

Összehasonlító tanulmány a nem szabadtéri növénytermesztéshez használt LED vezérlésekről és visszajelző rendszerekről

Csaba Kárász, József Kopják

Óbuda University/Kandó Kálmán Faculty of Electrical Engineering, 94-96 Bécsi Street, 1431, Budapest, Hungary
karaszcsaba@gmail.com, kopjak.jozsef@kvk.uni-obuda.hu

Abstract: A szabályozott környezetű (zárt láncú) technológia egyre gyakrabban alkalmazott a mezőgazdasági szektorban, hogy egész éves ellátást lehessen biztosítani a szükséges növényekből (gyümölcsök, zöldségek, alternatív energia előállítására használt növények (fotobioreaktor). A fény az egyik legfontosabb faktor a növények termesztésében (a tápanyagok mellett), ami a növények fejlődését erősen befolyásolja (pl.: növény gyárakban). A tanulmány célja, hogy információval szolgáljon a villamosmérnökök számára azzal kapcsolatban, hogy milyen LED vezérlések találhatóak a gyakorlatban és ezek szabályzásához milyen szenzorokat-apparátust használnak, hogy a különböző növények termesztésének jellemzőit szabályozzák. A tanulmányban található információgyűjtés részeként 13 kísérlet eredményei lettek kiértékelve, hogy kiderüljön 6 különböző növény fényforrásának optimális meghajtása. Elsősorban a fényforrások folytonos és nem folytonos fényű üzemmódjának hatásai – továbbá a fény hullámhosszának beállítására vonatkozó információk lettek kiértékelve. A tanulmányokból kiderült, hogy a megfelelően beállított fényforrás nem folytonos fénye a hatékonyabb: jobb eredményeket hoz a növénytermesztés tekintetében, mint a folytonos fény.

Keywords: LED lamps, LED dimming, Photodiodes, Current control, Energy efficiency, DC-DC, power converter, AC-AC converters, Pulse Width Modulation, PWM, Duty cycle, Photosynthesis, Photoreceptor, Photon Flux Density, PFD, Növénytermesztés, Kitöltési tényező, Fényáram sűrűség, LED tápegység, LED meghajtás

1. Bevezetés

Többféle fényforrást alkalmaznak napjainkban a növények termesztésére. A leggyakrabban alkalmazott fényforrás típusok a fémhalogén (MH), nagynyomású nátriumgőz lámpa (HPS), alacsony nyomású nátriumgőz lámpa (LPS), világító dióda (LED) és a ritkábban használt lézer dióda. A hagyományos, izzószálas világítást manapság nem, vagy nagyon ritkán használják nem kedvező paraméterei miatt növénytermesztési célokra [31]. Ezek a fényforrások több paraméterükben eltérnek egymástól, úgy mint a: kontrollálhatóság (flexibilitás és /vagy válaszidő), színspektrum és a hatékonyság.

A LED / félvezető világítástechnológia (Solid State Lighting - SSL) rendkívül gyorsan fejlődik – és a legújabb fejlesztéseknek köszönhetően az egyik legideálisabb megoldást nyújtja a zárt láncú rendszerben kialakított, rendkívül jól kontrollálható fényforrásra (smart lighting).

Fénykibocsátásuk spektruma egy viszonylag szűk sávra korlátozódik; e miatt pedig könnyen tervezhetővé – megvalósíthatóvá válik a kívánt színspektrumú, intenzitású és folytonosságú (kitöltési tényezőjű) fény előállítása.

Az elektronikai háttér című részben a LED szerkezet és működésének tanulmányozása, valamint meghajtása és a fény/fényerősség szabályozása, a szenzorok használata lett részletezve. A biológiai háttér című részben a növények fényre adott reakciója lett megvizsgálva annak érdekében, hogy a legfontosabb faktorok kerülhessenek előtérbe a világítás megtervezésekor. Az eredmények szekció a feldolgozott tanulmányok / cikkek eredményeit összegzi a felhalmozott információ alapján, valamint a befejezésben a tanulmány lezárásaként az elkészítés körülményeiről illetve a jövőbeni kutatási célokról esik szó.

2. Elektronikai háttér

A világító dióda az egyik legalapvetőbb félvezető alkatrészre vezethető vissza, a p-n átmenet legegyszerűbb példájához: a diódához. A két alapanyag egy kiürített réteget hoz létre, aminek mérete a félvezető átmenetre kapcsolt feszültség polaritásától (is) függ. Nyitó irányú kapcsolásban a dióda vezeti az áramot (ellenállása elhanyagolható) s ugyanebben az üzemmódban a LED-ek rekombinációs folyamatainál elektrolumineszcencia lép fel: fény keletkezik. Az alapanyag a kívánt sáv szélességű fényt tekintetében kiválasztva [10][15], de e mellett a legújabb technológiák (a kvantum pont (QD) LED és a szerves (szén alapú) LED (OLED)) a fénykinyerés és a fény minőségének tekintetében is többet nyújtanak.

Fontos, hogy a félvezető átmenetnél mekkora hő keletkezik (s hogy a környezet hogyan befolyásolja azt) működés közben, mivel ez jelentősen befolyásolhatja a nyitóirányú feszültség értékét, az élettartamot, a kvantum hatékonyságot és legfőképpen az emittált fény spektrumát is.

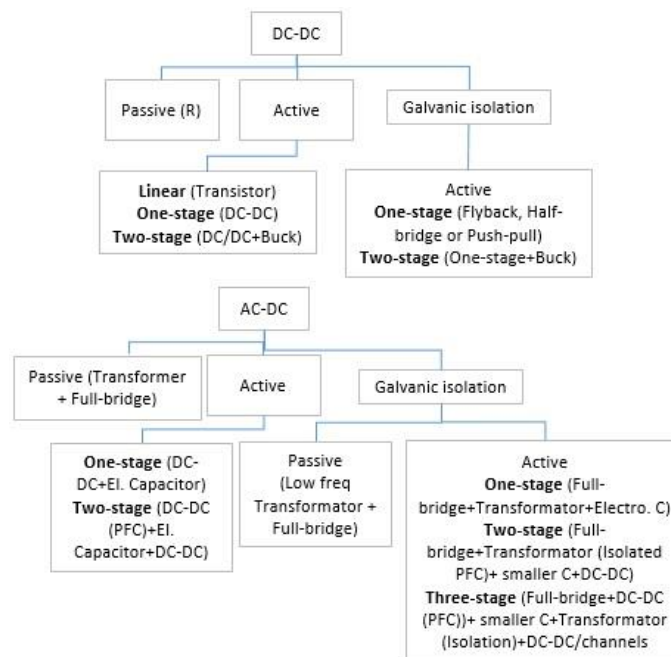
A LED-ek a diódához hasonló vezérelhető kulcs karakterisztikákkal rendelkeznek: nyitóirányú feszültség (V); nyitóirányú áram (mA); megvilágított terület (mm²); fényáram (radiometrikus teljesítmény (mW)); emittált fény sáv szélessége (nm); látószög (°); hőmérsékleti együttható (nm/°C).

A LED meghajtásoknál a legfontosabb kihívás, hogy a működési paramétereket (úgy mint nyitó irányú feszültség – nyitó irányú áram, félvezető átmenet hőmérséklet, színhőmérséklet/színspektrum) a megfelelő értékek szintjén tartsuk, amivel a működés körülményei mellett az optimális hatásfokot is biztosítjuk.

A tápegység lehet AC vagy DC meghajtású. A tervezési folyamat során az alapvető cél, hogy a nyitóirányú áramot korlátozzuk, mivel megfelelő méretű nyitóirányú feszültség hatására a LED ellenállása drasztikusan lecsökken. Ezt a nyitóirányú áram korlátozást el lehet érni visszacsatolással – aktív áramkörü topológiával vagy a nélkül - passzív topológiával, AC meghajtás esetén pedig galvanikus leválasztással megvalósított eszközökkel is. Az aktív topológiák opcionálisan több szinten is megvalósíthatóak az egyenirányító, egyenfeszültség átalakító (DC-DC konverter buck, boost, buck/boost), jóság tényező javító (transzformátor és DC-DC konverter) és fényforrás láncok közötti kiegyenlítő áramkörökkel (ellenállás, DC-DC konverter) [2].

Meghatározó lépés a LED világítás tervezésében, hogy hatékony fényerő szabályozást hozzunk létre az apparatus számára. E fényerő szabályozás elérhető a LED-eken átfolyó áram mennyiségének lineáris változtatásával, azonban az áramváltozás befolyásolja a fényforrás által kibocsátott fény spektrumának sáv szélességét is (nem lineáris a kapcsolat) - s ezzel nagyban megnehezíti a kívánt fény spektrum elérhetőségét és kontrollját.

Pontosan ezért célravezetőbb más módszerek alkalmazása, úgy mint a pulzus szélesség modulációs (PWM) eljárás, mely segítségével az áram amplitúdója állandó értéken marad, de az egy perióduson belüli áramok összes értéke (a be/kikapcsolások arányával párhuzamban) változtatható a kívánalmaknak megfelelően.



1. Ábra- LED vezérlési rendszerek topológiája [2]

Ez a technika a (híradástechnikából jól ismert) pulzus kód modulációban (PCM) fejlődött tovább a digitalizálás felé, ahol az analóg jelet digitalizálják egy A/D konverter segítségével, hogy 2ⁿ felbontással kódolják egy periódust a jelből. A felbontott periódusban szereplő magas jelek sorrendje indifferens, mivel összegük (a periódusban szereplő kikapcsolt részekkel együtt megkapott középérték) adja az áram nagyságát [1].

További előrelépés a multifázisú pulzus szélesség moduláció (MPWM), amit több csatornás fényforrás rendszereknél lehet alkalmazni. Ez több csatornán alkalmazott PWM technológia, ahol az egyes csatornák jelének fázisa el van tolva egymáshoz képest, amelyet úgy valósítanak meg, hogy egyidőben csak egy csatornát kapcsolhatnak be és egy csatornát kapcsolhatnak ki. Ezzel a villódzás mértékét limitáljuk egy csatorna villódzásának nagyságára integráló lámpabúra segítségével alkalmazva (az emberi szem számára 120 Hz-nél gyorsabbnak kell lennie, hogy ne érzékelje a vibrálást – ugyanígy a növények fotoreceptorai számára is fontos a fény frekvenciája). Ugyanakkor az induktivitások és kapacitások mértéke lecsökken a DC-DC konverterekben és egyúttal a zaj is csökken a frekvencia növelésével [5].

3. Biológiai háttér

Minél jobban ismerjük a növény fényfelhasználó - érzékelő részeit és azok működését, annál könnyebb lesz azok kiszolgálása – az optimális (napfény) hatásához közeli hatás elérése és a legjobb hatásfokú fényforrás megtervezése.

A fény minőségét különböző fotoreceptorok érzékelik a növényekben – s különböző jelátvitelt indukálnak, hogy a fény minőségének megfelelő változások bonyolódjanak le abban. Ilyen fotoreceptorok a Phytochrome, cryptochrome, rhodopsins, xanthopsins, phototropin (light-oxygen-voltage (LOV) szenzor) és kék fény szenzor: flavin adenine dinucleotide (BLUF) [17]; [18][18]. Tehát több különböző jel keverékéről / szuperpozíciójáról is lehet beszélni, ami a növény morfológiai állapotának változását eredményezi. Felmerül a kérdés, hogy a különböző fotoreceptorok jelei milyen hatással vannak a növényekre illetve, hogy ezeket a fotoreceptorokat hogyan lehet bekapcsolni a fény hatásával?

A phytochrome (fitokróm) érzékeli a vörös fényt és a távoli vörös fényt (korai virágzás és növény törzs/szár meghosszabbodásával van kapcsolatban) [4]. A phytochrome aktivitás csökken a nap végének közeledtével, továbbá szabályozza a zsírsav metabolizmust a csíra fejlődése során [31].

A cryptochrome érzékeli az UV-A és a kék fényt – miközben phytochrome inhibíciós hatása van amikor a kék fény eléri a növényt – sejtnövekedés mérséklő hatású. Így tehát megállapítható, hogy a phytochrome-cryptochrome komplementer rendszernek tekinthető.

A phototropin (LOV szenzor) elnyeli a kék fényt a zárwatermőkben és ezzel szabályozza a növények fototropizmusát (fény felé terjedését). Fő jellemzői a LOV fotokémiai jellemzőiben találhatóak (kloroplasztisz és levél mozgások, levélrés/légzőnyílás nyitása, fototropizmus, virágzás elindulása, cirkadián ritmus, morfogenezis szabályozása) tehát a kék fény a sejtnövekedés mérséklésén kívül megannyi célra alkalmazható.

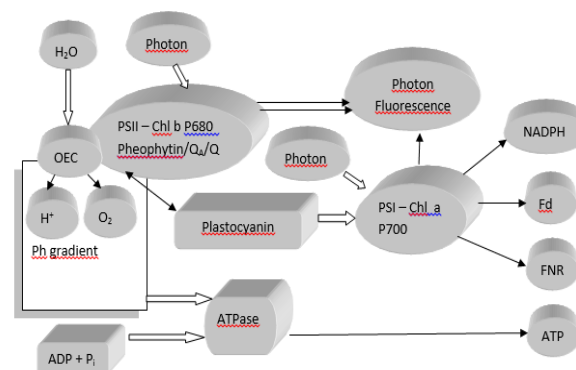
A rhodopsin szabályozza a fototaxist (fény hatására történő mozgást) a flagellate algában és kation csatornaként is működik (a Chlamydomonas algában).

A xanthopsins (nincs jelen növényben) fotoaktív sárga fehérje (photoactive yellow protein - PYP) ami a kék fényre reagál – egy teljesen visszafordítható folyamatban dolgozik – de egy izolált/elszigelt szenzor.

A BLUF szenzor (szintén nincs jelen növényben) azokkal a területekkel van összefüggésben amelyek a ciklikus nukleotid metabolizmusokkal dolgoznak [18].

A fény felhasználása a növények számára két fotoszintézis központ (plusz a Calvin ciklus) segítségével történik. A fotoszintézis sötét- (fénytől független) reakciójú része, vagy más néven Calvin ciklus segítségével a növény felhasználja a fénytől függő reakciókban keletkező energiát, hogy szerves anyagot hozzon létre (CO₂ redukálásával tárolásra, építőanyagként, energiafelhasználásra). Ez egy lassabb periódus, de még mindig pikomásodpercekben mérhető a hossza [16].

A klorofil tartalom növekszik akkor, amikor a vörös és távoli vörös arány növekszik s ezzel egyidőben a fotorendszer 2 és fotorendszer 1 (PSII/PSI) működésének aránya csökken [9]. A fotorendszerek 1-es és 2-es rendszerén keresztül a növények adenozyne-tri-phosphate-ot (ATP) és nicotinamide-adenine-dinucleotide-phosphate-ot (NADP⁺)



2. Ábra – A fotoszintézis fénytől függő részének szerkezeti és folyamat ábrája [17]; [12]; [13]

állítanak elő, amivel a testüket építik és tartják fenn azt.

A fenti szerkezeti és működési modellről több változó/elem is mérhető (nem invazív módon), hogy a világítás hatékonyságáról visszajelzést nyerjünk, úgy mint a mind a két fotorendszerben jelen levő foton fluoreszcencia, oxigén – szén-dioxid felhasználási és kibocsátási szint, páratartalom a levelek felületén és a környezetben, felhasznált folyadék mennyisége.

Ugyanakkor az is látható a fentebbi adatokból, hogy a vörös, távoli vörös, UV-A és a kék fény játszik szerepet a fotoszintézisben – habár a zöld fénynek is tulajdonítanak szerepet egyes kutatások [30] [8].

Szintén fontos megjegyezni a fény/sötétség periódus arányának fontosságát (folytonos fény vagy fény/sötétség ciklusok gyors egymás utáni lánc). Kísérletek igazolták, hogy a rövidebb fényimpulzusok pozitív hatással vannak a növényekben végbemenő fényintegrációra. A plasztokinon medence újraoxidációjával a kloroplasztisz / fotoszintetikus membránban a sötét ciklus során – egy magasabb fotoszintetikus határfokra tudnak jutni a növények (magasabb fényáram sűrűség (photon flux density (PFD) használható, amivel pedig magasabb termelékenységi szint érhető el [6] [20]).

Így azt a hipotézist állíthatjuk fel, hogy rövidebb fényimpulzussal magasabb termelékenységi szint érhető el. Korábban Rabinowitch állította (és később más szerzők re-validálták az állítását [16]) hogy a pulzáló fényforrás nem érheti el a folytonos fény fotoszintetikus határfokát – habár nem említették meg a fény spektrumának fontosságát [24].

4. Szenzorok - fényminőség visszajelző berendezések

A fentebb említett biokémiai – biológiai okok miatt látható, hogy a fény paramétereinek kontrollálása, úgy mint: sávszélesség (színérték), fényáram sűrűség (PFD vagy más néven fotoszintetikusán aktív sugárzás (photosynthetically active radiation (PAR))), megvilágítás minősége (frekvencia, pulzus szélesség) rendkívül fontos. Ezeket a paramétereket a növény és annak környezetétől származó közvetlen (valós idejű) visszacsatolással a legkönnyebb és leghatásosabb kontroll alatt tartani.

Visszajelző paraméterek lehetnek a fluoreszcencia, gáz kibocsátás (elnyelés), páratartalom, folyadék felhasználás és hőmérséklet (a talaj és a növény értékei egyaránt).

A fény különböző paraméterei különböző fotodiódákkal mérhetőek filter használatával vagy használata nélkül – ilyen eszköz a speciális LI-190 LI-COR fotodióda, ami a PAR hullámhossz mérésére beállított eszköz [29].

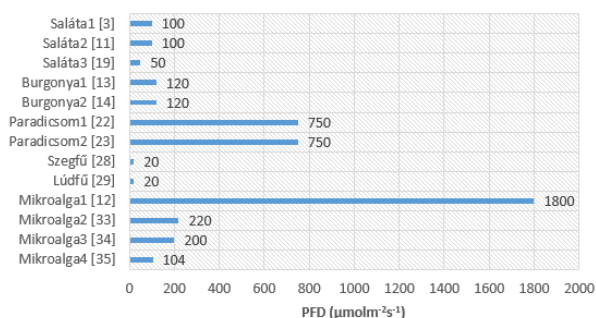
A gáz kibocsátás a Clark-típusú oxigén elektróda különböző változataival tehető [12]. A mérési folyamat automatizálása problémákat vehet fel, mivel az eszköznek érintenie kell a növény respirációs (szempontból releváns) területeit. A műszer érzékenysége és a folyamat kidolgozottsága oldhatja fel a fentebb említett problémákat. A CO₂ mérés infra-vörös spektroszkópia segítségével valósítható meg.

Mobil fotoszintézis rendszerek segítségével lehetséges feldolgozni a szenzorok elektronikus információit, melyek komplex visszajelzéseket adnak valós időben (e.g.: LI-6400[11]; LI-250: LI-COR [3]; Deltaohm HD2102.2: Deltaohm [28]; J17: Tektronix [13][14] stb...), s fordítják le a szenzorok elektromos jeleit könnyen érthető - értékelhető paraméterekké.

A szenzorok szabályozó rendszerbe is adhatják közvetlenül jeleiket, hogy azok feldolgozása után egy zárt kör részeként a növénytermesztési rendszer bemenő paramétereit (többek között annak fényforrásait) szabályozzák. Gonzalez et al. [22] [23] hasonló módon hozta létre az ILsys rendszert – habár ez a rendszer többé – kevésbé a fényforrás szabályozására szorítkozik.

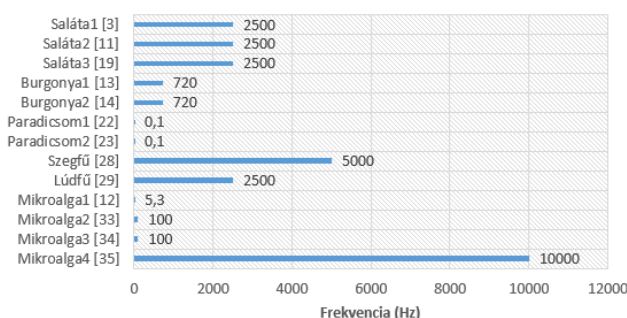
5. Eredmények

Optimális fényáram sűrűség

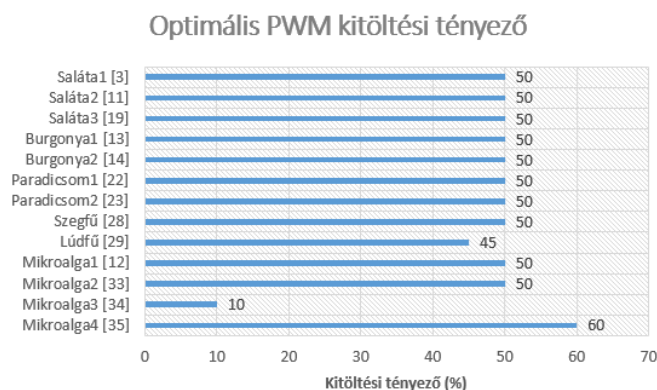


3 Ábra - Optimális fényáram sűrűség az egyes növényekre nézve

Optimális fény frekvencia (Hz)



4 Ábra - A fény optimális frekvenciája



5. Ábra – Optimális PWM kitöltési tényező

13 kutatás eredményei lettek kiértékelve, hogy kiderüljön a fény minősége hogyan érinti a különböző növényeket. Az eredmények megmutatták, hogy milyen frekvenciát, kitöltési tényezőt és sáv szélességű fényt a leghatékonyabb a mért növény működési/fejlődési paraméterek tekintetében (fluoreszcencia, gáz kibocsátás, CO₂ használat, levél terület arány stb.) használni 6 különböző növény fényforrásának optimális beállításához-meghajtásához.

A fényforrások hatékonysága és a fény minősége különböző szenzorokkal lett mérve és adataiból különböző paraméterek lettek kiszámítva, úgy mint fotoszintetikus fényáram sűrűség (Photosynthetic photon flux density (PPFD)), fényáram leadás (yield photon flux (YPF)), fotokémiai hatások, electron átviteli ráta (electron transport rate (ETR)) és oxigén fejlődés. Ezek a paraméterek nem feltétlenül mutatják, hogy a fény mennyire hasonló a nap fényéhez, inkább az előállított mesterséges fény (növénytermesztési) hatásköréről adnak információt. A kutatások nem ellenőrizték a fény hatását különböző spektrumú fény esetén – legtöbb csak egy kísérleti beállítással dolgozott.

	PWM kitöltési tényező [%]	Frekvencia [Hz]	Fényáram sűrűség (PPFD) [$\mu\text{mol s}^{-1} \text{mm}^{-2}$]
Saláta	50	2500	100-100-50
Burgonya	50	720	120
Paradicsom	50	0,1	750
Szegfű	50	5000	20
Lúdfű	45	2500	20
Mikroalga	50-50-10-60	5,3-100-100-10000	1800-220-200-104

6. Ábra – Eredmények összefoglalása

6. Diskusszió

A vizsgált kutatások az alapján lettek kiválasztva, hogy melyek vizsgálják a folytonos és nem folytonos meghajtású fényforrással nevelt növények közötti különbséget, továbbá, hogy melyek vizsgálták a fényforrás különböző meghajtásának optimális beállítását kontrollesoporthoz viszonyítva.

Néhány kutatás egyoldalúan vizsgálta a fényforrás tervezésének lehetőségeit; vagy kitöltési tényező szerint vizsgált [12], vagy csak a frekvenciával dolgozott (a fény/sötétség hosszával) [29]. Ezzel a vizsgált kísérleti csoportok között található relációt adták meg – nem konkretizálták tökéletesen az optimális meghajtás megtervezését (például a fenti két paraméterek kombinációjával és tesztelésével).

Olyan kutatási anyag is található a tudományos életben, ahol a kísérleti beállítások megkérdőjelezhetően lettek megtervezve, mint például azoknál az eseteknél, amikor egyes változók kontrollálatlanok voltak (az összehasonlító alapként szolgáló folytonos fényt fénycső szolgáltatatta, míg a pulzáló fényt LED segítségével hozták létre). Ezzel a mért adatok torzulhattak az olyan faktorok figyelmen kívül hagyásával, mint például a növények érzékenysége (a fény pulzálásától/folytonosságától függetlenül) a különböző spektrumú fényre (a kutatásban tehát nem azt mérték, amit kívántak). Ezen kutatások eredményei nem voltak számításba vehetőek.

A tervezési folyamat során fontos kérdés, hogy a tervezett fényforrást / rendszert az alapján osztályozzuk, hogy milyen hatékony az elektronikus energia felhasználása, vagy a pedig a növények termesztésének hatékonyságában játszott szerepet emeljük ki [3] – jelen kutatás az utóbbi alapján lett elkészítve.

Ugyanakkor, végső soron a cél az, hogy a LED fényforrások meghajtását úgy lehessen megtervezni, hogy a legnagyobb lehetséges/szükséges fényerőt érjük el (a megfelelő pulzus paraméterek segítségével), s ezzel pedig a legmagasabb termelékenységet érjük el a megtervezett növénynevelési rendszerrel. A korábbi kétségekkel szemben [16][24] amik a foto-inhibícióval kapcsolatban merültek fel a fotorendszerek működése kapcsán, jobb megoldást lehet kapni, ha a fényforrás meghajtás nem folytonos (de optimális) fényt hoz létre.

A felvetés, hogy a fény hatása azon múlik, hogy egy növény egy vagy kétszikű (dicotyledonous vagy monocotyledonous), illetve a levelek szögének eloszlása is meghatározó (erectophile, planophile) [26] nem nyert bizonyítást. Az ebben a tanulmányban vizsgált kísérletekben a krumpli, paradicsom, saláta, szegfű, lúdfű kétszikű, míg a mikroalga egyszikű, azonban nem volt található (szignifikáns) különbség a két kategória fényforrásainak meghajtása között.

További kutatásokban érdemes lehet vizsgálni a frekvencia és a fényáram sűrűség kapcsolatát, hisz például a mikroalgák termesztési-kutatási eredményei alapján látható, hogy a két paraméter erősen hat egymásra.

A fentebbi és majd a jövőben kifejlesztett technológiák segítségével a cél az, hogy alternatív energiaforrást kapjunk a nap helyett a növények számára – hogy az időjárási viszonyoktól független lehessen a növénytermesztés. Szintén fontos, hogy nem csak növénytermesztési gyárak fényforrására kaphatunk alternatívát a fényforrások és meghajtásuk tökéletesítésével, de egy újabb és jobb alternatív energiaforrás kifejlesztését is segíthetik ezen irányú kutatások (lásd fotobioreaktorok).

1. Táblázat

A vizsgált tanulmányok kiemelt paraméterei

Tanulmány sorszáma	Növény típusa	LED típus / Hullámhossz	Frekv. [Hz]	Kitöltési tényező [%]	Fényáram sűrűség ($\mu\text{molm}^{-2}\text{s}^{-1}$)	LED meghajtás	Mérő szenzorok - eszközök
[3]	Lactuca sativa L. 'Cheongchima' and 'Jeokchima'	red:blue:white = 5:2:1 (1W)	2,5 K	50%	100	Oscilloscope,	Quantum sensor LI-250, Portable Photosynthesis System LI-6400XT
[11]	Chinese Lettuce - Brassica Chinensis	16 Red 660Nm, 4 Blue - 460Nm	N/A	N/A, prob 50%	100	Atmega128 microcontroller,	Quantum sensor LI-250, Portable Photosynthesis System LI-6400XT, Temperature & Humidity sensors and CO2
[19]	Lettuce - Lactuca sativa cv. "Natsuyo Saradana"	10X20 / 10X40 Clear White	2,5 K	50%	50	Pulse generator (non specified), stabilized power supply	Photosynthesis transpiration measuring device (KIP-9010, Clark electrode - Oxygen measurement)
[13] ^{a1}	Potato - Solanum Tuberosum L. "Kennebec", Phal., White Dream Enshyu	9 red 645 +20 Nm, 4 blue 460 +20 Nm	720	50%	120	DC power supply (GPC-3030DQ), PWM drive: One 555 IC (HA1755), 2 resistors 1 capacitor	Spectroradiometer LI-1800, Photometer J-17, LED head, Luminance head, Duty ratio meter, Frequency meter
[14] ^{a1}	Potato - Solanum Tuberosum L. "Kennebec"	9 Red - 645Nm, 4 Blue - 460Nm	720	50%	120	DC power supply (GPC-3030DQ), PWM drive: One 555 IC (HA1755), 2R + 1C	Spectroradiometer LI-1800, Photometer J-17, LED head, Luminance head, Duty ratio meter, Frequency meter
[22] ^{a2}	Tomato - Lycopersicon esculentum	170 Red 660±30 Nm, 30 Blue 460 ±25 Nm	0,1 - 1	50%	750	ILsys - Intelligent illumination system, Basys FPGA board of the Diligent (with Xilinx Spartan 3E FPGA of 250,000 gateways)	ILsys - Basys FPGA board of the Diligent (with Xilinx Spartan 3E FPGA), (Temp, humidity and CO ₂ sensor) Fiber optic, Spectrometer (Ocean Optics)
[23] ^{a2}	Tomato - Lycopersicon esculentum	170 Red 660±30 Nm, 30 Blue 460 ±25 Nm	0,1	50%	750	ILsys - Intelligent illumination system, Basys FPGA board of the Diligent (with Xilinx Spartan 3E FPGA of 250,000 gateways)	ILsys - Basys FPGA board of the Diligent (with Xilinx Spartan 3E FPGA), (Temp, humidity and CO ₂ sensor) Fiber optic, Spectrometer (Ocean Optics)
[28]	Carnation - Dianthus sp.	3 - 455Nm 3 - 460-475, 3 - 615-630, 3 - 660Nm	5 K	50%	20	Optocoupled units - PWM and driver unit	DeltaOhm measure - record, DeltaOhm Quantum Radiometric Probe, Humid. & Temperature sensor, Photo diode, Carbon dioxide sensor
[29] ^b	Thale cress - Arabidopsis thaliana -	~100 Red - 630 Nm, ~100 Blue - 470Nm	2,5 K	45%	20	Currentmode:high speed op.amp., power transistors. Delay pattern gen.: programmable system-on-chip mixed signal array	Quantum sensor LI-190, Photon flux photodiode, Transient emission waveform photodiode, Signadigital oscilloscope,
[12]	Microalgae - Dunaliella tertiolecta	22 Red - 666 Nm	>5,26	50%	1800	TIP 141 Darlington transistor pulse generator via an optocoupler (Campbell CR10 datalogger)	Quantum sensor LI-190, Spectroradiometer, Clark-Type oxygen electrode (YSI5331), Schott NG filters)
[33] ^{a3}	Microalgae - Chlamydomonas reinhardtii	48 Red - 630 Nm, 48 Blue - 450 Nm	100	50%	220	Reactor system (PBR FMT 150, Photon System Instruments (PSI, Brno)	Quantum sensor LI-190, Photodiode, A/D converter, Spectroradiometer (SRM), Avaspec 2048
[34] ^{a3}	Microalgae - Chlamydomonas reinhardtii	38 Red - 630 Nm	>50	10%	200	Reactor system (PBR FMT 150, Photon System Instruments (PSI, Brno)	Biological Optical Monitor (BOM), Optical oxygen microsensors, signal processed via a Transmitter, Micro TX3
[35]	Microalgae - Isochrysis galbana	White - 400-800 Nm	10 K	40-80%	104	panel control device (ISC-101-4, CCS	Quantum sensor LI-250, Photometer-Radiometer RF100

a1; a2; a3 Ugyanaz a kísérleti csapat végzett el hasonló kísérleti beállításokkal kutatást s ezzel kutatásaik validitását erősítették meg

^b Ez a kutatás kiegészült egy új vizsgált változóval: fázis különbséget hozva létre a különböző hullámhosszal rendelkező fény-csatornák között

Referenciák

- [1] I. Ashdown, "Extended parallel pulse code modulation of LEDs," *Proc. SPIE*, vol. 6337, pp. 63370W-1–63370W-10, Aug. 2006.
- [2] M. Arias, A. Vazquez and J. Sebastián, (2012), An Overview of the AC-DC and DC-DC Converters for LED Lighting Applications, *Automatika* 53(2012) 2, pp.: 156–172
- [3] K.J. Cho, J. Y. Cho, I.S. Park, and O. Wook, (December 2013), Effects of Duty Ratio of Pulsed LED Light on Growth and Photosynthetic Rate of Lettuce Grown in a Plant Factory System, *J. Korean Soc. People Plants Environ. Vol. 16 No. 6:* pp.:427-434
- [4] J. F. Botto, H. Smith, (2002), Differential genetic variation in adaptive strategies to a common environmental signal in Arabidopsis accessions: phytochrome-mediated shade avoidance, *Plant, Cell & Environment*, Volume 25, Issue 1, January 2002, pp.: 53–63
- [5] M. Doshi and R. Zane, "Control of solid-state lamps using a multiphase pulsewidth modulation technique", *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 25, no. 7, pp. 1894-1904, 2010.
- [6] J. M. Escoubas, M. Lomas, J. LaRoche, and P. G. Falkowski, (1995)., Light intensity regulation of cab gene transcription is signaled by the redox state of the plastoquinone pool. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 92(22), pp.:10237–10241.
- [7] B. Frąszczak, A. Golcz, R. Zawirska-Wojtasiak, and B. Janowska, (January 2014) Growth rate of sweet basil and lemon balm plants grown under fluorescent lamps and LED modules, *Acta scientiarum Polonorum. Hortorum cultus = Ogrodnictwo* 13(2): pp.:3-13
- [8] KM. Folta and SA. Maruhnich, (2007), Green light: a signal to slow down or stop. *Journal of Experimental Botany* 2007;58(12), pp.:3099-111.
- [9] E. Goto, (2003). Effects of light quality on growth of crop plants under artificial lighting. *Environment Control in Biology Vol. 41 (2003) No. 2* pp.: 121-132
- [10] M. Grundmann, (2010), The Physics of semiconductors - an introduction including nanophysics and applications, *Springer-Verlag Berlin Heidelberg, Berlin, Germany*
- [11] A. N. Harun, N. N. Ani, R. Ahmad, and N. S. Azmi, Red and blue LED with pulse lighting control treatment for Brassica chinensis in Indoor farming, Presented at 2013 IEEE Conference on Open Systems (ICOS), December 2 - 4, 2013, Sarawak, Malaysia.
- [12] M. G. J. Janssen, "Cultivation of microalgae: effect of light/dark cycles on biomass yield", Doctoral Thesis, Wageningen University, Wageningen, The Netherlands, 2002
- [13] R.-C. Jao and W. Fang, (2003), An Adjustable Light Source for Photo-Phyto Related Research and Young Plant Production, *Applied Engineering in Agriculture*, Vol. 19(5): pp.: 601–608
- [14] R.-C. Jao and W. Fang, (2004), Effect of frequency and duty ratio on the growth of potato plantlets in vitro using light emitting diodes, *HortScience*, 39(2): pp.:375-379
- [15] K. Ng Kwok, (2002), Complete guide to semiconductor devices, Wiley-IEEE Press, United States
- [16] E. Meerwaldt, (2004) "A feasibility study of using pulsed red LEDs as a source of assimilation light using Lemna minor as a model", Wageningen Univ., MSc thesis, Dept. of Plant Sciences, Wageningen, The Netherlands, 2004
- [17] Y. Munekage, M. Hashimoto, C. Miyake, K. Tomizawa, T. Endo, M. Tasaka, T. Shikanai, Cyclic electron flow around photosystem I is essential for photosynthesis, *Nature*. 2004 Jun 3;429 (6991), pp.:579-82
- [18] A. Möglich, X. Yang, R. A. Ayers and K. Moffat, (January, 2010), Structure and function of plant photoreceptors, *Annu Rev Plant Biol.* 2010;61: pp.:21-47
- [19] Y. Mori, M. Takatsuji and T. Yashuoka, (January, 2002), Effects of Pulsed White LED Light on the Growth of Lettuce, *Shokubutsu Kojo Gakkaishi* 14(3): pp.:136-140
- [20] L. Nedbal, V. Tichy, F. Xiong and JU Grobbelaar, (1996), Microscopic green algae and cyanobacteria in high-frequency intermittent light., *J Appl Phycol* 8: pp.:325–333
- [21] L. Nedbal, M. Trtílek, J. Červený, O. Komárek and H. B. Pakrasi, (2008), A photobioreactor system for precision cultivation of photoautotrophic microorganisms and for high-content analysis of suspension dynamics. *Biotechnol. Bioeng.*, 100: pp.:902–910.
- [22] E. Olvera-Gonzalez, D. Alaniz-Lumbreras, R. Ivanov-Tsonchev, J. Villa-Hernández, C. Olvera-Olvera, E. González-Ramírez, M. Araiza-Esquivel, V. Torres-Argüelles, V. Castaño, (2012) Intelligent lighting system for plant growth and development, *Computers and Electronics in Agriculture* 92, pp.: 48–53
- [23] E. Olvera-Gonzalez, D. Alaniz-Lumbreras, R. Ivanov-Tsonchev, J. Villa-Hernández, C. Olvera-Olvera, E. González-Ramírez, M. Araiza-Esquivel, V. Torres-Argüelles, V. Castaño, (2013) Chlorophyll fluorescence emission of tomato plants as a response to pulsed light based LEDs, *Plant Growth Regulation*, March 2013, Volume 69, Issue 2, pp 117–123
- [24] E.I. Rabinowitch, (1956), Chapter 34, time effects. II. Photosynthesis in intermittent light. In: Photosynthesis and related processes, Volume 2, part 2. Interscience publishing, New York.
- [25] E. Rosenquist and O. van Kooten, "Chlorophyll Fluorescence: A General Description and Nomenclature" in Practical Applications of Chlorophyll Fluorescence in Plant Biology, J.R. DeEll and P.M.A Toivonen Ed, Springer US, 2003, pp.: 31-77
- [26] E. F. Schubert, Light-emitting diodes, (2006), 2nd Edition, Cambridge University Press, New York
- [27] Schuerger, A.C., Brown, C.S. and Stryjewski, E.C. (1997) Anatomical Features of Pepper Plants (*Capsicum annum* L.) Grown under Red Light-Emitting Diodes Supplemented with Blue or Far-Red Light., *Annals of Botany*, 79, pp.: 273-282.
- [28] R. Senola, S. Kilich, and K. Tasdelena, (April, 2016) Pulse timing control for LED plant growth unit and effects on carnation, *Computers and Electronics in Agriculture*, Volume 123, pp.: 125–134
- [29] A. Shimada, and Y. Taniguchi, (2011) Red and blue pulse timing control for pulse width modulation light dimming of light emitting diodes for plant cultivation. *Journal of Photochemistry and Photobiology B: Biology* Volume 104, Issue 3, 2 September 2011, pp.: 399–404
- [30] A.P. Sommer and R. Franke, (2006), Plants grow better if seeds see green, *Naturwissenschaften*. 2006 Jul;93(7), pp.: 334-7.
- [31] S. Tazawa, (July 1999) Effects of various radiant sources on plant growth (Part 1), *Japan Agricultural Research Quarterly* 33(3), July 1999, pp.: 163-176
- [32] C. Vejrazka, M. Janssen, M. Streefland and R. H. Wijffels, (Dec., 2011), Photosynthetic efficiency of *Chlamydomonas reinhardtii* in flashing light, *Biotechnology and Bioengineering*. 2011 Dec;108(12): pp.:2905-13
- [33] C. Vejrazka, M. Janssen, M. Streefland and R. H. Wijffels, (Oct., 2012), Photosynthetic efficiency of *Chlamydomonas reinhardtii* in attenuated, flashing light, *Biotechnology and Bioengineering*; 109(10): pp.:2567-74
- [34] C. Vejrazka, M. Janssen, G. Benvenuti, M. Streefland and R. H. Wijffels, (2013), Photosynthetic efficiency and oxygen evolution of *Chlamydomonas reinhardtii* under continuous and flashing light, *Applied Microbiology and Biotechnology* (2013) 97: pp.: 1523–1532

- [35] T. Yago, H. Arakawa, K. Fukui, B. Okubo, K. Akima, S. Takeichi, Y. Okumura, and T. Morinaga, (9th August, 2012), Effects of flashing light from light emitting diodes (LEDs) on growth of the microalga *Isochrysis galbana*, *African Journal of Microbiology Research Vol. 6(30)*, pp. 5896-5899
- [36] V. Vaštakaitė, A. Viršilė, A. Brazaitytė and P. Duchovskis, (2016), The spectral effects of continuous and pulsed led light on phenolic compounds of mustard microgreens Presented at XXVIIIth International Conference on Polyphenols, At Institute of Chemical Engineering TU Wien, Vienna, Austria