

Horticulture 4.0

Интелигентни заштићени простори
у стручном образовању у области хортикултуре

Интелигентне технологије заштићених простора ДИГИТАЛИЗАЦИЈА ВЕШТАЧКОГ ОСВЕТЉЕЊА У СТАКЛЕНИЦИМА

Horticulture 4.0 - Интелигентни заштићени простори
у стручном образовању у области хортикултуре пројект

Издаје Хортикултура 4.0 консорцијум: Публикација је под лиценцом CC BY-NC 4.0



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



Sufinansira
Evropska unija

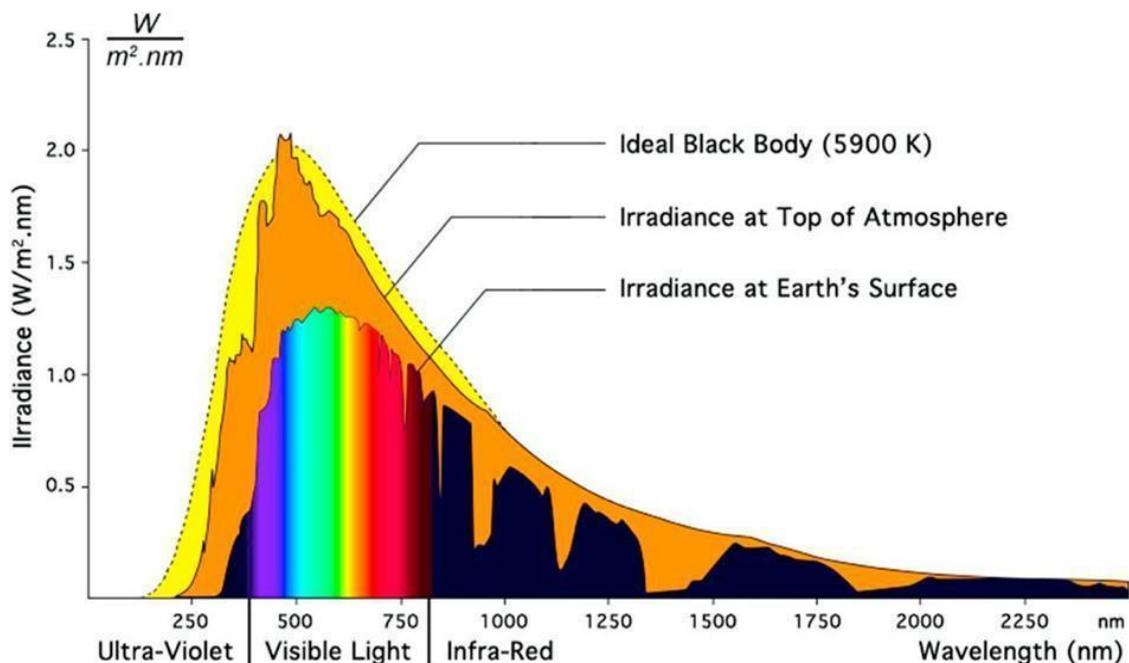
С финансијском подршком Европске уније. Мишљења и тврдње изнете у овом материјалу представљају ставове аутора/аутора и не одражавају нужно званичне ставове Европске уније или Европске извршне агенције за образовање и културу (EACEA). Ни Европска унија, ни EACEA не могу се сматрати одговорним за њих.

ДИГИТАЛИЗАЦИЈА ВЕШТАЧКОГ ОСВЕТЉЕЊА У СТАКЛЕНИЦИМА

Аутор: Пек Золтан - Мађарски универзитет за пољопривредне и животне науке (ориг. Magyar Agrár- és Élettudományi Egyetem)

1. УЛОГА СВЕТЛОСТИ У ЖИВОТУ БИЉАКА

Светлост називамо део електромагнетног зрачења видљивог (visible, VIS) таласне дужине који је видљив људском оку (400–780 nm), чији су истакнути спектри: 400–420 nm – љубичаста; 420–490 nm – плава; 490–540 nm – зелена; 540–640 nm – жута; 640–780 nm – црвена. Исти тај опсег има активну улогу у фотосинтези биљака. **Фотосинтеза** је биохемијски процес у којем организми користе енергију сунчеве светлости да би из неорганских материја створили органске материје (1). Испитујући интензитет сунчевог зрачења који стиже до земље по таласној дужини, утврђено је да је у овом видљивом опсегу зрачење најинтензивније (2). Дакле, биљке су се развиле тако да могу искористити најинтензивније зрачење (Слика 1). Ово се назива фотосинтетички активно зрачење (Photosynthetically Active Radiation - **PAR**).



Слика 1. Целокупан спектар сунчевог зрачења на површини Земље и на врху атмосфере (2)

Из спектра зрачење енергије Сунца, око 40-48% чини фотосинтетички активно зрачење, које зависи од карактеристика атмосфере (облачност, релативна влажност, загађење ваздуха) и географске локације (географска ширина). Преосталих око 52-60% зрачење енергије углавном је дуготаласно топлотно зрачење у инфрацрвеном опсегу (IR). Поред тога, ултравиолетно зрачење (UV) такође има биолошку активност (3).

Орган биљака који се развио за искоришћавање светлости је лист, чија величина и положај одређују колико светлосног зрачења могу апсорбовати. Величина листа се изражава површином листа (leaf area - LA). Биљка у оптималним условима може искористити више светлости што је већа површина њених листова. Међутим, у биљном склопу, повећање површине листа повећава искоришћавање светлости само до одређене границе, јер прекомерно међусобно сенчење биљака смањује апсорпцију светлости. У биљном склопу, површину листа треба одредити не само у апсолутним вредностима, већ и у односу на простор за раст (At). Овај однос назива се индекс површине листа ($LAI=LA\ At^{-1}$). У зависности

од врсте биљке, повећање индекса површине листа повећава искоришћавање светлости само до одређене границе, након чега се јавља само сенчење, односно доњи листови не добијају довољно светлости за фотосинтезу (4).

Различите биљне врсте имају различите потребе за светлошћу. Приликом испитивања потребе за светлошћу, поред количине осветљења, треба узети у обзир и трајање светлосног дејства на биљке. Врсте које захтевају више светлости укључују: парадајз, паприку, лубеницу и дињу. Средње захтевне врсте су: купус, кељ, пасуљ, цвекла и лук. У сенку толерантне врсте су: целер, шаргарепа и рабарбара. Данас је за већину узгајаних врста поврћа позната потреба за светлошћу, коју изражава DLI (Daily Light Integral), количина фотона која доспе на одређену површину у току једног дана (дневни интеграл светлости), са мерном јединицом $\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, која се може израчунати из података савремених сензора за мерење светлости ($\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$) (5). На пример, за узгој светлосно захтевних биљака као што су паприка или парадајз, потребно је минимум $22 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$, док за мање захтевну ледну салату потребно је $11.5 \text{ mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$ (6–9).

Реакције биљака на однос времена проведеног у светлости и у тами називају се фотопериодизам. Развојне карактеристике које су под утицајем фотопериодичне регулације укључују цветање, стање мировања пупољака и старење листова. Са овог аспекта могу се разликовати три групе (10):

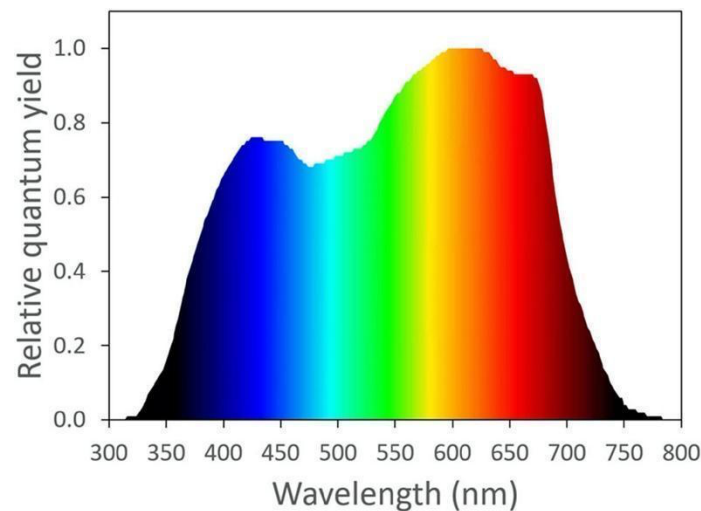
1. Биљке кратког дана формирају цветне пупољке када је дневни фотопериодус највише 12 сати. Дужи фотопериоди спречавају или потпуно заустављају формирање цветова. Од гајених биљака, у ову групу спадају: соја и слатки кромпир.
2. Биљке дугог дана формирају цветне пупољке када је дневни фотопериодус најмање 9-14 сати, али што је фотопериодус дужи од критичне вредности, формирање цветова је брже. Овде спадају: грашак, спанаћ, ротквица и кинески купус.
3. Биљке које су неутралне према дужини дана развијају се независно од дужине дана и називају се афотопериодичне биљке. Неки сорти биљака могу бити краткодневне, док су друге сорти истих биљака дугодневне. Такве су: салата и парадајз.

Ове групе се могу наћи унутар истих биљних врста, па је при избору сорте неопходно знати која сорта је погодна за одређени период узгоја или дужину осветљења (11).

Осветљење је први фактор околине који утиче на раст и развој биљака. Узгој у затвореним просторима у великој мери зависи од квалитета светлости. Природна светлост је најважнија у стакленичкој производњи. У умереном појасу, количина природне светлости која је оптимална за дугокултурни узгој биљака је присутна само кратко време, а та светлост је најважнија за асимилацију, процес изградње биљака. Према такозваном 1%-ном правилу, које су формулисали холандски истраживачи, 1% више зрачења обично резултира 1% већим приносом (12). Због тога се развој опреме углавном усмерава на боље коришћење светлости, при чему је само један од кључних фактора материјал покривача (види модул 3, табела 1).

Пошто је одговор биљака на светлост, фотоморфогенеза, у великој мери зависан од генотипа и фазе развоја, потребно је одредити потребе за осветљењем у различитим фазама развоја како би се постигли максимални приноси различитих сорти (13). Фотосинтетичку ефикасност

различитих спектра испитивало је много научника, а једна од најпризнатијих је McCree-ова крива (14).



Слика 2. Нормализовани спектар ефекта максималног квантног приноса асимилације CO₂ у уским таласним опсезима од ултравиолетног зрачења до таласне дужине далеке црвене светлости (15)

Биљне врсте, па чак и сорте, различито реагују на осветљење различитих спектра, али истраживања се слажу да је црвена светлост важна за фотосинтетички апарат и утиче на транспорт асимилата (16).

Плава светлост има утицај на развој хлоропласта, формирање хлорофила и састав биљака у фотосинтези, али одговор биљака у великој мери зависи од дозе плаве светлости (17).

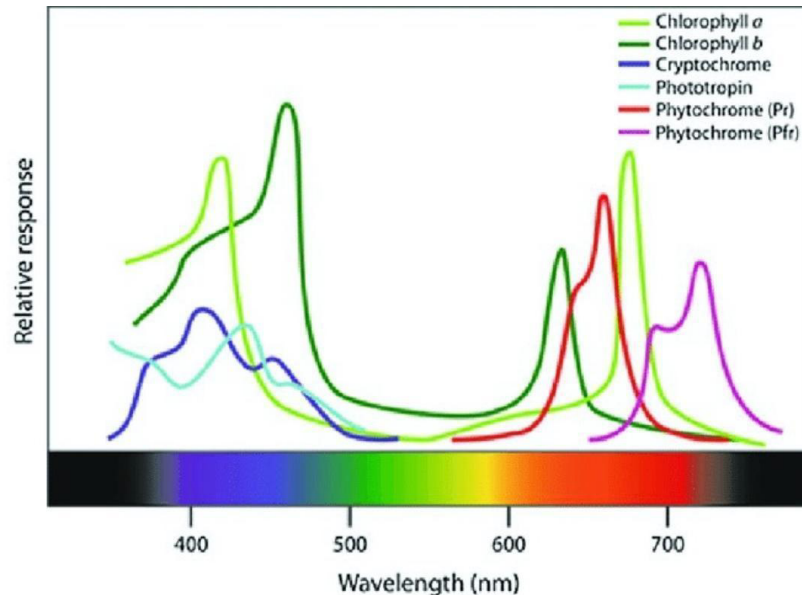
Утицај зелене светлости је сличан оном плаве, учествује у фотосинтези преко фитохрома и криптохрома (18). Прекомерна изложеност црвеној светлости може довести до тзв. „синдрома црвене светлости“, који се манифестује лошом морфологијом микро-зеленила и погрешном експресијом гена (18,19). Комбинација црвене светлости и других извора светлости, посебно плаве светлости, може ефикасно регулисати отварање стома и побољшати усвајање угљен-диоксида код биљака, чиме се спречава појава „синдрома црвене светлости“ (20,21).

Поред фотосинтезе, светлост утиче на друге биљне процесе, као што је **фотоморфогенеза**, која обухвата раст и развојне одговоре биљака на светлост. Фотоморфогенетика описује одговоре на раст и развој изазване светлосћу који нису нужно директно повезани са фотосинтезом. У овом случају, светлост служи као сигнал који активира фоторецепторе биљака, утичући на њихов раст, цветање, развој корена и друге развојне процесе.

Ови фоторецептори су део сложених мрежа за пренос сигнала које утичу на експресију гена и развој биљака. Кроз перцепцију врста светлости, интензитета и периода изложености, биљке се прилагођавају условима околине, оптимизују фотосинтетичку активност и раст, и развијају стратегије потребне за преживљавање.

Улога појединих фоторецептора и путеви преноса сигнала које посредују још увек су предмет активних истраживања, а ово научно поље се динамично развија. Фоторецептори укључују (22): Фитохроме који су одговорни за перцепцију црвене (660 nm) и далеке црвене светлости (730 nm). Имају две форме, Pr (апсорбује црвену светлост) и Pfr (апсорбује далеку црвену светлост). Регулишу раст, цветање, клијање и друге развојне процесе биљака. Кристохроми перципирају UV-A и плави спектар светлости (око 320-500 nm). Учествују у регулацији

циркадијанских ритмова биљака, временском одређивању цветања и расту изданака. Под утицајем UV светлости, између чворова биљака смањује се растојање. Фототропини су посебно осетљиви на плаву светлост (око 400-500 nm). Имају кључну улогу у фототропизму, механизму нагињања биљака ка светлости, и регулишу кретање отвора, као што је отварање и затварање стома. UV-B фоторецептори перципирају UV-B светлост (280-320 nm). Регулишу одбрамбене одговоре, као што је заштита од UV-B зрачења, и могу утицати на раст и морфологију биљака.



Слика 3. Релативне апсорпционе криве молекула који апсорбују светлост у зависности од таласне дужине

2. Вештачко осветљење

Испитивање биљака гајених под вештачким осветљењем започело је пре око 150 година, а 1971. године истраживања у овој области добила су велики подстицај захваљујући свемирским истраживањима (23). Извори светлости су у почетку били флуоресцентне лампе различитог интензитета и спектра светлости, лампе високог притиска са натријумовим гасом (high pressure sodium, HPS) (24), а од 90-их година коришћене су диоде које емитују светлост (Light Emitting Diode, LED) (25). Због високих трошкова вештачког осветљења, економски је исплативо само за релативно мали број врста поврћа. У умереним појасевима, вештачко осветљење се углавном користи за производњу расадног поврћа, као и у неким уређајима за производњу украсног и зачинског биља. У последњих неколико година, вештачко осветљење је уведено и у производњу парадајза у пластеницима, што је омогућило бербу у јануару и фебруару. Потреба за смањењем зрачења је мала у умереним појасевима.

3. Типови вештачких извора светлости

Последњих година све више се користи вештачко додатно осветљење у стакленицима. Код неких украсних биљака ово је раније било неопходно, али данас се користи и код повртарских култура за производњу хране. Вертикалне фарме уопште не користе природну светлост, већ искључиво изворе светлости засноване на електричној енергији. Овај начин производње биљака раније се користио у такозваним фитотронским коморама, искључиво у истраживачке сврхе (26).

Извори светлости који се користе за узгој биљака су следећи: Флуоресцентне цеви: Традиционалне флуоресцентне цеви, као што су T5, T8 и T12 цеви, и даље су популарне, посебно за раст младих садница и малих биљака. Ови извори светлости су одлични за равномерну расподелу светлости на већим површинама. Компактне флуоресцентне лампе (CFL) и лампе високог притиска са натријумом (HPS): Ови типови лампи нуде дужи век трајања и бољу искоришћеност светлости, али производе више топлоте, што захтева контролу температуре. LED осветљење: LED (Light Emitting Diode) лампе постају све популарније у биљној производњи јер су енергетски ефикасне, дуготрајне и омогућавају контролу светлосног спектра. Различите боје LED-а, као што су црвена и плава, посебно су корисне за одређене фазе раста биљака. Следећа табела упоређује предности и недостатке вештачких извора светлости (27).

Табела 1. Предности и мане вештачких извора светлости

Тип извора светлости	Предности	Мане
Флуоресцентне цеви (T5, T8, итд.)	Равномерна расподела светлости, нижи почетни трошкови, мање стварање топлоте	Већа потрошња енергије, потребна је чешћа замена у поређењу са LED лампама
Компактне флуоресцентне лампе (CFL)	Енергетска ефикасност, лако доступне и једноставне за инсталацију	Потребно је управљање топлотом, није идеално за велике површине
Лампе високог притиска са натријумом (HPS)	Висок интензитет светлости, добра подршка за цветање	Високо стварање топлоте, спектар није избалансиран
Металхалогене лампе (MH)	Добра подршка за вегетативни раст, широк спектар	Одликује се великим стварањем топлоте; потребна је честа замена; мање енергетски ефикасно од LED или CFL лампи
LED	Ниска потрошња енергије, дуг век трајања, мало стварање топлоте, могућност регулисања спектра	Виши почетни трошкови; у одређеним случајевима ограничен интензитет светлости

LED базирани извори светлости су, захваљујући својој бољој трошковној ефикасности (25,28,29), дали велики подстицај узгоју биљака под вештачким осветљењем у последњој деценији (30). Њиховом употребом омогућено је гајење биљака у периодима и на местима где то раније није било могуће, што је посебно важно за биљке као што су листнато поврће доступно током целе године (25,31).

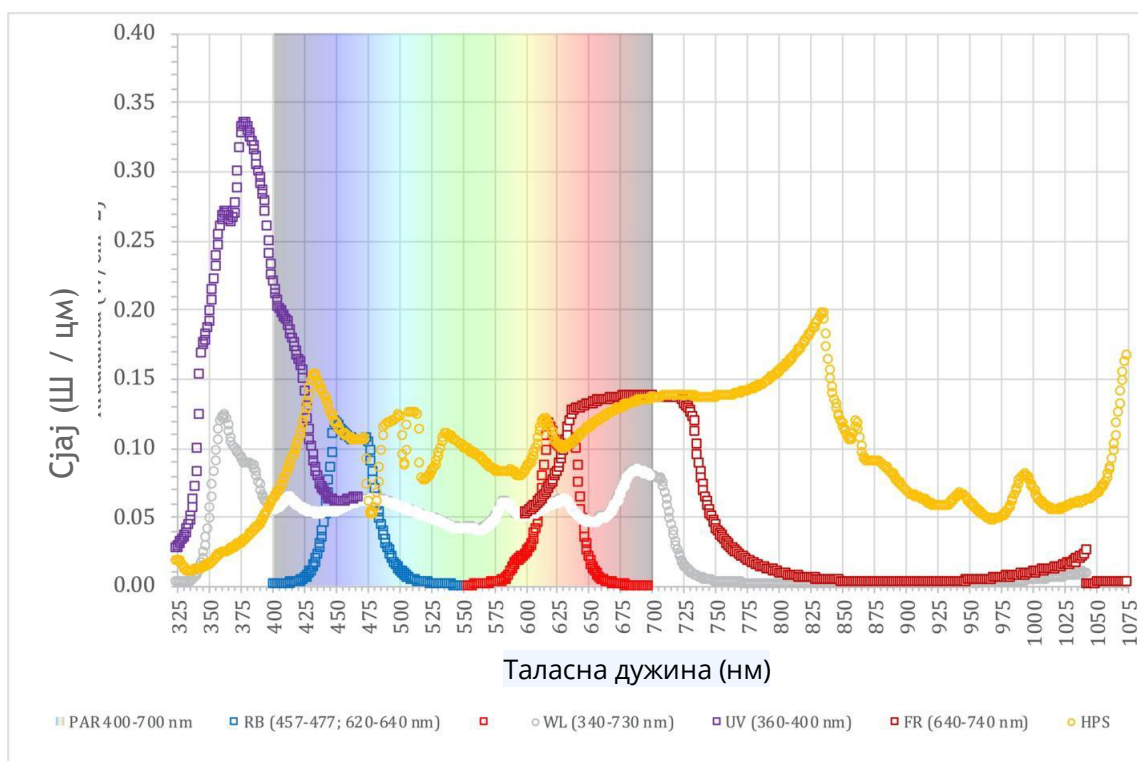




Слика 4. Лампа са натријумовим гасом под високом притиском (HPS), HPS са допунским LED осветљењем (interlight), горње LED осветљење

4. Поређење HPS и LED извора светлости

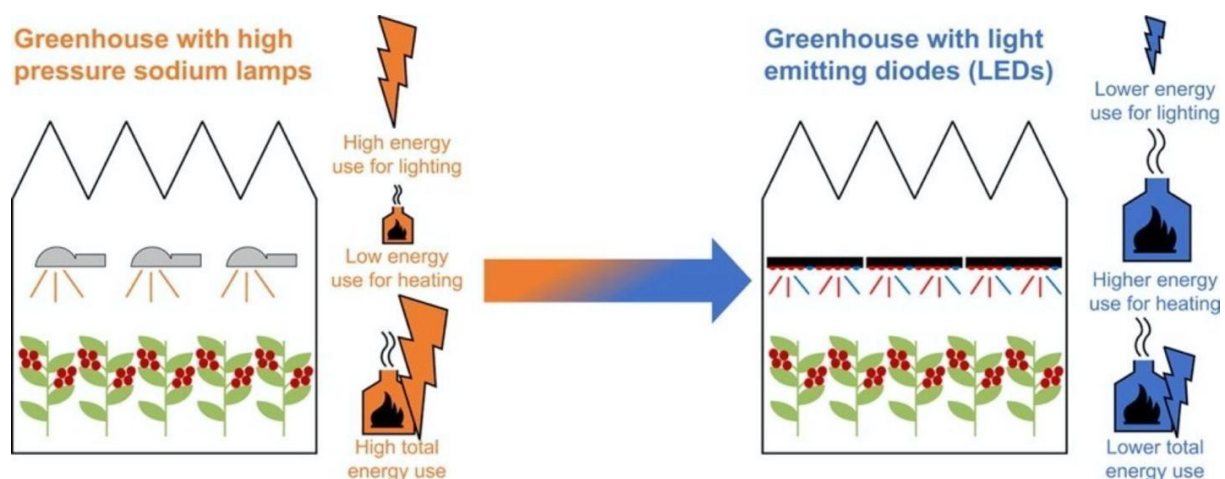
Један од основних услова за ефикасно функционисање савремених стакленика је обезбеђивање одговарајућег и енергетски ефикасног вештачког (додатног) осветљења. Последњих година истраживање и развој у овој области значајно су напредовали. За биљке није од значаја укупна количина светлости која стиже, већ је значајније фотосинтетички активно зрачење (PAR) (32). Фотосинтетички пигменти биљака из видљивог спектра најбоље искоришћавају зрачење таласне дужине око 450 и 660 nm. Поред тога, они могу да перципирају и спектре светлости који нису видљиви људском оку (33). Пошто се у LED изворима светлости може прецизно контролисати спектар емитоване светлости, они пружају ефикасније могућности за повећање биљних перформанси у односу на друге изворе светлости. У стакленицима који су раније користили HPS или друге вештачке изворе светлости, лампе се такође постепено замењују модернијим LED изворима светлости.



Слика 5. Спектри зрачења HPS и различитих боја LED извора светлости (плава/црвена: RB; ултраљубичаста: UV; блиска црвена: FR), као и компактног белог (WL) у поређењу са фотосинтетички активним опсегом (PAR)

Таласна дужина и интензитет светлости снажно утичу на животне активности и продуктивност биљака. Са LED лампама можемо обезбедити увек оптималан спектрални састав и количину светлости прилагођену животним фазама биљака. Експерименти су показали да већина биљака реагује на плави спектар светлости подстичући вегетативни раст, црвена светлост стимулише генеративне процесе, док је далека црвена светлост погодна за индукцију цветања (34). Код узгоја листнатог поврћа веома је важно избегавати акумулацију нитрата у биљкама, што се може решити оптималним светлосним спектром. У експериментима са спанаћем, узгајаним под различитим светлостима, примећене су разлике у дужини стабљике, површини листа, производњи биомасе и нутритивним састојцима биљака. На пример, далека црвена светлост повећала је садржај гвожђа у листовима (35).

У једном поређењу HPS и LED светлосних извора утврђено је да је у стакленицима са HPS осветљењем удео коришћене енергије значајно варирао (од 45% до 85%) у зависности од различитих климатских услова (Слика 5). Прелазак на LED осветљење предвиђа уштеду енергије од 10-25% укупне потрошње енергије; спољашња клима је била најважнији фактор који је одређивао колико енергије се може уштедети. Установљено је да је транспирација биљака већа под HPS лампама, што је резултирало већим губицима енергије и повећаном потребом за одvlaживањем путем вентилације. Повећана потреба за грејањем у LED стакленицима највише се јављала зими, када је вишак топлоте из HPS лампи смањивао оптерећење грејног система. Лети је потреба за грејањем била ниска у оба типа стакленика, док су HPS стакленици захтевали већу вентилацију (36).



Слика 5. и 6. Поређење лампи са натријумовим гасом под високим притиском (HPS) и горњих осветљења са светлећим диодама (LED)

Сличан закључак донели су истраживачи код узгоја краставаца у стакленицима приликом поређења HPS и LED лампи. У јесен и пролеће, нижа топлотна оптерећења LED лампи омогућавају већу концентрацију CO₂ због мање потребе за вентилацијом, али током лета смањење топлотног оптерећења није довољно велико да значајно утиче на концентрацију CO₂. На географским ширинама северно од 60° интензитет зрачења LED лампи треба повећати изнад 300 $\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ да би се могли заменити HPS лампама (37).

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.ashspublishations.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