

Tarımda Yapay ve Ek Aydınlatma İçin Kullanılan Armatürlerin Teknik Analizi

Technical Analysis of Light Fixtures Used for Artificial and Supplemental Lighting

Sorumlu Yazar

Temuçin Göktürk SEYHAN¹

seyhan@ankara.edu.tr

0000-0003-4622-6059

Yazar

Sinem SEYHAN²

sinem.seyhan@ankara.edu.tr

0000-0002-2252-7335

ÖZET

Bitkilerin büyüme ve gelişmesi için su, karbondioksit, oksijen, besin maddeleri, sıcaklık ve ışık gibi çeşitli gereksinimleri bulunmaktadır. Bu ihtiyaçlar açıkta yetiştiricilikte doğal olarak sağlanmakta olup sera veya dikey tarım gibi sistemlerde doğayı taklit ederek bir kısmı veya tamamı yapay olarak sağlanmaktadır. Fotosentezde en yüksek verimi alabilmek için günlük aydınlık süresi, fotosentetik foton akı yoğunluğu, gün içinde toplanan fotosentetik foton sayısı gibi birtakım parametrelerin bilinmesi ve ideal şekilde sağlanması için gerekli hesaplamaların yapılması önem taşımaktadır. Bitkilerin ışıkla ilgili bu ihtiyaçları çeşitli kaynaklardan sağlanabilmektedir. Bitkilerin fotosentezde kullandığı ışığın spektrumu, şiddeti gibi özelliklerinin yanında gün içinde hangi süre ile ve bu süre içinde toplam ne kadar ışık aldığı da çok önemlidir. Bitkilerin türü ve çeşidi ile yetiştirme dönemine göre ihtiyaç duydukları ışık miktarı ve süresi değişkenlik gösterebilmektedir. Bu çalışmada bazı bitkilerin günlük ışık integrali ihtiyaçları üzerinde durularak bu ihtiyaçların sağlanması için kullanılan yapay ve ek aydınlatma armatürlerinden bazıları; enerji verimi, ışık etkinliği, spektral kalite, güç, IP koruma sınıfı, ömür gibi parametreler bakımından incelenmiş ve ışığın planlaması ve kontrolüne yönelik bilgiler verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Yapay Aydınlatma, Ek Aydınlatma, Aydınlatma Armatürleri, Dikey Tarım, Günlük Işık İntegrali

1 Ankara Üniversitesi.

2 Ankara Üniversitesi.

Gönderilme Tarihi :

Kabul Tarihi :

22 Eylül 2023

17 Şubat 2024

ABSTRACT

Plants have various requirements for growth and development, such as water, carbon dioxide, oxygen, nutrients, temperature, and light. These needs are provided naturally in open farming, and some or all of them are provided artificially by imitating nature in systems such as greenhouse or vertical farming. In order to get the highest efficiency in photosynthesis, it is important to know some parameters such as daily light duration, photosynthetic photon flux density, the number of photosynthetic photons collected during the day and to make the necessary calculations to provide them in an ideal way. These light needs of plants can be met from various sources. In addition to the features such as the spectrum and intensity of the light used by plants in photosynthesis, it is also very important how much light is received during the day. Depending on the type and variety of plants and the growing period, the amount and duration of light they need may vary. In this study, the daily light integral needs of some plants are emphasized and some of the artificial and supplemental lighting fixtures used to meet these needs are investigated in terms of energy efficiency, light efficacy, spectral quality, power, IP protection class, life span and some information on planning and control of light are given.

Keywords: Artificial Lighting, Supplemental Lighting, Lighting Fixtures, Vertical Farming, Daily Light Integral

GİRİŞ

Fotosentez bitkilerin besin üretim sürecidir. Fotosentezin temel bileşenleri klorofil, su, karbondioksit ve ışıktır (Shivling ve Ghanshyam 2012). Işık yoğunluğu fotosentez hızı arasında doğrusal bir ilişki bulunmaktadır (He ve Yao 2002). Bitkilerin en temel ışık kaynağı güneştir fakat güneş ışığının yeterli olmadığı durumlarda yardımcı aydınlatma elemanlarıyla bitkilerin aldığı ışığı artırmak, uzun zamandır üzerinde çalışılan bir konu olup bitkilerin ihtiyacı olan ışık dalga boyları ve bu dalga boylarındaki ışığın bitki bünyesindeki farklı etkileri araştırılmaktadır (Brazaityté vd. 2016).

Tarımsal aydınlatma, multidisipliner olarak ele alınması gereken bir konudur (Murad vd., 2021). Biyoloji,

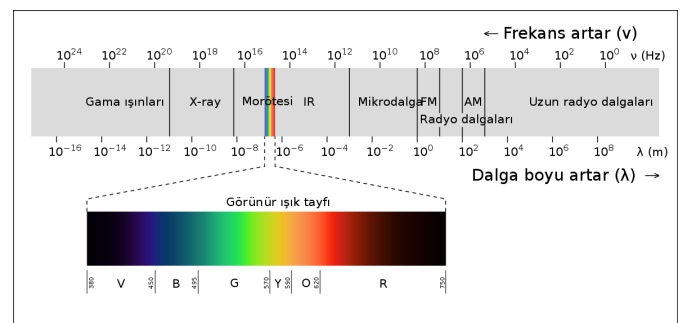
fizik, kimya, mühendislik ve ekonomi bilimleri açısından optimum bitkisel üretimin yanında en yüksek karlılığı sağlayacak kombinasyonların tespit edilebilmesi için ışığın özellikleri ile bitkilerin ihtiyaçlarının bilinmesi ve doğru şekilde yorumlanması gerekmektedir (Dutta Gupta 2017).

Tarımda; güneş ışığı yeterli olmadığında “ek aydınlatma” kullanılmaktadır. Işık ihtiyacının tamamını karşılamaya yönelik “yapay aydınlatma” sistemleri bulunmaktadır. Ayrıca genellikle süs bitkileri yetiştiriciliğinde uygulama alanı olan ve bitki fizyolojisini manipüle etmeye yönelik “fotoperiyodik aydınlatma”dan da yararlanılmaktadır. Elde edilmek istenen tepkiye göre farklı tipte, güçte ve spektrumda aydınlatma elemanları kullanılmaktadır.

Bu çalışmada ışığa dair bazı özellikler açıklanarak yapay ve ek aydınlatma armatürlerinden bazıları; enerji verimi, ışık etkinliği, spektral kalite, güç, IP koruma sınıfı, ömür gibi parametreler bakımından incelenmiş ve ışığın planlaması ve kontrolüne yönelik bilgiler verilmiştir.

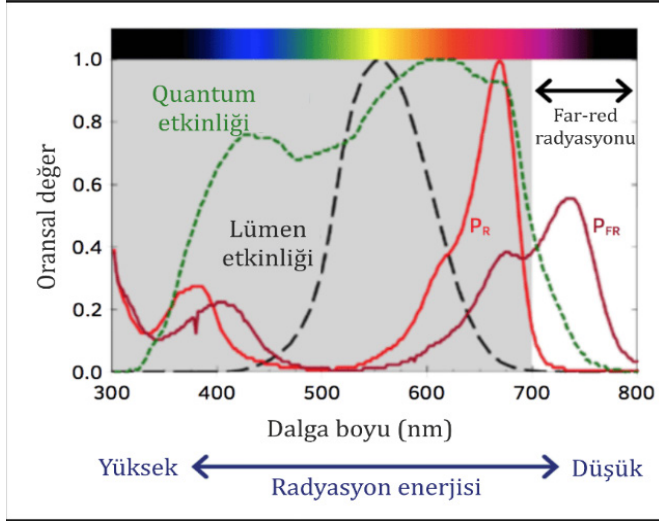
1. IŞIK

Işık, elektromanyetik spektrum içinde insan gözünün algılayabildiği bölgeye (400 – 700 nm) verilen isimdir (CIE 2020) (Şekil 1).



Şekil 1. Elektromanyetik dalga spektrumu ve görünür ışık

Bitkiler ise ışığı insan gözünden farklı olarak algılar. İnsan gözünün göremediği morötesi (UV) dalga boylarından kızılötesi (IR) dalga boylarına kadar olan bir spektrum, bitkilerce absorbe edilmektedir (Hogewoning vd. 2010) (Şekil 2).



Şekil 2. Bitkiler tarafından absorbe edilen ışığın spektrumu

1.1. Işığın Parametreleri

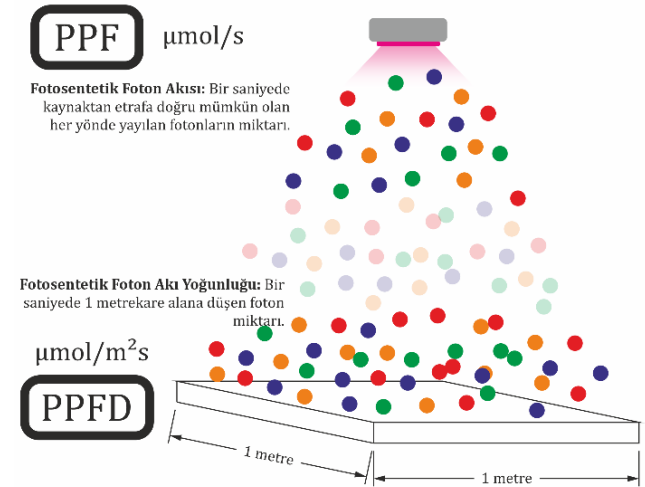
Bitkisel üretim söz konusu olduğunda birtakım temel parametreler ve bu parametrelerin birimleri ile ölçütlerinin anlaşılması ve bitki isteklerine göre düzenlenmesi önemlidir. Işığa dair parametreler, ışığın sahip olduğu enerji bakımından radyometrik yöntemle, ışığın insan gözü tarafından algılanmasını konu edinen fotometrik yöntemle ve ışığın içerdiği foton sayısı bakımından fotonmetrik yöntemle ölçülmektedir. Işığın şiddeti, radyometrik ve fotometrik açılarından literatürde çokça incelenmiştir. Ancak bitki bünyesinde kimyasal reaksiyonların hızı ve miktarı, bitki tarafından soğurulan foton miktarı ile doğrudan ilişkilidir. Bu nedenle bitkisel aydınlatma söz konusu olduğunda fotonmetrik birimler ile ışığı tarif etmek daha doğrudur. Işığın radyometrik, fotometrik ve fotonmetrik açıdan özelliklerine dair tanımlamalar aşağıda verilmiştir (Tablo 1).

Tablo 1. Işığın radyometrik, fotometrik ve fotonmetrik parametreleri (Fujiwara, 2016)

Radyometrik	Radyant akı (W)	Radyant enerji (W s ⁻¹)	Parlaklık (W m ⁻²)
Fotometrik	Işık akısı (lm)	Işık miktarı (lm s ⁻¹)	Aydınlık şiddeti (lx)
Fotonmetrik	Foton akısı (mol s ⁻¹)	Foton sayısı (mol)	Foton akı yoğunluğu (mol m ⁻² s ⁻¹)

PAR (Photosynthetically Active Radiation – Fotosentetik Aktif Radyasyon), ışık spektrumu içinde bitkiler tarafından kullanılabilen bölgeyi tanımlamaktadır (Goto 2016). Güneşten gelen ışığın yaklaşık %42.9'u 400 – 700 nm arasındaki bölgededir (Korczyński vd. 2002) ve bu bölgedeki ışığın ancak %50 kadarı fotosentezde kullanılabilir (Boyle 2012).

Tablo 1'de verilen fotonmetrik parametreler bitkisel açıdan ele alındığında PPF (Photosynthetic Photon Flux – Fotosentetik Foton Akısı) ve PPFD (Photosynthetic Photon Flux Density – Fotosentetik Foton Akı Yoğunluğu) kavramları ortaya çıkmaktadır. Bu kavramlar, PAR spektrumu dahilinde ışığın özelliklerini inceler. PPF ($\mu\text{mol s}^{-1}$), ışık kaynağından bir saniyede yayılan ve fotosentezde kullanılabilen foton miktarını Avogadro sayısı (6.022×10^{23}) cinsinden ifade ederken; PPFD ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), bir saniyede bir metrekare yüzeye düşen ve fotosentezde kullanılabilen foton miktarını Avogadro sayısı (6.022×10^{23}) cinsinden ifade etmektedir (Şekil 3).



Şekil 3. Fotosentetik foton akı yoğunluğu

Bitkisel üretimde PPFD değeri, fotosentez hızını belirleyen en önemli faktörlerden biridir (Benedetti vd. 2018). Ancak tek başına PPFD değeri ile verim tahmini yapmak imkansızdır. Bir gün içinde ışık şiddetinin nasıl ve hangi uzunlukta alındığı da önemli olmaktadır. Gün içinde bitki yüzeyine düşen toplam fotosentetik foton miktarının Avogadro sayısı cinsinden ifadesinde DLI (Daily Light Integral – Günlük Işık İntegrali) kullanılmaktadır. Birimi $\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (fotonmetrik) veya $\text{W m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (radyometrik) olsa da sıklıkla mol m^{-2} veya W m^{-2} olarak kullanılmaktadır.

Günlük ışık integrali (DLI), doğal aydınlatma yapılan tarımsal üretim alanlarında sürekli olarak PPFD değerini ölçen kuantum sensörü yardımıyla ölçülerek tespit edilmektedir. Tamamen yapay aydınlatma yapılan tesislerde ise DLI; anlık ölçülen PPFD değeri ile günlük aydınlatma

süresi çarpılarak hesaplanmaktadır. Ek aydınlatma kullanılan tesislerde gün sonunda toplanamayan foton miktarının ihtiyaç olan seviyeye tamamlanması amaçlanmaktadır. Ölçülen PPFD değeri ile DLI arasındaki hesaplamayı kolaylaştıracak bir çizelge, aşağıda verilmiştir (Tablo 2).

Tablo 2. PPFD, süre ve DLI çizelgesi

	PPFD	50	100	150	200	250	300	350	400	450	500	550	600	650	700	750	800
Saat																	
1		0.2	0.4	0.5	0.7	0.9	1.1	1.3	1.4	1.6	1.8	2.0	2.2	2.3	2.5	2.7	2.9
2		0.4	0.7	1.1	1.4	1.8	2.2	2.5	2.9	3.2	3.6	4.0	4.3	4.7	5.0	5.4	5.8
3		0.5	1.1	1.6	2.2	2.7	3.2	3.8	4.3	4.9	5.4	5.9	6.5	7.0	7.6	8.1	8.6
4		0.7	1.4	2.2	2.9	3.6	4.3	5.0	5.8	6.5	7.2	7.9	8.6	9.4	10.1	10.8	11.5
5		0.9	1.8	2.7	3.6	4.5	5.4	6.3	7.2	8.1	9.0	9.9	10.8	11.7	12.6	13.5	14.4
6		1.1	2.2	3.2	4.3	5.4	6.5	7.6	8.6	9.7	10.8	11.9	13.0	14.0	15.1	16.2	17.3
7		1.3	2.5	3.8	5.0	6.3	7.6	8.8	10.1	11.3	12.6	13.9	15.1	16.4	17.6	18.9	20.2
8		1.4	2.9	4.3	5.8	7.2	8.6	10.1	11.5	13.0	14.4	15.8	17.3	18.7	20.2	21.6	23.0
9		1.6	3.2	4.9	6.5	8.1	9.7	11.3	13.0	14.6	16.2	17.8	19.4	21.1	22.7	24.3	25.9
10		1.8	3.6	5.4	7.2	9.0	10.8	12.6	14.4	16.2	18.0	19.8	21.6	23.4	25.2	27.0	28.8
11		2.0	4.0	5.9	7.9	9.9	11.9	13.9	15.8	17.8	19.8	21.8	23.8	25.7	27.7	29.7	31.7
12		2.2	4.3	6.5	8.6	10.8	13.0	15.1	17.3	19.4	21.6	23.8	25.9	28.1	30.2	32.4	34.6
13		2.3	4.7	7.0	9.4	11.7	14.0	16.4	18.7	21.1	23.4	25.7	28.1	30.4	32.8	35.1	37.4
14		2.5	5.0	7.6	10.1	12.6	15.1	17.6	20.2	22.7	25.2	27.7	30.2	32.8	35.3	37.8	40.3
15		2.7	5.4	8.1	10.8	13.5	16.2	18.9	21.6	24.3	27.0	29.7	32.4	35.1	37.8	40.5	43.2
16		2.9	5.8	8.6	11.5	14.4	17.3	20.2	23.0	25.9	28.8	31.7	34.6	37.4	40.3	43.2	46.1
17		3.1	6.1	9.2	12.2	15.3	18.4	21.4	24.5	27.5	30.6	33.7	36.7	39.8	42.8	45.9	49.0
18		3.2	6.5	9.7	13.0	16.2	19.4	22.7	25.9	29.2	32.4	35.6	38.9	42.1	45.4	48.6	51.8
19		3.4	6.8	10.3	13.7	17.1	20.5	23.9	27.4	30.8	34.2	37.6	41.0	44.5	47.9	51.3	54.7
20		3.6	7.2	10.8	14.4	18.0	21.6	25.2	28.8	32.4	36.0	39.6	43.2	46.8	50.4	54.0	57.6
21		3.8	7.6	11.3	15.1	18.9	22.7	26.5	30.2	34.0	37.8	41.6	45.4	49.1	52.9	56.7	60.5
22		4.0	7.9	11.9	15.8	19.8	23.8	27.7	31.7	35.6	39.6	43.6	47.5	51.5	55.4	59.4	63.4
23		4.1	8.3	12.4	16.6	20.7	24.8	29.0	33.1	37.3	41.4	45.5	49.7	53.8	58.0	62.1	66.2
24		4.3	8.6	13.0	17.3	21.6	25.9	30.2	34.6	38.9	43.2	47.5	51.8	56.2	60.5	64.8	69.1

Bitkilerin gereksinim duyduğu günlük ışık miktarı, bitki türüne, çeşidine ve büyüme evresine bağlı olarak değişmektedir. Günlük ışık integrali (DLI), dış koşullarda genellikle ortalama 5 ila 60 mol m⁻² arasında ölçülmektedir.

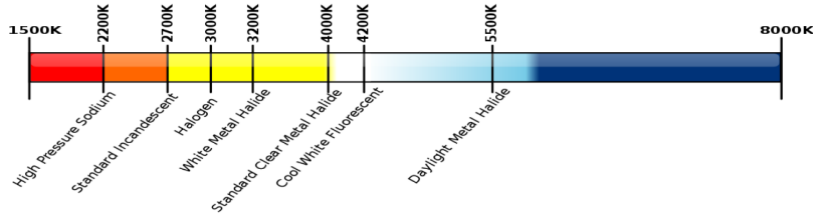
Seralarda ise kış ve ilkbahar aylarında DLI genellikle 1 ila 10 mol m⁻² seviyelerine kadar düşmektedir (Öztek ve Türe 2019). Tablo 3'te bazı bitki türlerinin DLI ihtiyaçları verilmiştir.

Tablo 3. Bazı bitki türlerinin DLI istekleri (Runkle 2019)

Bitki türü	DLI İsteği (mol m ⁻²)	Bitki türü	DLI İsteği (mol m ⁻²)
Çelikler – Erken Dönem	4 – 6	Yaprağı Yenenler ve Otlar	>12
Çelikler – Geç Dönem	6 – 10	Çalılar	>12
Fideler – Erken Dönem	6 – 10	Kesme Çiçekler	>15
Fideler – Geç Dönem	10 – 15	Çilek	15 – 20
Yaprak Dökenler	6 – 10	Domates	22 – 30
Soğanlılar	6 – 15	Patlıcan	22 – 30
Saksılı Çiçek Açanlar	>12	Hıyar	20 – 30
Gölge Bitkileri	6 – 10	Biber	20 – 30
(Yıllık ve İki yıllık)		Baş Salata	14 – 16

Işık, spektral kompozisyonundan bağımsız olarak renk sıcaklığı (kelvin – “K”) parametresi de bulunmaktadır. Tarımsal uygulamalarda ışık görünen renginden daha çok spektral kompozisyonu önemli olduğundan kelvin, sıkça kullanılmayan ve kullanılması doğru olmayan bir parametre olmakla birlikte, özellikle LED aydınlatma elemanlarında renk sıcaklığı değerinden de bahsedildiği

görülmektedir. Şekil 4’te kelvin renk sıcaklığı çizelgesi verilmiştir. Öğle vakti güneş ışığının sıcaklığı 5000 K civarındadır. Kelvin değeri yükseldikçe ışığın rengi mavi tonlarına kayarken düştükçe turuncu-kırmızı tonları vermeye başlamaktadır. Kelvin değeri aynı olsa bile lambalar arasında spektral kompozisyonda oldukça büyük farklılıklar olabilmektedir.



Şekil 4. Kelvin renk sıcaklığı çizelgesi

2. BİTKİSEL AYDINLATMA

Bitkisel üretimde aydınlatma denildiğinde üç tip aydınlatma sistemi akla gelmektedir. Bunlar, seralarda kullanılan ve güneş ışığının yeterli olmadığı durumlarda (sonbahar – ilkbahar) devreye alınarak günlük ışık integralini tamamlamaya yarayan sistemler (ek aydınlatma), ışık ihtiyacının tamamının yapay olarak sağlandığı yapay aydınlatma ve fotoperiyodik aydınlatmadır. Fotoperiyodik aydınlatma; karanlık devrenin kırılması ve bitkilerin gün uzunluğu algısının değiştirilmesi için uygulanan düşük

yoğunluklu (~2 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) aydınlatma biçimidir. Kısa gün bitkilerinde çiçeklenmenin teşvik edilmesi için kullanılmaktadır.

2.1. Aydınlatma Elemanları

Günümüzde genel olarak kullanılan tarımsal aydınlatma lambaları aşağıdaki şekilde sıralanabilir:

- Floresan
- Yüksek yoğunluklu deşarj (HID)

- Yüksek basınçlı cıva (HPM)
- Yüksek basınçlı sodyum (HPS)
- Metal-halide (MH)
- LED

Akkor filamanlı lambalar, tarımsal aydınlatmada önceki yıllarda kullanılmış olsa da düşük enerji verimleri (%1 – 5), düşük ışık etkinliği ($<20 \text{ lm W}^{-1}$) ve uygun olmayan spektrumları sebebiyle günümüzde tarımsal üretimde kullanılmamaktadır. Ayrıca bu lambaların üretimi, ithalatı ve satışı yasaklanmaya başlamıştır.

2.1.1. Floresan lambalar

Floresan lambalar, düşük basınçlı cıva buharlı deşarj lambalarıdır. Bir cam tüpün içine argon ve cıva buharı doldurularak her iki ucuna tungsten filamanlar yerleştirilerek elde edilirler. İki filaman arasında oluşan elektron geçişi, cıva atomları ile çarpışarak UV ışık üretmektedir. Oluşan UV ışık, tüpün içine uygulanmış fosfor katmanı tarafından soğurularak görülür spektrumda ışık üretilmektedir. Fosfor katmanının kalınlığı ve bileşimi, floresan lambanın spektrumunu belirlemektedir. Floresan lambalar, tüp şeklinde olabildikleri gibi çeşitli şekillerde bükülerek “kompakt floresan” yapıda da bulunmaktadır (Şekil 5).



Şekil 5. Floresan lamba (solda), kompakt floresan lamba (sağda)

Geniş spektrumlarıyla floresan lambalar, bitkisel üretimde ilk kullanılan ve hala kullanılmakta olan lambalardandır. Floresan lambaların toplam enerji verimi %30'un altındadır (Shur ve Zukauskas 2005). Işık etkinliği $50 - 100 \text{ lm W}^{-1}$ arasında olmakla beraber spektrumunun büyük bölümü (~%90) PAR bölgesindedir. 5 Watt ile 125

Watt arasında çeşitli güçlerde üretilen floresan lambalar bulunmaktadır. Floresan lambaların ömrü 1000 ile 30 000 saat arasındadır (Dutta Gupta ve Agarwal 2017). Yapılan bir çalışmada floresan lambanın enerji verimi %27 olarak tespit edilmiştir (Tanushevski ve Rendevski 2016).

Floresan lambalar; günümüzde doku kültürü laboratuvarları, seralar, fide üretim tesisleri ve dikey tarım sistemlerinde kullanılmaktadır. Süs bitkisi üreticiliği yapılan seralarda fotoperiyodik aydınlatma amacıyla genellikle yüksek güçlü (75 – 105 W) kompakt floresan lambalar tercih edilmektedir.

Floresan lambalar çalışmak için balasta ihtiyaç duymaktadırlar. Balastlar elektromanyetik olabileceği gibi günümüzde elektronik balastlar da bulunmaktadır. Floresan lamba armatürleri, tek floresan lamba ile balastından oluşabileceği gibi aynı güçteki floresan lambaların yan yana dizilmesiyle de elde edilebilmektedir. Birden fazla floresan kullanıldığı durumlarda ortak balast kullanımı söz konusu olabilmektedir. Bu durumda genel enerji verimi artış göstermektedir. Bazı floresans lamba armatürlerinde koruma sınıfı IP66'ya kadar çıkmaktadır.

Kompakt floresan lambalar, elektronik balasta sahip E27 standart lamba duyuna takılabilecek şekilde imal edilmektedir. Bu sebeple daha kolay kurulum sağlanırken koruma sınıfı da düşmektedir.

2.1.2. Yüksek yoğunluklu deşarj lambaları

Çokyüksek basınç ve sıcaklık altında çalışan bu lambalar, floresan lambalarla aynı prensiplere göre çalışmaktadır. Ancak sıcaklık daha yüksek olduğu için elektronların enerji seviyesi, dolayısıyla ışık verimi artmaktadır. HPM (Yüksek basınçlı cıva), HPS (Yüksek basınçlı sodyum) ve MH (Metal-halide) lambalar bu grupta yer almaktadır. Çalışmak için balasta ihtiyaç duyan bu lambalar, genellikle E40 lamba duyuna takılmaktadır. Dolayısıyla bir HID lamba armatürü; lamba, balast, ateşleyici, armatür kasası ve ön koruma camından (tercihen) oluşmaktadır (Şekil 6).



Şekil 6. HID lamba armatürleri

HID lambalar, farklı koruma sınıflarına haiz olabilirler. Bitkisel aydınlatmada kullanılan HID lamba armatürlerinin balast ve elektronik komponentlerinin bulunduğu kısım IP65 koruma sınıfına girerken; lamba kısmı, spektrumun bozulmaması ve ısının dağılması amacıyla koruma camsız olduğundan IP23 koruma sınıfına girmektedir. Dolayısıyla bu armatürlerin lamba kısmı sudan ve sert cisimlerden uzak tutulması gerekmektedir. HID lambaların güç çıkışı ayarlanabilmektedir ancak verimli değildir. HID lambalar, içinde bulunan element buharlarına göre farklı spektrumlarda ışık yayarlar ve farklı adlandırılırlar.

Yüksek basınçlı cıva buharlı (HPM) lambalar

HPM lambalar, floresan lambalara benzer spektrumda ışık yaymaktadır. Işık etkinliği 60 lm W^{-1} civarında olan HPM lambalar, tarımsal kullanım amaçlı 100 Watt ile 250 Watt arasında çeşitli güçlerde üretilmektedir (Şekil 7). Daha yüksek güçlerde UV ışık yayan HPM lambalar bulunmaktadır. Ömrü 10 000 – 20 000 saat olan HPM lambaların kullanımı, Avrupa Birliği tarafından cıva içerdikleri için çevreye verdikleri zarar gerekçesiyle 2015 yılında yasaklanmıştır (Tähkämö vd. 2016).

Yüksek basınçlı sodyum buharlı (HPS) lambalar

HPS lambalar, günümüzde seralarda ek aydınlatma amacıyla en çok kullanılan aydınlatma elemanlarıdır (Wollaeger 2016) (Şekil 8).



Şekil 7. HPM (yüksek basınçlı cıva) lamba



Şekil 8. HPS (yüksek basınçlı sodyum) lamba

Yüksek ışık etkinliğine ($80 - 125 \text{ lm W}^{-1}$) ve yüksek foton etkinliğine ($1.7 \mu\text{mol s}^{-1} \text{ W}^{-1}$) sahip olan HPS lambalar 35 Watt ile 1000 Watt arasında çeşitli güçlerde üretilmektedirler. Ömür beklentisi 10 000 ila 30 000 saat arasında olan HPS lambaların spektrumu, ağırlıklı olarak sarı-kırmızı bölgede (2200 K) yer almaktadır. HPS lambaların enerji verimi %37 seviyesindedir (Rofaie vd. 2022). Bu spektrum çiçeklenmeye yardımcı olsa da genel üretim için tek başına yeterli değildir. Gerekli durumlarda LED aydınlatmalarla birlikte hibrit uygulamalarla spektral dağılım düzeltilmeye çalışılmaktadır. Ayrıca son yıllarda reflektörü hareketli olan fotoperiyodik aydınlatma armatürlerinde de HPS lambalar kullanılmaktadır. Bu şekilde lambadan çıkan ışığın bitkiler üzerinde sürekli olarak dolaştırılmasıyla bitkilerin gün uzunluğunu farklı algılaması sağlanırken daha büyük alanda daha düşük güçlü armatür kullanmak mümkün olmaktadır.

HPS lambalar da diğer HID lambalar gibi çalışmak için bir balasta ihtiyaç duyarlar. Daha önce HPM lamba kullanan tesislerde balast ve armatür değişimi olmaksızın HPS lambaların kullanılabilmesi için özel amaçlı HPS lambalar da geliştirilmiştir. Bu lambalar doğrudan HPM lamba balastı ve ateşleyicisi ile kullanılabilir. Bu sayede özellikle şehir aydınlatmasında kullanılan HPM lambaların düşük maliyetle HPS'e dönüştürülmesi sağlanmıştır.

Metal halide (MH) lambalar

MH lambalar ise HPM lambaların içine cıvaya ek olarak çeşitli metallerin ve inert gazların eklenmesiyle ortaya çıkmış lambalardır (Şekil 9). Eklenen bu bileşenlerden her biri farklı bir dalga boyunda ışınım yaratmaktadır. Sodyum, indiyum, talyum, disprosyum gibi metaller ile farklı spektrumlar elde edilebilmektedir (Simpson 2013).

MH lambaların spektral dağılımı daha düzgün olarak ve arzu edilen şekilde üretilmektedir. 100 – 120 lm W⁻¹ gibi yüksek bir ışık etkinliğine ve yaklaşık %25 verime sahip MH lambalar, tarımsal üretimde kullanılmaya elverişlidir (Dutta Gupta ve Agarwal 2017). Ömür beklentisi 6000 – 15 000 saat arasındadır.

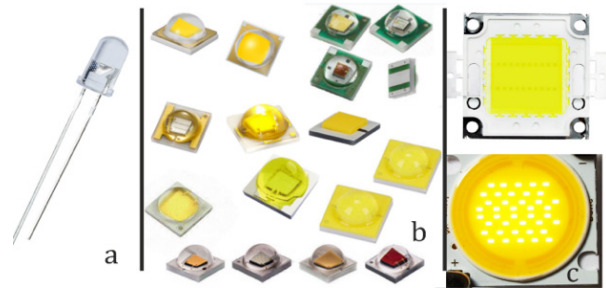
2.1.3. LED lambalar

LED (Light Emitting Diode – Işık Yayan Diyot) lambalar, yarıiletken bir diyot üzerinden akım aktırılması sırasında elektronların yüksek enerjili orbitallerden daha düşük enerjili orbitallere geçişi sırasında ışık yayması esasına dayanan lambalardır (Iceland vd., 2014). İlk LED lamba 1962 yılında üretilmiştir ve kırmızı renktedir. Özellikle 1990'lardan sonra LED teknolojisi gelişmiştir (Krames 2016). Farklı yarıiletken malzemeler kullanılarak farklı renklerde üretilen LED lambalar, yapılan çalışmalarla gün geçtikçe daha yüksek ışık etkinliği ve daha yüksek foton verimine ulaşmaktadır (Dutta Gupta ve Agarwal 2017).

LED lambalar, bacaklı (dual in-line package – DIP), yüzey montajlı (surface mount device – SMD) veya paketlenmiş dizili (chip on-board – COB) yapılarda bulunabilmektedir (Şekil 10).



Şekil 9. MH (metal halide) lamba



Şekil 10. LED lambalar (a. DIP, b. SMD, c. COB)

COB LED'lerin tarımsal aydınlatmada kullanım alanı sınırlıdır. Bu lambalar, birden fazla (genelde 9 veya daha fazla) LED yarıiletkeninin aynı substrat üzerine yerleştirilmesiyle oluşturulmuş aydınlatma modülleridir (Pohl vd. 2020). Tek tek LED yerleştirmeye göre kolay olsa da belirli bir standardı yoktur. Büyüklükleri firmadan firmaya farklılık göstermektedir. Bu LED lambaların termal direnci yüksektir.

Tarımsal aydınlatmada SMD montajlı FC (flip chip – ters yonga) orta ve yüksek güçlü LED lambalar tercih edilmektedir. FC teknolojisinde LED lambanın anot ve katodu soğutucu katmanın altında yer almakta ve bu sayede termal direnç düşürülmektedir (Tan vd. 2008). LED lambaların verimi ve ömrü, yarıiletken malzemenin sıcaklığına bağlıdır. Sıcaklık arttıkça verimlilik ve kullanım ömrü azalmaktadır. LED lambaların ışık etkinliği fotometrik olarak 150 – 300 lm W⁻¹, fotonmetrik olarak 1.7 – 2.8 µmol s⁻¹ W⁻¹ seviyesindedir. LED armatürlerin enerji verimi ise sürücü, LED çipi, koruma camı gibi tüm etmenlerin verimi kullanılarak %67 olarak hesaplanmaktadır (Kusuma vd. 2020).

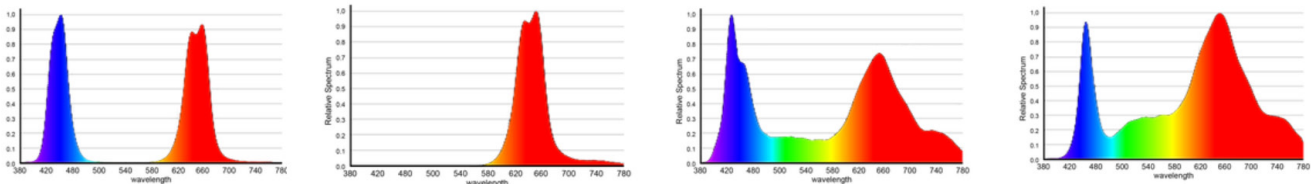
LED armatürler, LED lambaların bir PCB (printed circuit board – baskılı devre kartı) üzerine uygun voltaj ve akıma göre paralel ve seri olacak şekilde dizilmesiyle elde edilmektedirler. Bu dizilmiş LED sıraları, bir alüminyum şasi içine koyularak ön tarafı cam veya plastik malzeme ile kapatılarak uygun akımda (genellikle 350 – 700 – 1400 mA) bir sabit akım LED sürücüsü ile sürülmektedir (Şekil 11). LED sürücüsü armatürün içinde veya harici bir ünite olarak bulunabilmektedir.

LED sürücüsünün armatür dışında olması armatür sıcaklığının daha düşük olmasını sağlar ancak sürücü ile armatür arasında doğrusal akım kablolaması gerekmektedir. Doğrusal akım kablolaması alternatif akım kablolamasına göre oldukça pahalıdır. Son yıllarda piyasaya çıkan ürünler ile LED sürücüler tek bir ünite olarak sera veya bitki fabrikasının dışına yerleştirilerek armatürlerin termal yükü sistemin dışında bırakılmaya başlanmıştır (Celidonio vd. 2014). LED armatürlerin koruma sınıfı IP 68'e kadar çıkabilmektedir. Bu koruma sınıfında armatür içine herhangi bir toz veya su (en az 1 metre derinliğe kadar) girmeyeceği garanti edilmektedir.



Şekil 11. LED armatür

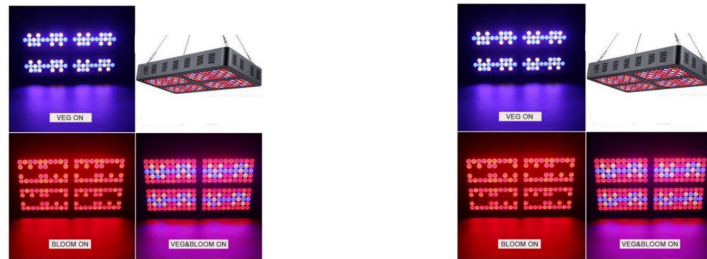
LED armatürlerde uygun spektrumda aydınlatma elde etmek için çeşitli spektrum ve dalga boylarında (grow light, full spectrum, 4000 K, 6500 K, 660 nm, 730 nm, 440 nm, vb.) LED lambalar tek başına veya bir arada kullanılabilir. Bu sayede vejetatif gelişme, generatif gelişme gibi amacına uygun armatürler tasarlanabilmekte ve üretilebilmektedir (Şekil 12).



Şekil 12. LED armatürlerle oluşturulabilecek çeşitli spektrum örnekleri

Günümüzde aynı armatür içinde hem vejetatif hem generatif gelişmeye uygun LED dizilimleri bir arada bulunabilmektedir (Şekil 13). Bu dizilimlerden istenen

bir tanesi çalıştırılabilir. Aynı zamanda LED lambaların ışık şiddeti, üzerinden geçen akım düşürülerek kısılabilmektedir.



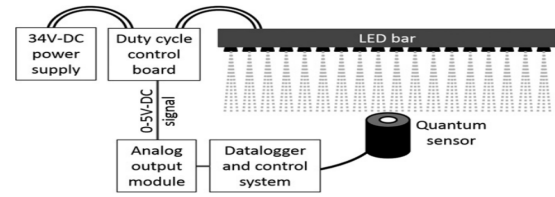
Şekil 13. Dual spektrum bitki lambası

LED lambaların ömrü optimum şartlarda 25 000 – 100 000 saat arasında olmakla birlikte L70 denen ve ışık etkinliğinin %70'ine düştüğü nokta yaklaşık 50 000 saat civarındadır. 100 000 saat sonunda ışık etkinliğinin

%50'sine düştüğü L50 noktasına ulaşılmaktadır. İyi bir armatür verimi için armatürler L70 noktasına ulaştığında değiştirilmelidir. Bu süre, armatürün tasarımı ve ortam sıcaklığına göre değişkenlik gösterebilmektedir.

3. AYDINLATMANIN PLANLANMASI

Tamamen yapay aydınlatma yapılan bitki üretilen tesislerinde (bitki fabrikası) aydınlatmanın açık olduğu saatler ile kapalı olduğu saatlerin iyi bir şekilde ayarlanması gerekmektedir. Yaprağı yenen sebzeler için genellikle 16 saatlik aydınlatma uzunluğu tavsiye edilmektedir. Bu süreyi elektrik birim fiyatının daha ucuz ve dış sıcaklığın daha düşük olduğu gece saatlerine denk getirmek maliyetleri düşürmek açısından faydalı olmaktadır. Bazı bitki fabrikalarında ise termal yükün dağıtılması açısından aydınlatma sistemleri birbiri ile sıralı olarak yakılmaktadır (Kozai ve Niu 2016). Ek aydınlatma sistemleri ise güneş ışığının yetersiz olduğu günlerde gün boyunca yakılabileceği gibi güneşin batışını takiben de yakılabilir. Ancak bu saatler elektrik fiyatının en yüksek olduğu “puant” saatlere denk geleceğinden ek aydınlatmanın güneş doğmadan önce yapılması da düşünülebilir. Aydınlatma armatürleri elle devreye alınabileceği gibi bir otomasyon sistemi tarafından zamana bağlı veya o gün içinde ulaşılan DLI değerine bağlı olarak çalıştırılabilmektedir. Kısıtlı açılabilen (dimlenebilir) armatürlerde adaptif aydınlatma kontrolü ile gün içinde arzu edilen PPFD değerini sürekli koruyacak şekilde programlama yapılabilmektedir. Yürütülen bir araştırmada aydınlatma elemanlarının güneşten gelen PPFD değerine göre parlaklığı değiştirilmiş ve sürekli yanan armatürlere göre ve %20 ile %92 arasında enerji tasarrufu sağlandığı tespit edilmiştir (Van Iersel ve Gianino 2017) (Şekil 14).



Şekil 14. Adaptif aydınlatma kontrolü

4. TARTIŞMA

Bu çalışmada incelenen her bir yapay aydınlatma armatürünün teknik özellikleri ve avantajları değerlendirildiğinde, tarımsal aydınlatma uygulamaları için en uygun seçeneklerin belirlenmesi mümkündür. HID lambalar, geleneksel bir seçenek olarak kullanılmaktadır. Işık etkinliği ve enerji verimliliği açısından orta seviyede performans gösterirler. Ancak, ömrü diğer seçeneklere göre daha kısa ve spektrumları sınırlıdır. Bu nedenle, günümüzde tercih edilmemektedir. Yapılan çalışmalarda çeşitli LED armatürleri ile HPS armatürleri karşılaştırılmış ve harcadıkları birim enerji başına ürettikleri birim fotosentetik foton bakımından bir fark olmadığı bildirilmiştir (Nelson ve Bugbee 2014; Wallace ve Both 2016).

Floresan lambalar, düşük maliyetli ve kolay bulunabilir olmaları nedeniyle yaygın olarak kullanılmaktadır. Ancak, ışık etkinliği ve enerji verimliliği açısından HID lambalarına kıyasla daha düşüktürler. Ayrıca, ömrü de diğer seçeneklere göre daha kısadır.

LED lambalar, modern tarımsal aydınlatma uygulamaları için en uygun seçenektir. Yüksek ışık etkinliği ve enerji verimliliği ile öne çıkarlar. Ayrıca, uzun ömürlüdürler ve geniş bir spektral çeşitlilik sunarlar. Güç tüketimi açısından da diğer seçeneklere göre daha düşüktürler.

Bu çalışmada incelenen armatürler arasında bir karşılaştırma, Tablo 4'te verilmiştir.

Tablo 4. Çeşitli aydınlatma elemanlarının karşılaştırması

	Floresan	HID			LED
		HPM	HPS	MH	
Işık Etkinliği (lm W ⁻¹)	50 – 100	60	80 – 125	100 – 120	150 – 300
Enerji Verimi	%27	%40	%37	%25	%67
Ömür	1000 – 30 000	10 000 – 20 000	10 000 – 30 000	6000 – 15 000	25 000 – 100 000
Spektrum	Az çeşitli	Sabit	Sabit	Sabit	Çok çeşitli
Ölçü (uzunluk)	15 – 244 cm	15 – 61 cm			5 – sınırsız cm

Güç	4 – 125 W	50 – 1000 W	35 – 1000 W	35 – 2000 W	5 – 200 W
Koruma Sınıfı	IP66	IP23			IP68
Avantajları	Kolay bulunabilir	Uygun fiyat	Kırmızı – sarı spektrum	Gün ışığına benzer spektrum	Spektrum seçenekleri, düşük enerji tüketimi
Dezavantajları	Düşük verim, sınırlı spektrum	Düşük ışık etkinliği, yüksek güç tüketimi, sınırlı spektrum, kısa ömür			Yüksek başlangıç maliyeti

SONUÇ

Bitki yetiştirmek için ışığın tamamının yapay olarak karşılandığı veya güneş ışığına ek olarak aydınlatma yapılması fikri, ampulün bulunuşundan beri süregelmektedir. Akkor flamanlı, floresan ve HID lambalar uzun yıllardır seralarda kullanılıyor olsa da kısa ömürleri ve yüksek enerji tüketimleri sebebiyle ekonomik olmamaktadır. Teknolojik gelişmelerle birlikte özellikle LED aydınlatma sistemleri gittikçe daha verimli hale gelmektedir. LED'lerin düşük enerji tüketimleri, spektral kaliteleri, uzun ömürleri ve kontrol edilmeye elverişli oluşları sebebiyle kapalı ve açık üretim tesislerinde kullanım için oldukça elverişli olduğu görülmektedir.

Diğer taraftan, yapay ve ek aydınlatma sistemleri, bitki fabrikalarında en yüksek, seralarda ise görece yüksek ilk yatırım ve işletme maliyetlerine sebep olmaktadır. Dikkatli bir planlama, armatür seçimi, yerleşim ve kontrol aracılığıyla maliyetler düşürülürken verim artışı sağlanabilmektedir. Yapay veya ek aydınlatma kullanıldığında elde edilecek ek ürün ile harcanacak elektrik enerjisi arasında hesaplama yaparak tüm planlamalar yapılmalıdır.

AÇIKLAMA

Bu derlemede yazarlar arasında herhangi bir çıkar çatışması bulunmamaktadır. Yazarlar katkı oranına göre sıralanmıştır.

KAYNAKLAR

al Murad, M., Razi, K., Jeong, B. R., Muthu, P., Samy, A., & Muneer, S. (2021). Light Emitting Diodes (LEDs) as Agricultural Lighting: Impact and Its Potential on Improving Physiology, Flowering, and Secondary Metabolites of Crops. *Sustainability*, 13(1985). <https://doi.org/10.3390/su13041985>

Benedetti, M., Vecchi, V., Barera, S., & Dall'Osto, L. (2018). Biomass from microalgae: the potential

of domestication towards sustainable biofactories. *Microbial Cell Factories*, 17(1), 173. <https://doi.org/10.1186/s12934-018-1019-3>

Boyle, G. (2012). *Renewable energy: power for a sustainable future* (Vol. 3). Oxford University Press.

Brazaitytė, A., Viršilė, A., Samuolienė, G., Jankauskienė, J., Sakalauskienė, S., Sirtautas, R. A., Novičkovas, A., Dabašinskas, L., Vaštakatiė, V., Miliauskienė, J., & Duchovskis, P. (2016). Light quality: growth and nutritional value of microgreens under indoor and greenhouse conditions. *Acta Horticulturae*, 1134, 277–284. <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2016.1134.37>

Celidonio, M., Fionda, E., Pulcini, L., Sergio, E., & di Zenobio, D. (2014). A centralised DC power supply solution for LED lighting networks. *2014 IEEE International Energy Conference (ENERGYCON)*, 1137–1143. <https://doi.org/10.1109/ENERGYCON.2014.6850566>

CIE. (2020). *CIE S 017/E:2020*. <https://doi.org/10.25039/S017.2020>

Dutta Gupta, S. (Ed.). (2017). *Light Emitting Diodes for Agriculture*. Springer Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3>

Dutta Gupta, S., & Agarwal, A. (2017). Artificial Lighting System for Plant Growth and Development: Chronological Advancement, Working Principles, and Comparative Assessment. In S. Dutta Gupta (Ed.), *Light Emitting Diodes for Agriculture: Smart Lighting* (pp. 1–25). Springer Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-10-5807-3_1

Fujiwara, K. (2016). Radiometric, Photometric and Photonmetric Quantities and Their Units. In *LED Lighting for Urban Agriculture* (pp. 367–376). https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_26

Goto, E. (2016). Measurement of Photonmetric and Radiometric Characteristics of LEDs for Plant Cultivation. In *LED Lighting for Urban Agriculture* (pp. 395–402). https://doi.org/10.1007/978-981-10-1848-0_26

0_28

- He, A. N., & Yao, Y. (2002). Analysis of Net Photosynthetic Rate, Transpiration Rate Change and Its Influencing Factors of Saxifrage in Winter. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences*, 24, 1298–1302.
- Hogewoning, S., Trouwborst, G., Maljaars, H., Poorter, H., Ieperen, W., & Harbinson, J. (2010). Blue light dose–responses of leaf photosynthesis, morphology, and chemical composition of *Cucumis sativus* grown under different combinations of red and blue light. *Journal of Experimental Botany*, 61, 3107–3117. <https://doi.org/10.1093/jxb/erq132>
- Kozai, T., & Niu, G. (2016). Plant Factory as a Resource-Efficient Closed Plant Production System. In *Plant Factory* (pp. 69–90). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-801775-3.00004-4>
- Krames, M. R. (2016). Status and Future Prospects for Visible-Spectrum Light-Emitting Diodes. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 47(1), 39–41. <https://doi.org/10.1002/sdtp.10594>
- Kusuma, P., Pattison, P., & Bugbee, B. (2020). From physics to fixtures to food: current and potential LED efficacy. *Horticulture Research*, 7.
- Nelson, J. A., & Bugbee, B. (2014). Economic Analysis of Greenhouse Lighting: Light Emitting Diodes vs. High Intensity Discharge Fixtures. *PLoS ONE*, 9(6), e99010. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0099010>
- Öztekın, G. B., & Türe, K. (2019). Tam Spektrumlu Gün Işığı Floresan Lamba ile Yapay Işıklandırmanın Marulda Fide Kalitesine Etkisi. *Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 56(4), 437–445. <https://doi.org/10.20289/zfdergi.534300>
- Pohl, L., Hantos, G., Hegedus, J., Németh, M., Kohári, Z., & Poppe, A. (2020). Mixed Detailed and Compact Multi-Domain Modeling to Describe CoB LEDs. *Energies*, 13, 4051. <https://doi.org/10.3390/en13164051>
- Rofaie, N. S. A., Phoong, S. W., & Abdul Talib @ Abdul Mutalib, M. (2022). Light-Emitting Diode (LED) versus High-Pressure Sodium Vapour (HPSV) Efficiency: A Data Envelopment Analysis Approach with Undesirable Output. *Energies*, 15(13), 4589. <https://doi.org/10.3390/en15134589>
- Runkle, E. (2019). *DLI 'Requirements.'* <https://gpnmag.com/article/dli-requirements/>
- Shivling, V. D., & Ghanshyam, C. (2012). Computational Analysis of Photosynthesis Measurement System using Multivariate Data Analysis. *International Journal of Applied Science & Technology Research Excellence Vol. 2, Issue 2, Mar – Apr, 2012, ISSN NO. 2250 – 2718 (Print), 2250 – 2726 (Online).*
- Iveland, J., Speck, J., Martinelli, L., Peretti, J., & Weisbuch, C. (2014). Auger effect identified as main cause of efficiency droop in LEDs. *SPIE Newsroom*. <https://doi.org/10.1117/2.1201406.005109>
- Korczynski, P. C., Logan, J., & Faust, J. E. (2002). Mapping Monthly Distribution of Daily Light Integrals across the Contiguous United States. *HortTechnology*, 12(1), 12–16. <https://doi.org/10.21273/HORTTECH.12.1.12>
- Shur, M. S., & Zukauskas, R. (2005). Solid-State Lighting: Toward Superior Illumination. *Proceedings of the IEEE*, 93(10), 1691–1703. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2005.853537>
- Simpson, R. (2013). *Lighting Control*. Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780080926766>
- Tähkämö, L., Räsänen, R.-S., & Halonen, L. (2016). Life cycle cost comparison of high-pressure sodium and light-emitting diode luminaires in street lighting. *The International Journal of Life Cycle Assessment*, 21. <https://doi.org/10.1007/s11367-015-1000-x>
- Tan, L., Li, J., Liu, Z., Wang, K., Wang, P., Gan, Z., & Liu, S. (2008). A light emitting diode's chip structure with low stress and high light extraction efficiency. In *Proceedings - Electronic Components and Technology Conference*. <https://doi.org/10.1109/ECTC.2008.4550063>
- Tanushevski, A., & Rendevski, S. (2016). Energy Efficiency Comparison between Compact Fluorescent Lamp and Common Light Bulb. *European J of Physics Education*, 7(2), 21–27. <https://doi.org/10.20308/ejpe.88140>
- van Iersel, M. W., & Gianino, D. (2017). An Adaptive Control Approach for Light-emitting Diode Lights Can Reduce the Energy Costs of Supplemental Lighting in Greenhouses. *HortScience Horts*, 52(1), 72–77. <https://doi.org/10.21273/HORTSCI11385-16>
- Wallace, C., & Both, A. J. (2016). Evaluating operating characteristics of light sources for horticultural applications. *Acta Horticulturae*, 1134, 435–444.
- Wollaeger, H. (2016). *Choose the right light*. Greenhouse Management. <https://www.greenhousemag.com/article/choose-the-right-light/>