztett növényeink közül e csoportba sorolhatók: a szója és az édesburgonya.
2. A hosszúnappalos növények virágkezdeményei akkor alakulnak ki, ha a napi fotoperiódus hosszúság legalább 9-14 óra, de minél jobban meghaladja a fotoperiódus ezt a kritikus értéket, annál gyorsabb a virágképződés. Ide tartoznak: a borsó, a spenót, a retek és a kínai kel.
3. A nappalközömbös növények fejlődése a nappal hosszúságától független, ezeket afotoperiodikus növényeknek is nevezik. Egyes növényfajok némely fajtái rövidnappalosak, más fajtái hosszúnappalosak. Ilyenek: a fejessaláta vagy a paradicsom.

Az egyes növényfajokon belül is megtalálhatók ezek a csoportok, tehát a fajtaválasztásnál elengedhetetlen tudni, hogy az adott termesztési időszakra, vagy megvilágítás hosszára, melyiket válasszuk (11).

A megvilágítás az első helyen álló környezeti tényező, ami hat a növények növekedésére és fejlődésére. A zárt térben történő termesztés nagyban függ a fény minőségétől is. A természetes fény a legfontosabb a növényházi termesztésben. A mérsékelt övben, a hosszúkultúrák termesztésben csak rövid ideig optimális a beérkező napfény mennyisége, amely a növények felépítő folyamatainak (asszimiláció) szempontjából a legfontosabb. A holland kutatók által megfogalmazott, úgynevezett 1%-os szabály értelmében, 1%-kal több besugárzás általában 1%-kal nagyobb termésmennyiséget eredményez (12). A berendezések fejlesztése tehát elsősorban a jobb fénykihasználás irányába történik, melynek csak egyik kulcs tényezője a burkolat anyaga (ld. 3 modul 1. táblázat).

Mivel a növények fényre adott válasza, a **fotomorfogenezis**, nagymértékben függ a genotípustól, a fejlődési állapottól, a különböző fajtáknál a maximális termés eléréséhez meg kell határozni a különböző fejlődési szakaszok megvilágítási igényét (13).

A különböző spektrumok fotoszintetikus hatékonyságát sokan vizsgálták, közülük az egyik legelfogadottabb a McCree görbe (14).



2. ábra A CO₂ asszimiláció maximális kvantumhozamának normalizált hatásspektruma keskeny hullámsávok esetén az ultraibolya sugárzástól a távoli vörös hullámhosszig (15)

Az eltérő spektrumú megvilágításra a növény fajok, sőt a fajták is eltérően reagálnak, de abban megegyeznek a kutatások, hogy a vörös fény fontos a fotoszintetikus apparátusnak és befolyásolja az asszimiláták szállítását (16).

A kék fény pedig a fotoszintézisben a kloroplasztok fejlődésére, a klorofill képződésre és a növény beltartalmának alakulására van hatással, de a növények válasza nagymértékben függ a kék megvilágítás dózisértől (17).

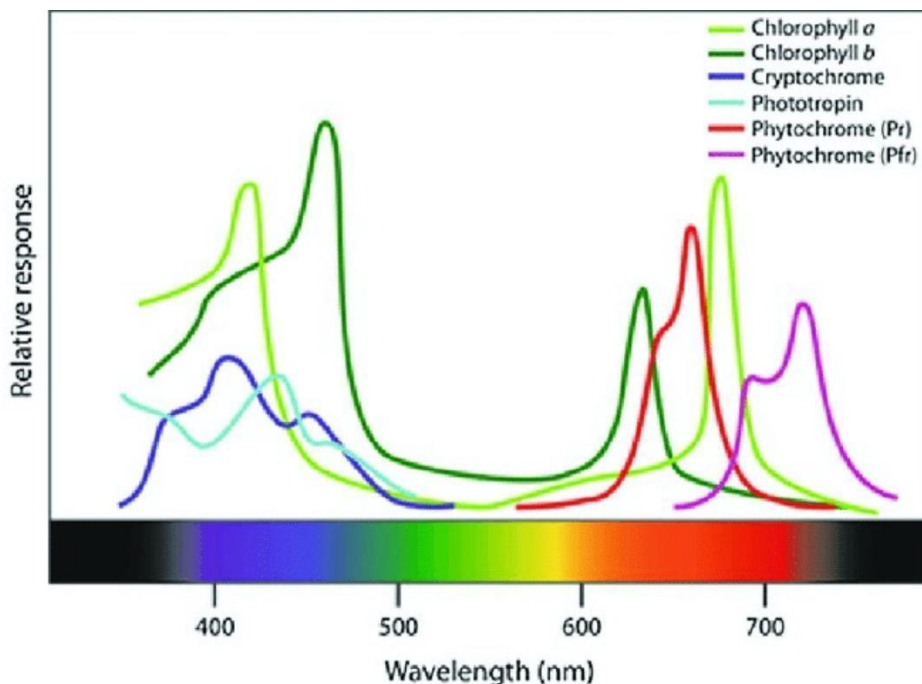
A zöld megvilágítás hatása hasonló a kékhez, a fitokróm és kriptokróm pigmenteken keresztül részt vesz a fotoszintézisben (18). Túl sok vörös fény megvilágítás az ún. „vörös fény szindrómához” vezet, ami a mikro-zöltségek rossz morfológiájában, hibás gén expresszióban nyilvánul meg (18,19). A vörös fény és más fényforrások, különösen a kék fény kombinációja, hatékonyan szabályozhatja a sztómák nyílását és javíthatja a növények szén-dioxid-felvételét, ezáltal megelőzve a "vörös fény szindróma" képződését (20,21).

A fotoszintézisen túlmenően a fény más növényi folyamatokat is befolyásol, mint például a **fotomorfogenezis**, amely magában foglalja a növények fényre adott növekedési és fejlődési válaszait. A fotomorfogenetika a fény által indított növekedési és fejlődési válaszokat írja le, amelyek nem feltétlenül kapcsolódnak közvetlenül a fotoszintézishez. A fény ebben az esetben olyan jelzéseként szolgál, amely aktiválja a növények fotoreceptorait, befolyásolva a növények növekedését, virágzását, gyökérfejlődését és egyéb fejlődési folyamatait.

Ezek a fotoreceptorok összetett jelátviteli hálózatok részét képezik, amelyek befolyásolják a növények génexpresszióját és fejlődését. A fénytípusok, intenzitások és expozíciós időszakok érzékelése révén a növények alkalmazkodnak a környezeti feltételekhez, optimalizálják a fotoszintetikus aktivitást és a növekedést, valamint a túléléshez szükséges stratégiákat alakítanak ki.

Az egyes fotoreceptorok pontos szerepét és az általuk közvetített jelátviteli utakat még mindig aktívan kutatják és ez a tudományterület dinamikusan fejlődik. A fotoreceptorok a következők (22): A fitokrómok főként a vörös (660 nm) és távoli vörös (730 nm) fényérzékelésért felelősek. Két

formájuk van, a Pr (vörös fényben abszorbeáló) és a Pfr (távoli vörös fényben abszorbeáló). Szabályozzák a növények növekedését, virágzását, csírázását és más fejlődési folyamatait. A kriptokrómok az UV-A és a kék fény spektrumát érzékelik (körülbelül 320-500 nm). Részt vesznek a növények cirkadián ritmusának szabályozásában, a virágzás időzítésében és a hajtásnövekedésben. UV fény hatására a növények ízközei rövidülnek. A fototropinok különösen a kék fényre (körülbelül 400-500 nm) reagálnak. Fő szerepük a fototropizmusban van, amely a növények fény felé való hajlásának mechanizmusa, valamint szabályozzák a nyitószervmozgásokat, mint például a sztómák nyitását és zárását. Az UV-B fotoreceptorok az UV-B fényt (280-320 nm) érzékelik. Szabályozzák a védekező válaszokat, mint például a UV-B elleni védekezés, továbbá befolyásolhatják a növényi növekedést és morfológiát.



3. ábra A fényt felfogó molekulák relatív elnyelési görbéi a hullámhosszok függvényében

2. Mesterséges megvilágítás

A mesterséges megvilágítással termesztett növények vizsgálata mintegy 150 évvel ezelőtt kezdődött, majd 1971-től az űrkutatás adott nagyobb lendületet az ilyen irányú kutatásoknak (23). A fényforrások kezdetben különböző fényintenzitással és -spektrummal működő fénycsövek, nagynyomású nátriumgőz lámpák (high pressure sodium, HPS) (24), majd a '90-es évektől világító diódák (Light Emitting Diode, LED) voltak (25). A mesterséges megvilágítás nagy költségigénye miatt csak viszonylag kevés zöldségfaj esetében gazdaságos. A mérsékelt övben elsősorban a zöldségpalánta előállításban, valamint néhány dísz- és fűszernövény előállító berendezésben fordul elő. Az utóbbi években paradicsomhajtató üzemekben is megvalósították, így lehetővé vált a január-február hónapokban történő betakarítás. A besugárzás csökkentésére a fény csökkentése szempontjából, kevés szükség van a mérsékelt övben.

3. Mesterséges fényforrások típusai

Az utóbbi években egyre jobban terjed a mesterséges kiegészítő világítás alkalmazása a növényházakban. Néhány dísznövénynél ez korábban is elengedhetetlen volt, de mára a zöldségnövényeknél is alkalmazzák élelmiszer előállítására. A vertikális farmok pedig egyáltalán

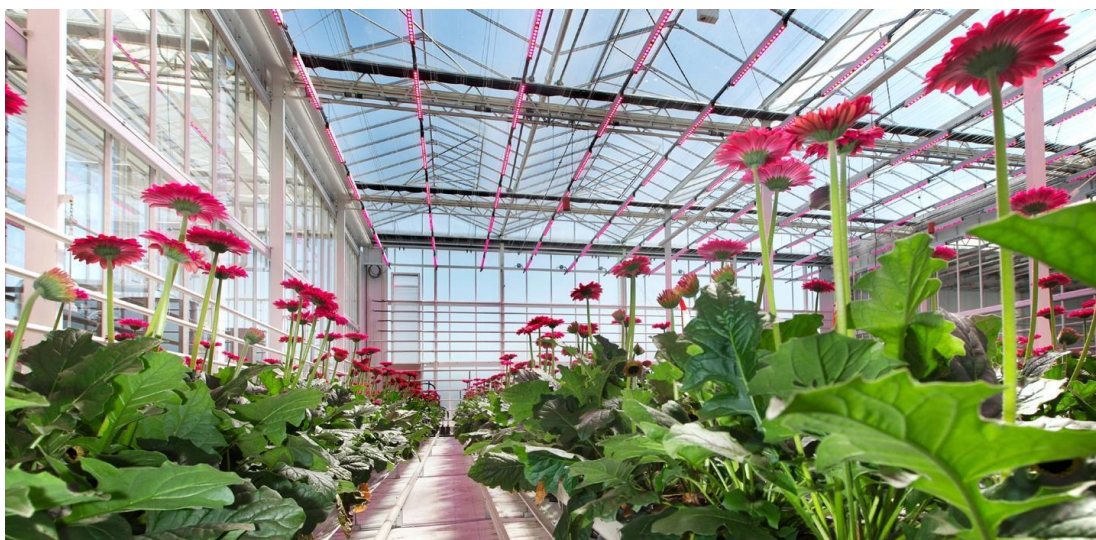
nem használnak természetes fényt, kizárólag elektromos energián alapuló fényforrásokat alkalmaznak. A növények előállításának ez utóbbi módját korábban is alkalmazták az úgynevezett fitotronokban, kizárólag kutatási célokra (26).

A növények nevelésére alkalmazott fényforrások a következők: Fénycsövek: A hagyományos fénycsövek, mint például a T5, T8, és T12 csövek, továbbra is népszerűek, különösen a fiatal palánták és a kis növények növekedéséhez. Ezek a fényforrások kiválóak az egyenletes fényeloszláshoz nagyobb területeken. Kompakt Fénycsövek (CFL) és Nagynyomású Nátriumlámpák (HPS): Ezek a lámpatípusok hosszabb élettartamot és jobb fényhasznosítást kínálnak, de több hőt termelnek, ami megköveteli a hőmérséklet szabályozását. LED Világítás: A LED (Light Emitting Diode) lámpák egyre népszerűbbek a növénytermesztésben, mivel energiahatékonyak, hosszú élettartamúak és lehetővé teszik a fény spektrumának szabályozását. Különböző színű LED-ek, mint például a piros és a kék, különösen hasznosak a növények bizonyos növekedési szakaszaikhoz. A következő táblázat a mesterséges fényforrások előnyeit és hátrányait hasonlítja össze (27).

1. táblázat A mesterséges fényforrások előnyei és hátrányai

Fényforrás típusa	Előnyök	Hátrányok
Fénycsövek (T5, T8, stb.)	Egyenletes fényeloszlás, alacsonyabb kezdeti költségek, kisebb hőtermelés	Nagyobb energiafogyasztás, cseréjük gyakoribb, mint LED-ek esetén
Kompakt Fénycsövek (CFL)	Energiahatékonyság, könnyű beszerzés és telepítés	Hőtermelés kezelése szükséges, nem ideális nagy területekre
Nagynyomású Nátriumlámpák (HPS)	Nagy fényintenzitá, jó a virágzás támogatásához	Nagy hőtermelés, a spektrum nem kiegyensúlyozott
Fémhalogén lámpák (MH)	Jó a vegetatív növekedés támogatásához, széles spektrum.	Nagy hőtermelés jellemzi; gyakori cserére van szükség; kevésbé energiahatékony, mint a LED vagy CFL
LED	Alacsony energiafogyasztás, hosszú élettartam, kevés hőtermelés, a spektrum szabályozhatósága	Magasabb kezdeti költségek; bizonyos esetekben korlátozott fényerősség

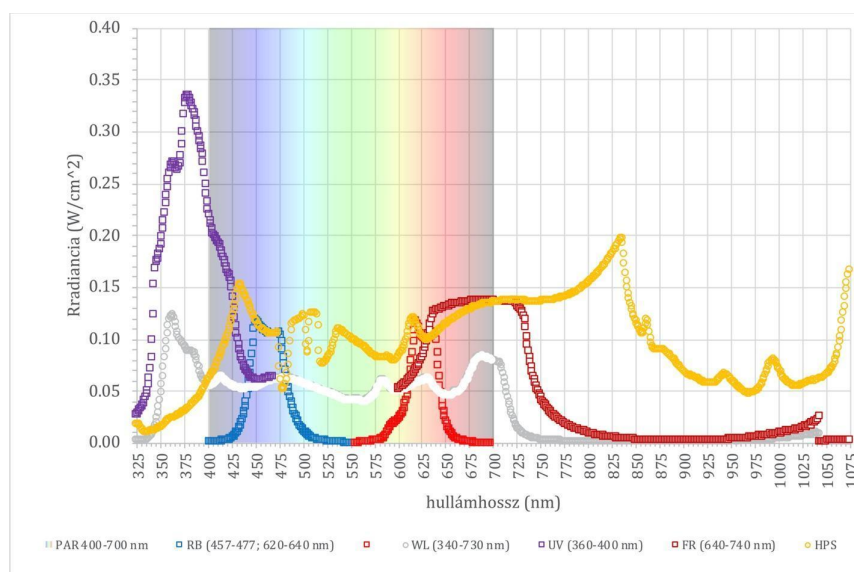
A LED alapú fényforrások jobb költséghatékonyságuknak köszönhetően (25,28,29), nagy lendületet adtak a mesterséges megvilágítású növénytermesztésnek is az elmúlt évtizedben (30). Felhasználásukkal olyan időszakokban és helyeken is lehetővé vált a növények előállítása, ahol addig korábban nem volt lehetséges, ami különösen fontos olyan növények esetén, mint az egész évben elérhető levélzöldségek (25,31).



4. ábra Nagynyomású nátriumgőz lámpa (HPS), HPS világító dióda (LED) köztes világítással (interlight) kiegészítve, felső LED világítások

4. HPS és LED fényforrások összehasonlítása

A korszerű növénynevelő házak hatékony működésének egyik alapfeltétele a megfelelő és energiatakarékos mesterséges (pót)megvilágítás biztosítása. Az utóbbi évek során a kutatás-fejlesztés ezen a területen is nagyot lépett előre. A növények számára nem a beérkező összes fény mennyiség, hanem a fotoszintetikusan aktív sugárzás (PAR) nagyobb jelentőségű (32). A látható fény tartományából a növények fotoszintetikus pigmentjei egyrészt a 450, másrészt a 660 nm körüli hullámhosszú sugárzást tudják legjobban hasznosítani. Ezen kívül az emberi szem által nem látható fénytartományokat is érzékelik (33). Mivel a LED fényforrásokban precízen szabályozható a kibocsátott fény spektruma, ezért hatékonyabb lehetőséget nyújt a növényi teljesítmény fokozására, mint a többi fényforrás. A korábban HPS, vagy más mesterséges megvilágítással rendelkező növényházakban is folyamatosan lecserélik a lámpákat a korszerűbb LED alapú fényforrásokra.

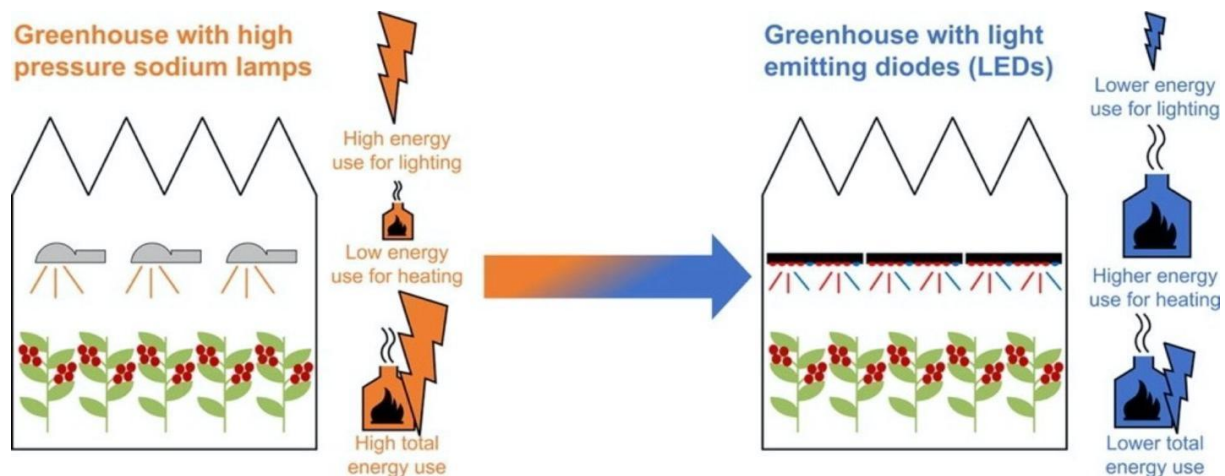


5. ábra A HPS és különböző színű- (kék/vörös: RB; ultraibolya: UV; közeli vörös: FR), valamint a kompakt fehér (WL) LED fényforrások sugárzási spektrumai a fotoszintetikusan aktív tartományhoz (PAR) viszonyítva

A fény hullámhossza és intenzitása erősen befolyásolja a növények élettevékenységét és produktivitását. A LED lámpákkal a növények életszakaszaihoz igazítva mindig az optimális spektrális összetételű és mennyiségű fényt tudjuk biztosítani. Kísérletek igazolták, hogy a legtöbb növénynél a kék fénytartomány a vegetatív növekedést serkenti, a piros fény a generatív folyamatokat stimulálja, a távoli vörös pedig alkalmas a virágzás indukálására (34). A levélzöldségek termesztésénél nagyon fontos, hogy elkerüljük a nitrátfelhalmozódást a növények szervezetében, optimális fény spektrummal ez is megoldható. Spenóttal folytatott kísérletekben, különböző fényen nevelve eltérő volt a növények szárhossza, levélfelülete, biomassa termelése és a beltartalmi összetevőik is. A távoli vörös fény például növelte a levelek vastartalmát (35).

Egy HPS, LED összehasonlítási kísérletből kiderült, hogy a HPS-el világított üvegházak esetében a felhasznált energia aránya jelentősen (45% és 85% között) változott a különböző éghajlati viszonyok között (5. ábra). A LED-ekre való átállással megjósolt energiamegtakarítás a teljes energiafelhasználás 10–25%-a volt; a kültéri klíma volt a legfontosabb tényező, amely meghatározta, hogy mennyi energiát lehet megtakarítani. Megállapították, hogy a növények transzspirációja magasabb a HPS lámpák alatt, ami nagyobb energiavesztéssel eredményez és megnövekedett a szellőztetés révén történő páramentesítés szükségessége. A LED-es üvegházak nagyobb hőigénye leginkább télen jelentkezett, amikor a HPS-el világított üvegházakban a lámpák

hőtübblete csökkentette a fűtési rendszer terhelését. Nyáron mind a HPS, mind a LED üvegházak fűtési igénye alacsony volt, a HPS üvegházak pedig nagyobb szellőzést igényeltek (36).



5. 6. ábra Nagynyomású nátriumgőz lámpa (HPS) és a világító dióda (LED) felső világítások összehasonlítása

Hasonló következtetésre jutottak a kutatók hajtattott uborkában összehasonlítva a HPS és a LED lámpákat. Ősszel és tavasszal a LED lámpák alacsonyabb hőterhelése magasabb CO₂ koncentrációt tesz lehetővé az alacsonyabb szellőztetés igény miatt, de nyáron a hőterhelés csökkenése nem elég nagy ahhoz, hogy jelentősen befolyásolja a CO₂ koncentrációt. Az északi szélesség 60° foka felett a LED-ek sugárzási intenzitását 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ fölé kell emelni, hogy le tudják váltani a PS lámpákat (37).

5. Felhasznált irodalom

1. Nagy L, Magyar M. No alternatives to photosynthesis: From molecules to nanostructures. In: Jeschke P, Starikov EB, editors. *Agricultural Biocatalysis: Theoretical Studies and Photosynthesis Aspects* [Internet]. Jenny Stanford Publishing; 2022. p. 211–47. Available from: <https://www.taylorfrancis.com/chapters/edit/10.1201/9781003313076-7/alternatives-photosynthesis-molecules-nanostructures-lászló-nagy-melinda-magyar>
2. Wang L, Yu J. Chapter 1 - Principles of photocatalysis. In: Yu J, Zhang L, Wang L, Zhu BBT-IS and T, editors. *S-scheme Heterojunction Photocatalysts: Fundamentals and Applications* [Internet]. Elsevier; 2023. p. 1–52. Available from: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9780443187865000020>
3. Akitsu TK, Nasahara KN, Ijima O, Hirose Y, Ide R, Takagi K, et al. The variability and seasonality in the ratio of photosynthetically active radiation to solar radiation: A simple empirical model of the ratio. *Int J Appl Earth Obs Geoinf*. 2022;108:102724.
4. Sarlikioti V, Meinen E, Marcelis LFM. Crop Reflectance as a tool for the online monitoring of LAI and PAR interception in two different greenhouse Crops. *Biosyst Eng* [Internet]. 2011;108(2):114–20. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2010.11.004>
5. Björn LO, Shevela D, Govindjee G. What Is Photosynthesis? - A Broader and Inclusive View. In: Dalal VK, Misra AN, editors. *A Closer Look at Photosynthesis*. Nova Science Publisher, Inc.; 2023. p. 1–43.
6. Gavhane KP, Hasan M, Singh DK, Kumar SN, Sahoo RN, Alam W. Determination of optimal daily light integral (DLI) for indoor cultivation of iceberg lettuce in an indigenous vertical hydroponic system. *Sci Rep* [Internet]. 2023;13(10923):1–15. Available from: <https://doi.org/10.1038/s41598-023-36997-2>
7. Matsuda R, Ozawa N, Fujiwara K. Leaf photosynthesis, plant growth, and carbohydrate accumulation of tomato under different photoperiods and diurnal temperature differences. *Sci Hortic (Amsterdam)* [Internet]. 2014;170:150–8. Available from: <http://dx.doi.org/10.1016/j.scienta.2014.03.014>
8. Lanoue J, Little C, Hao X. The Power of Far-Red Light at Night: Photomorphogenic, Physiological, and Yield Response in Pepper During Dynamic 24 Hour Lighting. *Front Plant Sci*. 2022;13:857616.
9. Mitchell CA, Both A-J, Bourget MC, Burr JF, Kubota C, Lopez RG, et al. LEDs: The Future of Greenhouse Lighting! *Chron Hortic* [Internet]. 2012;52(1):6–12. Available from: <http://leds.hrt.msu.edu/>.
10. Weller JL, Kendrick RE. Photomorphogenesis and Photoperiodism in Plants. In: Björn LO, editor. *Photobiology: The Science of Light and Life*. Springer Science and Business Media New York; 2015. p. 299–321.
11. Boucher L, Eaves J, Brégar A, Pepin S, Dorais M. New lighting strategy for indoor leafy greens by segmenting the photoperiod and replacing the dark period by their light compensation point. *Acta Hortic*. 2022;1337:107–15.
12. Marcelis LFM, Broekhuijsen AGM, Meinen E, Nijs EMFM, Raaphorst MGM. Quantification of the growth response to light quantity of greenhouse grown crops. *Acta Hortic*. 2006;711:97–103.
13. Wong CE, Teo ZWN, Shen L, Yu H. Seeing the lights for leafy greens in indoor vertical farming. *Trends Food Sci Technol* [Internet]. 2020;106:48–63. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.tifs.2020.09.031>

14. McCree KJ. The action spectrum, absorptance and quantum yield of photosynthesis in crop plants. *Agric Meteorol.* 1971;9:191–216.
15. Liu J, van Iersel MW. Photosynthetic Physiology of Blue, Green, and Red Light: Light Intensity Effects and Underlying Mechanisms. *Front Plant Sci.* 2021;12:619987.
16. Baroli I, Price GD, Badger MR, Von Caemmerer S. The contribution of photosynthesis to the red light response of stomatal conductance. *Plant Physiol.* 2008;146(2):737–47.
17. Hogewoning SW, Trouwborst G, Maljaars H, Poorter H, van Ieperen W, Harbinson J. Blue light dose-responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *J Exp Bot.* 2010;61(11):3107–17.
18. Swartz TE, Corchnoy SB, Christie JM, Lewis JW, Szundi I, Briggs WR, et al. The Photocycle of a Flavin-binding Domain of the Blue Light Photoreceptor Phototropin. *J Biol Chem [Internet].* 2001;276(39):36493–500. Available from: <http://dx.doi.org/10.1074/jbc.M103114200>
19. Zhang X, Bisbis M, Heuvelink E, Jiang, WeijieMarcelis LFM. Green light reduces elongation when partially replacing sole blue light independently from cryptochrome 1a. *Physiol Plant.* 2021;173(4):1946–55.
20. Darkó É, Heydarizadeh P, Schoefs B, Sabzalian MR. Photosynthesis under artificial light: The shift in primary and secondary metabolism. *Philos Trans R Soc B Biol Sci.* 2014;369(1640):1–7.
21. Davis PA, Burns C. Photobiology in protected horticulture. *Food Energy Secur.* 2016;5(4):223–38.
22. Naznin MT, Lefsrud MG. An Overview of LED Lighting and Spectral Quality on Plant Photosynthesis. In: Dutta Gupta S, editor. *Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting.* Springer Nature Singapore Pte Ltd.; 2017. p. 101–11.
23. Zabel P, Bamsey M, Schubert D, Tajmar M. Review and analysis of over 40 years of space plant growth systems. *Life Sci Sp Res.* 2016;10:1–16.
24. Ivanova TN, Kostov PT, Sapunova SM, Dandolov IW, Salisbury FB, Bingham GE, et al. Six-month space greenhouse experiments - A step to creation of future biological life support systems. *Acta Astronaut.* 1998;42(1–8):11–23.
25. Dieleman JA, de Visser PHB, Vermeulen PCM. Reducing the carbon footprint of greenhouse grown crops: Re-designing LED-based production systems. In: *Acta Horticulturae.* International Society for Horticultural Science; 2016. p. 395–402.
26. Eliseeva LG, Othman AJ, Belkin YD, Molodkina PG. Biotechnological optimization for the production, quality, and safety of vegetables grown in urban-type phytotrons. In: *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science.* 2022. p. 1–8.
27. Fujiwara K. Light Sources. In: Kozai T, Niu G, Takagaki M, editors. *Plant Factory An Indoor Vertical Farming System for Efficient Quality Food Production.* Academic Press; 2020. p. 139–51.
28. Gómez C, Izzo LG. Increasing efficiency of crop production with LEDs. *AIMS Agric Food.* 2018;3(2):135–53.
29. Kowalczyk K, Gajc-Wolska J, Metera A, Mazur K, Radzanowska J, Szatkowski M. Effect of Supplementary Lighting on the Quality of Tomato Fruit (*Solanum lycopersicum* L.) in Autumn-Winter Cultivation. *Acta Hortic.* 2012;956:395–402.

30. Dzakovich MP, Ferruzzi MG, Mitchell CA. Manipulating Sensory and Phytochemical Profiles of Greenhouse Tomatoes Using Environmentally Relevant Doses of Ultraviolet Radiation. *J Agric Food Chem*. 2016;64(36):6801–8.
31. de Gelder A, Dieleman JA, Bot GPA, Marcelis LFM. An overview of climate and crop yield in closed greenhouses. *J Hortic Sci Biotechnol*. 2012;87(3):193–202.
32. Foyo-Moreno I, Alados I, Alados-Arboledas L. A new empirical model to estimate hourly diffuse photosynthetic photon flux density. *Atmos Res*. 2018;203(November 2017):189–96.
33. Baxevanou C, Fidaros D, Bartzanas T, Kittas C. Yearly numerical evaluation of greenhouse cover materials. *Comput Electron Agric* [Internet]. 2018;149(December 2017):54–70. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2017.12.006>
34. Yorio NC, Goins GD, Kagie HR, Wheeler RM, Sager JC. Improving Spinach, Radish, and Lettuce Growth under Red Light-emitting Diodes (LEDs) with Blue Light Supplementation. *HortScience* [Internet]. 2001;36(2):380–3. Available from: <http://hortsci.ashspublications.org/content/36/2/380.short>
35. Utasi L, Monostori I, Végh B, Pék Z, Darkó É. Effects of light intensity and spectral composition on the growth and metabolism of spinach (*Spinacia oleracea* L.). *Acta Biol Plant Agriensis*. 2019;7:3–18.
36. Katzin D, Marcelis LFM, van Mourik S. Energy savings in greenhouses by transition from high-pressure sodium to LED lighting. *Appl Energy* [Internet]. 2021;281(July 2020):116019. Available from: <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2020.116019>
37. Kaukoranta T, Särkkä LE, Jokinen K. Energy efficiency of greenhouse cucumber production under LED and HPS lighting. *Acta Hortic*. 2017;1170:967–72