

**T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SERALAR İÇİN LED LAMBALI AYDINLATMA OTOMASYON SİSTEMİNİN
TASARLANMASINA VE UYGULANMASINA YÖNELİK BİR ÇALIŞMA**

Nuri ÇAĞLAYAN

**DOKTORA TEZİ
TARIM MAKİNALARI ANABİLİM DALI**

2013

**T.C.
AKDENİZÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**SERALAR İÇİN LED LAMBALI AYDINLATMA OTOMASYON SİSTEMİNİN
TASARLANMASINA VE UYGULANMASINA YÖNELİK BİR ÇALIŞMA**

Nuri ÇAĞLAYAN

**DOKTORA TEZİ
TARIM MAKİNALARI ANABİLİM DALI**

Bu tez 2011.03.0121.001 proje numarasıyla, Akdeniz Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi tarafından desteklenmiştir.

2013

T.C.
AKDENİZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

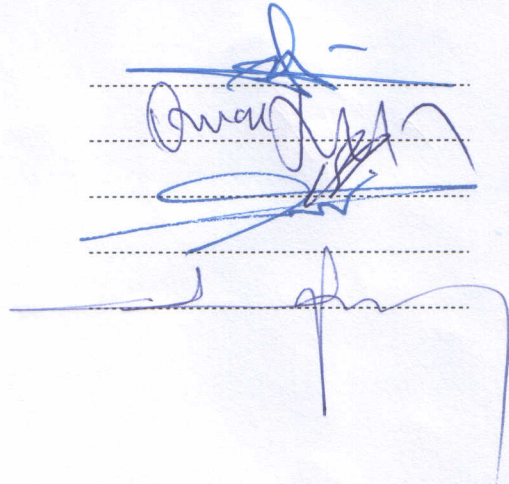
SERALAR İÇİN LED LAMBALI AYDINLATMA OTOMASYON SİSTEMİNİN
TASARLANMASINA VE UYGULANMASINA YÖNELİK BİR ÇALIŞMA

Nuri ÇAĞLAYAN

DOKTORA TEZİ
TARIM MAKİNALARI ANABİLİM DALI

Bu tez 24 / 05 / 2013 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Oybirliği / ~~Oyçokluğu~~ ile kabul edilmiştir.

Prof. Dr. Can ERTEKİN
Prof. Dr. Osman YALDIZ
Prof. Dr. Nurgül ERCAN
Prof. Dr. Ali BAŞÇETİNÇELİK
Doç. Dr. Ahmet YARDIMCI



ÖZET

SERALAR İÇİN LED LAMBALI AYDINLATMA OTOMASYON SİSTEMİNİN TASARLANMASINA VE UYGULANMASINA YÖNELİK BİR ÇALIŞMA

Nuri ÇAĞLAYAN

Doktora Tezi, Tarım Makinaları Anabilim Dalı
Danışman: Prof. Dr. Can ERTEKİN
Mayıs 2013, 144 sayfa

Bu araştırmada, sera ve bitki yetiştirme odaları için LED (Light Emitting Diode) lambalı bir aydınlatma otomasyon sistemi tasarlanmış ve bir örneğinin imalatı yapılmıştır.

Çalışmada lambaya ait ışık dağılım performansı, güç tüketimi ve çalışma sürecindeki ısı analiz verileri değerlendirilmiştir. Ek olarak, domates (*Solanum lycopersicum*) fideleri üzerinde örnek uygulamalar gerçekleştirilmiş ve elde edilen deneysel veriler değerlendirilmiştir. Deneysel sonuçlara göre; soğuk beyaz, kırmızı, mavi, morötesi (UV-A), kırmızı-mavi, kırmızı-mavi-morötesi ve tüm LED grupları aktif olduğu zaman elde edilen en yüksek fotosentetik aktif ışınım (PAR) değerleri sırasıyla, 824.5, 967.7, 173.3, 38.2, 1129.3, 1141.3 ve 1784.5 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ olurken aydınlık şiddeti değerleri ise sırasıyla, 57210, 29660, 1992, 519.3, 31110, 30300 ve 82620 lx olarak elde edilmiştir. Öte yandan LED lamba için sayısal yöntem tabanlı ısı analizler yapılmış ve sonuçlara göre LED lamba için uygun bir soğutucu seçimi üzerinde durulmuştur.

Çalışma sonucunda tarımsal üretimde ihtiyaç duyulan aydınlatma değerlerini sağlayabilen bir aydınlatma otomasyon sisteminin tasarımı ve uygulaması başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma ile LED ışığının özelliklerine ve bitkiler üzerindeki etkilerine dair gözlem ve inceleme sonuçları verilmiştir. LED ışık kaynaklarının verdiği olanaklar, yüksek kaliteli sera yetiştiriciliği için artan talebin karşılanmasına ve doğal çevrenin korunmasına katkılar sağlayacaktır. Buna ilave olarak bu sonuçlar oldukça geniş bir perspektif ve doku kültürü ve bitki yetiştirme odaları gibi tarımsal üretim araştırma alanlarında gelecek çalışmalar için yararlı katkılar sağlayacaktır.

ANAHTAR KELİMELELER: LED Bitki Yetiştirme Lambası, Aydınlatma Otomasyon Sistemi, Aydınlık Şiddeti, Fotosentetik Aktif Işınım (PAR), Isıl Analiz.

JÜRİ: Prof. Dr. Can ERTEKİN (Danışman)
Prof. Dr. Osman YALDIZ
Prof. Dr. Nurgül ERCAN
Prof. Dr. Ali BAŞÇETİNÇELİK
Doç. Dr. Ahmet YARDIMCI

ABSTRACT

A RESEARCH ON DESIGN AND IMPLEMENTATION OF LIGHTING AUTOMATION SYSTEM WITH LED LAMP FOR GREENHOUSES

Nuri AĞLAYAN

PhD Thesis in Department of Agricultural Machinery

Supervisor: Prof. Dr. Can ERTEKİN

May 2013, 144 pages

In this research, a LED (Light Emitting Diode) growth lighting automation system, which is aimed to use in greenhouses and plant growth chambers was designed and its prototyping has been conducted.

In the study, light distribution performance, power consuming and thermal condition of the LED packs were considered. Additionally, a case study was presented on tomato (*Solanum lycopersicum*) seedlings and their experimental results have been evaluated. According to the experimental results, maximum photosynthetically active radiation (PAR) values of 824.5, 967.7, 173.3, 38.2, 1129.3, 1141.3, 1784.5 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ and maximum illuminance values of 57210, 29660, 1992, 519.3, 31110, 30300 and 82620 lx were obtained for Cool White, Red, Blue, UV-A, Red-Blue, Red-Blue-UV-A and total of LED groups respectively. A numerical method based thermal analysis was conducted for the LED lamp considering the simulation results a heat sink selection has been conducted for the LED lamp.

Finally, design of a led lighting automation system, which can provide desired lighting values, and its implementation to the agricultural production has been concluded with success. Possibilities of the LED light sources can contribute to provide to the increasing demand for high quality horticultural products and to the conservation of natural environment. These results would provide a quite wide perspective and useful contributions for future studies in the agricultural production research fields such a plant tissue culture and plant growth chambers.

KEYWORDS: LED Growth Light, Lighting Automation System, Illuminance, Photosynthetically Active Radiation (PAR), Thermal Analysis.

COMMITTEE: Prof. Dr. Can ERTEKİN (Supervisor)
Prof. Dr. Osman YALDIZ
Prof. Dr. Nurgöl ERCAN
Prof. Dr. Ali BAŞÇETİNÇELİK
Assoc. Prof. Dr. Ahmet YARDIMCI

ÖNSÖZ

Katı hal LED (Light Emitting Diode: Işık Yayan Diyot) aydınlatma sistemlerinin aydınlatma alanındaki kısa tarihlerine oranla, etkinlik faktörleri çok hızlı bir gelişim göstermiştir. Özellikle elektrik enerjisinin çok az kayıpla ışık enerjisine çevrilebilmesinden ötürü diğer yapay ışık kaynaklarına oranla önemli derecede avantajlar sağlamaktadır. Dekoratif ve genel aydınlatma uygulamalarında yaygın şekilde kullanılan LED aydınlatma sistemleri, artık tarımsal alandaki pek çok aydınlatma uygulamasında da tercih edilmektedir.

LED bitki yetiştirme lambaları, geleneksel yapay ışık kaynaklarına göre ilk yatırım masrafları bakımından halen dezavantajlıdır. Fakat etkinlik faktörlerinin yüksek olması, yüksek ömürlere ulaşılabilmesi ve fotosentez etkinliğini artırıcı farklı dalga boylarında ışık verebilmeleri nedeniyle bitkisel üretim amaçlı uygulamalarda yakın gelecekte önemli bir yer almaya ve bu alanda daha yaygın kullanılmaya adaylardır.

Bu çalışmayla gerçekleştirilen aydınlatma otomasyon sistemi, LED ışığının bitkiler üzerindeki etkilerine dair gözlem ve inceleme fırsatları sunması ve yapılacak araştırma sonuçlarının bilime ve ülkemiz örtü altı yetiştiriciliğine katkılar sağlaması açısından önemlidir. Benzer yerli yapım elektrikli ışık kaynaklarının ve otomasyon sistemlerinin tarımsal alanda kullanımına ve yaygınlaşmasına zemin hazırlaması ve bu konuda çalışanlara yardımcı olması en büyük dileğimdir.

Bu tez çalışmasının her aşamasında desteğini esirgemeyen, bilgi ve deneyimlerinden yararlandığım danışman hocam Sayın Prof. Dr. Can ERTEKİN'e, bölüm olanaklarından yararlanmamı sağlayan Tarım Makineleri Bölüm Başkanlığı'na ve değerli katkılarından ötürü Sayın Arş. Gör. H. Kürşat ÇELİK'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER

ÖZET.....	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ	iii
İÇİNDEKİLER	v
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
ÇİZELGELER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ.....	1
2. KURAMSAL BİLGİLER ve KAYNAK TARAMALARI.....	5
2.1. Işık ve Işınım	5
2.2. Renk Sistemleri	8
2.2.1. Renk sıralama sistemleri	9
2.2.1.1. Ostwald renk sistemi.....	9
2.2.1.2. Munsell renk sistemi	9
2.2.2. Renk uzayları.....	11
2.2.2.1. RGB renk uzayı	12
2.2.2.2. CMY renk uzayı.....	12
2.2.2.3. CIE XYZ renk uzayı	13
2.2.2.4. CIE Lab renk uzayı	14
2.2.3. Renk uzayları arasında dönüşüm.....	15
2.2.3.1. CIE XYZ renk uzayından RGB renk uzayına dönüşüm.....	15
2.2.3.2. CIE XYZ renk uzayından CIE Lab renk uzayına dönüşüm	16
2.2.3.3. RGB renk uzayından CMY renk uzayına dönüşüm	16
2.3. Işığın Bitki Gelişimine Etkisi	17
2.4. Fotosentez İçin Etkin Işınım.....	18
2.4.1. Pigmentler	19
2.4.2. Fotosentez hızını etkileyen faktörler	21
2.5. Fotoperiyodik Aydınlatma	22
2.6. Bitkisel Aydınlatma İçin Tasarım Etmenleri.....	25
2.6.1. Işık miktarı ve yoğunluğu	25
2.6.2. Aydınlatma süresi	26
2.6.3. Işık kalitesi	27
2.7. Fotosentez İçin Etkin Işınımın Yapay Işık Kaynakları ile Sağlanması.....	27
2.7.1. Lamba yerleştirme özellikleri.....	31
2.8. Bitkisel Aydınlatmada Kullanılan Yapay Işık Kaynakları.....	32
2.8.1. Akkor telli lambalar	33
2.8.2. Gaz boşalmalı lambalar	34
2.8.2.1. Cıva buharlı lambalar.....	34
2.8.2.2. Flüorışıl lambalar	35
2.8.2.3. Sodyum buharlı lambalar.....	37
2.8.2.4. Metal halojen lambalar	38
2.8.3. Katı hal lambalar	39

2.8.3.1. LED'lerin elektriksel özellikleri	43
2.9. Yapay Işık Kaynaklarının PAR Yönünden Karşılaştırılması.....	45
2.10. Işık Verimleri ve Maliyetler	49
2.11. LED Bitki Yetiştirme Lambaları	51
2.12. Kaynak Taramaları	52
3. LED LAMBALI AYDINLATMA OTOMASYON SİSTEMİNİN TASARIMI ve UYGULANMASI.....	61
3.1. Optik Tasarım.....	62
3.1.1. LED seçimi.....	62
3.1.2. LED lamba tasarımı	65
3.2. Isıl Tasarım.....	68
3.2.1. LED lamba için gerçekleştirilen ısıl analizler ve soğutucu seçimi	71
3.3. Elektronik Tasarım	78
3.3.1. LED dizilerinin oluşturulması.....	78
3.3.1.1. Soğuk beyaz (400-700 nm, 6500 K) LED grubu.....	79
3.3.1.2. Kırmızı (620-630 nm) LED grubu.....	79
3.3.1.3. Mavi (465-485 nm) LED grubu.....	80
3.3.1.4. Morötesi, UV-A (390-410 nm) LED grubu	81
3.3.1.5. LED gruplarının lamba içerisindeki yerleşim düzeni	81
3.3.2. LED gruplarının sürülmesi ve PWM yöntemi	83
3.3.3. Sistem duyargaları.....	90
3.3.3.1. PAR ve fotometrik duyargalar	90
3.3.3.2. Sıcaklık-bağıl nem-CO ₂ ölçüm duyargaları.....	93
3.3.4. Veri toplama birimi	94
3.3.5. Bitki yetiştirme kabini.....	95
3.4. Yazılım	96
3.4.1. LabVIEW programlama dili	96
3.4.2. LabVIEW esasları	96
4. BULGULAR ve TARTIŞMA.....	107
4.1. LED Lamba Performansı	107
4.2. Güç Tüketimi.....	117
4.3. Bitkisel Üretim Denemeleri	117
4.3.1. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi	118
4.3.2. Klorofil tayini	122
4.3.3. Yaprak renk değişim tayini	123
5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER.....	125
6. KAYNAKLAR	129
7. EKLER.....	141
Ek 7.1. Işık Tekniği ve Bitkisel Aydınlatmada Kullanılan Terimler	141
ÖZGEÇMİŞ	

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler

η	Bitkinin PAR enerjisinden yararlanma etkinliği ($J.m^{-2}$)
η_{arm}	Armatür verimi
\bar{y}	Ortalama işaret değeri
c	Işığın boşluktaki hızı ($2.998 \times 10^8 m.s^{-1}$)
cd	Candela
E	Foton enerji miktarı (J)
F	Foton frekansı (s^{-1})
$f(t)$	Kare dalganın frekası
h	Planck sabiti ($6.626 \cdot 10^{-34} J.s$)
I_0	Bitkiye ulaşan ışınım enerjisi ($W.m^{-2}$)
$I_c(\alpha)$	Dikey düzlem ile α açısı yapan LED'in açısız ışımaya şiddeti
I_{eo}	Yatay düzleme dik doğrultuda gelen ışımaya şiddeti
I_m	Bitkinin en yüksek düzeyde fotosentez yapabilmesi için gerekli ışınım enerjisi ($W.m^{-2}$)
Lm	Lumen
lx	Lux
N_A	Avogadro sayısı (6.022×10^{23})
N_k	Kül içeriği (%)
N_{yb}	Yaş baza göre nem içeriği (%)
OM	Organik madde miktarı (%)
P_{LED}	Tek LED için güç tüketimi (W)
ppm	Milyonda bir parçacık
r	Işık kaynağından olan uzaklık
r^2	Belirleme katsayısı
R_{taBA}	Soğutucu sistemi için en yüksek ısıl direnci ($^{\circ}C.W^{-1}$)
R_{thb-a}	Soğutucu ısıl direnci ($^{\circ}C.W^{-1}$)
R_{thj-sp}	LED paketi ısıl direnci ($^{\circ}C.W^{-1}$)
T_a	Çevre sıcaklığı ($^{\circ}C$)
T_j	LED kavşak noktası sıcaklığı ($^{\circ}C$)
W_k	Kül ağırlığı (g)
W_m	Kuru madde ağırlığı (g)
W_s	Materyaldeki su ağırlığı (g)
W_t	Toplam ağırlık (g)
λ	Dalga boyu (m)
λ_{peak}	LED ışığının dalga boyu tepe noktası değeri (m)

Kısaltmalar

ADC	Analog to Digital Converter (Örnekselden Sayısala Çevirici)
ASAE	American Society of Agricultural Engineers (Amerikan Ziraat Mühendisleri Odası)
ATP	Adenozin Trifosfat (Hücre içi biyokimyasal reaksiyonlar için gereken kimyasal enerjiyi taşıyan nükleotit)
CC	Constant Current (Sabit Akım)

CCT	Correlated Color Temperature (İlişkili Renk Sıcaklığı)
CFL	Compact Fluorescent Lamp (Kompakt Flüorışıl Lamba)
CIE	Commission Internationale de l'Eclairage (Uluslararası Aydınlatma Komisyonu)
CMYK	Cyan, Magenta, Yellow, black color model (Camgöbeği, Eflatun, Sarı, Siyah renk modeli)
CRI	Color Rendering Index (Renk Dönüşüm İndeksi)
CV	Constant Voltage (Sabit Gerilim)
DAC	Digital to Analog Converter (Sayısaldan Örneğe Dönüştürücü)
DAQ	Data Acquisition (Veri Toplama)
DIN	Deutsches Institut für Normung (Alman Standartlar Enstitüsü)
DLI	Daily Light Integral (Günlük Işık İntegrali)
DNA	Deoksiribonükleik Asit (Tüm organizmalar ve bazı virüslerin canlılık işlevleri ve biyolojik gelişmeleri için gerekli olan genetik talimatları taşıyan nükleik asit)
EMO	Elektrik Mühendisleri Odası
FEA	Finite Element Analysis (Sonlu Elemanlar Analizi)
FEM	Finite Element Method (Sonlu Elemanlar Yöntemi)
FR4	Epoksi LED katmanı
GaAs	Gallium Arsenide (LED yarı iletken malzemesi)
GaN	Gallium Nitride (LED yarı iletken malzemesi)
GaP	Gallium Phosphide (LED yarı iletken malzemesi)
GB	Geceyi Bölme
GBIP	General Purpose Interface Bus (Genel Amaçlı Arayüz Yolu)
GKB	Geceyi Kesintili Bölme
GU	Günü Uzatma
HPS	High Pressure Sodium Lamp (Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı Lamba)
HSL	Hue, Saturation, Lightness color model (Ton, Doygunluk, Açıklık renk modeli)
HSV	Hue, Saturation, Value color model (Ton, Doygunluk, Değer renk modeli)
I/O	Input/Output (Giriş/Çıkış)
InGaP	Indium Gallium Phosphide (LED yarıiletken malzemesi)
IR	Infrared (Kızılötesi)
LabVIEW	Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench (Sanal araçların kullanıldığı grafiksel programlama ortamı)
LCD	Liquid Crystal Display (Sıvı Kristal Ekran)
LED	Light Emitting Diode (Işık Yayan Diyot)
MH	Metal Halide Lamp (Metalik Halojenürlü Lamba)
NCS	Natural Color System (Doğal Renk Sistemi- Renkleri insan gözünün algılamasına dayalı renk sistemi)
NIST	National Institute of Standards and Technology (Amerikan Ulusal Standartlar ve Teknoloji Enstitüsü)
OLED	Organic Light Emitting Diode (Organik Işık Yayan Diyot)
OP-AMP	Operational Amplifier (İşlemsel Yükselteç)
OPC	OLE for Process Control (Endüstriyel iletişim sistemleri ve protokolleri sağlamak amacıyla oluşturulmuş bir standarttır)
PAR	Photosynthetically Active Radiation (Fotosentezde Etkili Işınım)
PCB	Printed Circuit Board (Devre Baskılı Plaket)

PCI	Peripheral Component Interconnect (Intel tarafından geliştirilen yerel veriyolu standardı)
PLED	Polymer Light Emitting Diode (Işık Yayan Polimer Diyot)
PPF	Photosynthetic Photon Flux (Fotosentetik Foton Akısı)
PPFD	Photosynthetic Photon Flux Density (Fotosentetik Foton Akısı Yoğunluğu)
PWM	Pulse Width Modulation (Darbe Genişlik Modülasyonu)
PXI	Peripheral Component Interconnect eXtensions for Instrumentation (Bilgisayar tabanlı ölçüm ve otomasyon uygulamaları için geliştirilmiş açık endüstri standardı)
RGB	Red, Green, Blue color model (Kırmızı, Mavi, Yeşil renkler ve bunların karışımından oluşan renklerin bulunduğu bir renk uzayıdır)
RNA	Ribonucleic Acid (Nükleotitlerden oluşan bir polimerdir)
SiC	Silicon Carbide (Silikon Karpit)
SMD	Surface Mount Device (Yüzey Montaj Aygıt)
SMPS	Switch Mode Power Supply (Anahtarlamalı Güç Kaynağı)
SMT	Surface Mount Technology (Yüzey Montaj Teknolojisi)
TEDS	Transducer Electronic Data Sheet (Transduserleri otomatik tanıma özelliği)
TFA	Tamamlayıcı Fotosentetik Aydınlatma
TIM	Thermal Interface Material (Isıyı alt tabakaya ileten malzeme)
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TYFA	Tam Yapay Fotosentetik Aydınlatma
USB	Universal Serial Bus (Evrensel Seri Veriyolu)
UV	Ultraviolet (Morötesi)
VI	Virtual Instruments (LabWIEV yazılım geliştirme Sanal Araçları)
VXI	Versa Module Eurocard eXtensions for Instrumentation (Enstrümantasyon için veri iletim genişleme modülü)
YEGM	Yenilenebilir Enereji Genel Müdürlüğü

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 2.1. Elektromanyetik tayf.....	6
Şekil 2.2. UV ışınım bandları.....	7
Şekil 2.3. Ostwald renk sistemi.....	9
Şekil 2.4. Munsell renk sistemi.....	10
Şekil 2.5. Renk uzayları.....	11
Şekil 2.6. RGB renk uzayı.....	12
Şekil 2.7. CMY renk uzayı.....	13
Şekil 2.8. CIE XYZ renk uzayının iki boyutlu gösterimi.....	14
Şekil 2.9. CIE Lab renk uzayı.....	14
Şekil 2.10. Kloroplast pigmentleri tarafından absorbe edilen ışığın dalga boyları.....	20
Şekil 2.11. a) Likopen ve b) β -karoten yapısı.....	20
Şekil 2.12. Fitokrom dönüşümler.....	23
Şekil 2.13. a) Doğal ışıklı ve karanlık süre içindeki Fk ₀ /Fk dönüşümü, b) günü uzatma ve c) geceyi bölme aydınlatması.....	23
Şekil 2.14. a) Dar açılı ve b) geniş açılı yansıtıcılar kullanıldığında örtme payının durumu.....	31
Şekil 2.15. Bitkisel aydınlatma uygulamalarında kullanılan yapay ışık kaynakları.....	32
Şekil 2.16. Akkor telli lamba ve tayfdaki güç dağılımı.....	33
Şekil 2.17. Cıva buharlı lamba.....	34
Şekil 2.18. a) Yüksek basınçlı ve b) alçak basınçlı cıva buharlı lambaların tayfdaki güç dağılımları.....	35
Şekil 2.19. Flüorışıl lamba tipleri.....	36
Şekil 2.20. Flüorışıl lambaların tayfdaki güç dağılımı.....	36
Şekil 2.21. Düşük basınçlı sodyum buharlı lambanın tayfdaki güç dağılımı.....	37
Şekil 2.22. Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambanın tayfdaki güç dağılımı.....	37
Şekil 2.23. Metal halojen lambanın tayfdaki güç dağılımı.....	38

Şekil 2.24. a) HPS ve b) LED aydınlatmada sistemlerinin ışık dağılımları.....	39
Şekil 2.25. a) Pin ayaklı, b) şerit ve c) yüzey montaj LED görünüşleri.....	40
Şekil 2.26. LED yarıiletken katman yapısı.....	41
Şekil 2.27. a) Akım-Gerilim karakteristiği, b) kırmızı ve kızılötesi LED'lerin spektrum karakteristiği ve c) ışınma diyagramı.....	41
Şekil 2.28. OLED'ler kıvrılabilir ekranların üretilmesine olanak sağlayacaktır.....	42
Şekil 2.29. Yüksek güçlü LED modüller.....	43
Şekil 2.30. Soğutucu üzerine yerleştirilmiş yüksek güçlü LED yapıları.....	45
Şekil 2.31. Fotosentez ve yapay ışık kaynaklarına ait karakteristik eğriler.....	45
Şekil 2.32. Bazı ışık kaynaklarından birim güç başına yayılan UV ışınım miktarı.....	47
Şekil 2.33. Bazı ışık kaynaklarından birim güç başına yayılan IR ışınım miktarları.....	47
Şekil 2.34. Işık kaynaklarının verimlerindeki artışın yıllara göre değişimi.....	49
Şekil 2.35. LED ışık akısının yıllara göre değişimi.....	50
Şekil 2.36. LED üretim maliyetlerinin yıllara göre değişimi.....	51
Şekil 2.37. a) 14 W LED kiti, b) 90 W yuvarlak ve c) 288 W dikdörtgen tip LED lamba	51
Şekil 2.38. LED ışığı altında yetiştiricilik uygulamaları.....	52
Şekil 3.1. Aydınlatma Otomasyon Sistemi blok şeması.....	62
Şekil 3.2. a) Soğuk beyaz, kırmızı, mavi ve b) morötesi LED ölçüleri.....	64
Şekil 3.3. LED'ler için kullanılan yıldız tip alüminyum soğutucu görünüş ve ölçüleri.....	65
Şekil 3.4. Ters kare yasası.....	65
Şekil 3.5. a) Yön verici mercekle kullanılmadan, b) 60° mercekle kullanıldığında ve c) 30° mercekle kullanıldığında ışığın PPF dağılımı.....	67
Şekil 3.6. Kavşak noktası sıcaklığı ile bağlı ışık akısı ilişkileri.....	69
Şekil 3.7. LED soğutucusu.....	69
Şekil 3.8. LED'lerin çevre sıcaklığı ile çektikleri akım arası ilişki.....	70

Şekil 3.9. LED tabakaları arası ısı iletimi eşdeğer devresi.....	71
Şekil 3.10. Sonlu elemanlar yönteminde takip edilen adımlar.....	72
Şekil 3.11. Kurulan FEA için eğrilik tabanlı elemanlara ayırma (meshing) yaklaşımı...74	
Şekil 3.12. Isıl analiz için hazırlanan LED ve harici soğutucu katı modeli.....	75
Şekil 3.13. Harici soğutucu kullanılmadan yapılan ısıl analizler.....	76
Şekil 3.14. Soğutucu kullanılarak yapılan ısıl analizler.....	77
Şekil 3.15. Harici soğutucu ve LED lamba üzerindeki yerleşimi.....	78
Şekil 3.16. Soğuk beyaz (400-700nm, 6500 K) LED grubu bağlantı şeması.....	79
Şekil 3.17. Kırmızı (620-630 nm) LED grubu bağlantı şeması.....	80
Şekil 3.18. Mavi (465-485 nm) LED grubu bağlantı şeması.....	81
Şekil 3.19. Morötesi (UV-A bölgesi, 390–410 nm) LED grubu bağlantı şeması.....	81
Şekil 3.20. Lambada kullanılan LED’lerin sayıca yüzdelik oranları.....	82
Şekil 3.21. LED yerleşim düzeni.....	82
Şekil 3.22. LED lamba ve ölçüleri.....	83
Şekil 3.23. Bitki yetiştirme kabini ve LED lambanın yerleşimi.....	83
Şekil 3.24. Sabit gerilim beslemeli LED’lerde sıcaklık-akım ilişkisi.....	84
Şekil 3.25. Gövde sıcaklığının LED besleme uçları arasındaki gerilime etkisi.....	84
Şekil 3.26. LED sürücüsüne ait yük-verim eğrisi.....	85
Şekil 3.27. Sürücüler ve LED grupları arasındaki bağlantılar.....	86
Şekil 3.28. PWM yönteminin kullanıldığı bir SMPS çıkış geriliminin dalga şekli.....	87
Şekil 3.29. Işık seviyesi kontrol şeması.....	88
Şekil 3.30. Işık seviyesini belirleyen PWM oranları.....	89
Şekil 3.31. PAR quantum ölçüm duyargası ve görünür bölgedeki tepkisi.....	90
Şekil 3.32. Aydınlık şiddeti ölçüm duyargası ve görünür bölgedeki tepkisi.....	90
Şekil 3.33. PAR ve aydınlık şiddeti duyargaları için hazırlanan yükselteç devresi.....	92
Şekil 3.34. Sıcaklık-bağıl nem-CO ₂ duyargaları ve dönüştürücüsü.....	93

Şekil 3.35. Veri toplama birimi.....	94
Şekil 3.36. Bitki yetiştirme kabini ve kabin içine yerleştirilmiş LED lamba.....	96
Şekil 3.37. a) Ön panel ve b) blok diyagram ekran görüntüleri.....	97
Şekil 3.38. LED gruplarında ışık seviye ayarları için hazırlanan blok diyagram.....	98
Şekil 3.39. Rapor verilerinin bilgisayar C diskine kaydedilmesi için hazırlanan blok diyagram.....	98
Şekil 3.40. Duyargalar aracılığıyla veri toplanmasını sağlayan blok diyagramlar.....	99
Şekil 3.41. Veri kaydının sağlanması için hazırlanan blok diyagram.....	100
Şekil 3.42. Günü uzatma ve geceyi bölme işlemleri için hazırlanan blok diyagram...	100
Şekil 3.43. PAR ve aydınlık şiddeti uygulamalarının otomatik çalışma diyagramı.....	101
Şekil 3.44. Aydınlatma otomasyon yazılımı arayüzü.....	102
Şekil 3.45. Otomatik aydınlatma programı uygulama adımları.....	104
Şekil 3.46. a) Güneşin doğuşundan önceki ve b) sonraki GU uygulamaları	104
Şekil 3.47. a) GB ve b) GKB uygulamaları.....	105
Şekil 3.48. Rapor penceresi.....	106
Şekil 3.49. Grafik bilgi penceresi.....	106
Şekil 4.1. Tekil LED gruplarında elde edilen PAR- lamba yüksekliği arasındaki ilişkiler.....	109
Şekil 4.2. Karışık LED gruplarında elde edilen PAR-lamba yüksekliği arasındaki ilişkiler	109
Şekil 4.3. Düz levha üzerinde hazırlanan ölçüm noktaları ve ölçüm düzenekleri.....	110
Şekil 4.4. Soğuk beyaz LED grubunun yatay düzlemdeki ışık dağılımı.....	111
Şekil 4.5. Kırmızı LED grubunun yatay düzlemdeki ışık dağılımı.....	112
Şekil 4.6. Mavi LED grubunun yatay düzlemdeki ışık dağılımı.....	113
Şekil 4.7. Morötesi (UV-A) LED grubunun yatay düzlemdeki ışık dağılımı.....	114
Şekil 4.8. Kırmızı-Mavi LED grubunun yatay düzlemdeki ışık dağılımı.....	115
Şekil 4.9. Kırmızı-Mavi-UV-A LED grubunun yatay düzlemdeki ışık dağılımı.....	116

Şekil 4.10. LED gruplarının ışık seviyelerindeki güç tüketimleri.....	117
Şekil 4.11. Metal halojen lamba ve tayfdaki bağıl enerji değişimi.....	118
Şekil 4.12. D1, D2 ve D3 LED ve MH ışığı altında yetiştirilen fideler.....	119
Şekil 4.13. Soğuk beyaz (SB), Kırmızı-Mavi (KM) LED ve Metal Halide (MH) ışıkları altında yapılan fide denemeleri.....	120
Şekil 4.14. Klorofil a, b, a/b ve toplam klorofil analiz sonuçları.....	123
Şekil 7.1. Steradyan'ın tanımlanması.....	140
Şekil 7.2. a) Işık kaynaklarının CCT değerleri ve b) objeler üzerindeki etkileri.....	141
Şekil 7.3. Farklı CRI değerlerinde nesnelerin görüntüsü.....	142

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 2.1. CIE XYZ renk uzayındaki standart renk değerleri.....	15
Çizelge 2.2. Bazı bitki türleri için önerilen ışık düzeyleri.....	25
Çizelge 2.3. Bazı bitkiler türleri için ışınım enerjisi ve aydınlatma özellikleri.....	26
Çizelge 2.4. Bazı ışık kaynaklarının ışınım gücü dağılımı.....	28
Çizelge 2.5. Işınım enerjisine ($W.m^{-2}$) dönüştürme değerleri.....	28
Çizelge 2.6. Işınım dönüşüm faktörleri.....	29
Çizelge 2.7. Fotosentez için kullanılabilir lambaların uygunluk dereceleri.....	30
Çizelge 2.8. Aktif katman yarı iletken malzemeler ve elde edilen dalga boyları.....	41
Çizelge 2.9. Farklı güçlerde beyaz ışık veren LED çeşitlerine ait özellikler.....	44
Çizelge 2.10. LED karakteristik değerleri.....	44
Çizelge 2.11. Bazı yapay ışık kaynaklarında güç dönüşümü.....	46
Çizelge 2.12. Bitki yetiştirme lambalarının karşılaştırılması.....	48
Çizelge 2.13. Yıllara göre birim ışık akısı başına düşen LED modül maliyetleri.....	50
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan LED'lere ait teknik özellikler.....	63
Çizelge 3.2. Modellemede kullanılan malzemeler ve fiziksel özellikleri.....	72
Çizelge 3.3. Isıl analiz için kullanılan sınır koşul değerleri.....	73
Çizelge 3.4. LED sürücüsüne (Mean Well HLG-185-30) ait teknik özellikler.....	86
Çizelge 3.5. PWM iş çevrimine göre anma akım oranları ve ışık seviyeleri.....	89
Çizelge 3.6. PAR quantum ölçüm duyargasına ait teknik özellikler.....	91
Çizelge 3.7. Aydınlık şiddeti ölçüm duyargasına ait teknik özellikler.....	91
Çizelge 3.8. PAR ve fotometrik duyargalara ait tam ölçekteki kazanç faktörü.....	93
Çizelge 3.9. Sıcaklık-bağıl nem-CO ₂ duyarga ve dönüştürücülerinin (EE80) teknik özellikleri.....	94
Çizelge 3.10. Veri toplama birimine (NI USB- 6363) ait teknik özellikler.....	95
Çizelge 3.11. Bitki yetiştirme kabinine (Nüve TK252) ait teknik özellikler.....	95

Çizelge 4.1. LED lambanın asılma yüksekliğine göre PAR ve aydınlık şiddeti değerleri.....	108
Çizelge 4.2. LED ve MH ışık kaynaklarının verdikleri toplam PAR değeri içindeki oranları.....	118
Çizelge 4.3. Bitkiler üzerinde yapılan fiziksel ölçüm sonuçları.....	119
Çizelge 4.4. Örneklere ait toplam ve kuru madde ağırlıkları ile kül, kuru madde ve organik madde içerikleri.....	122
Çizelge 4.5. LED ve MH ışık uygulamalarının yaprak renk değişimlerine etkisi.....	124
Çizelge 7.1. CRI için belirlenen DIN 5035 normuna göre katagoriler.....	142
Çizelge 7.2. Yaygın olarak kullanılan bazı ışık kaynakları için tipik CRI değerleri....	142

1. GİRİŞ

Genel olarak yeşil bitkilerin büyümeleri ve gelişmeleri için belli miktarda ışığa ihtiyaçları vardır. Belli sınırlar içinde ve oranda ışık şiddetindeki artış bitkide büyüme ve gelişmeyi hızlandırmakta, bununla birlikte, bitkilerde uzama, kök şekli, yaprak anatomisi, yaprak boyutu ve rizogenesis gibi bazı morfolojik karakteristiklerin şekillenmesinde oldukça önemli bir rolü bulunmaktadır. (Vardar 1975, Heuvelink 1989, Uzun 1996, Kevseroğlu 1999, Aybak 2002). Ayrıca, ışık bitkilerin fotosentezi gerçekleştirebilmesi için gerekli tek enerji olması yanında, aydınlık ve karanlık sürelerin gün içindeki uzunluk farkı nedeniyle de bitkilerin mevsimsel değişimlerini sağlayan bir bilgi kaynağıdır (Yağcıoğlu 1996).

Güneş ışığının gözle görülebilen 400-700 nm dalga boylu ışınları etkin ışınım PAR (Photosynthetically Active Radiation) olarak bilinir ve bitkilerde fotosentez başta olmak üzere temel fizyolojik ve biyokimyasal olayları yönlendirirler. Güneşten gelen bu etkin ışınım, fotosentez için gerekli bütün enerjiyi sağlayan ve net asimilasyonu etkileyen en önemli faktör olup, bitkilerin üretim yeteneklerinden tam olarak yararlanılarak nitelik ve nicelik açılarından üstün ürünlerin üretilmesine olanak vermektedir.

Bitkilerin, kimyasal bağ enerjisini organik madde yapımında kullanabilmesi için yaprak kanopisi tarafından ışığı kesmesi ve bu kesilen ışık enerjisini kimyasal enerjiye dönüştürebilme yeteneğinin, yani ışık kullanım etkinliğinin fazla olması gerekir (Hay ve Walker 1989). Fakat güneş ışınım düzeyi yeterli olmayan enlem derecesi yüksek bölgelerde gerekli ışınım enerjisi tam anlamıyla karşılanamaz. Bu durumda yapay aydınlatma önem kazanmaktadır. Bu nedenle doğal ışığın yeterli olmadığı zamanlarda ve yerlerde, bitkiler için gerekli olan aydınlatmanın yapılması ve eksik kalan PAR enerjisinin sağlanabilmesi için elektrikli yapay aydınlatma kaynakları kullanılmaktadır. Yapay aydınlatma, seralarda süs bitkileri üretiminde yaygın olarak uygulanmakla birlikte, bazı sebzelerin üretiminde de yer almaktadır (Öztürk 2008).

Tarımsal amaçlı yapılan yapay aydınlatmada kullanılan geleneksel ışık kaynakları (akkor telli lamba, yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba, metal halojen lamba, serin beyaz flüorışıl lamba, düşük basınçlı sodyum buharlı lamba, cıva buharlı lamba), elektromanyetik tayfin görünür bölgesinin (400-700 nm) tamamını ve görünmez bölgede küçük bir kısım ışığı yaymaktadırlar. Son yıllarda ise yarı iletken LED (Light Emitting Diode) lambaların, teknik ve yaydıkları ışık özelliklerinin sağladığı avantajlar sayesinde tarımsal amaçlı yapay aydınlatmada geleneksel yapay ışık kaynaklarının yerini alabileceği işaret edilmektedir.

Bu nedenle Türkiye'deki LED piyasasının zamanında ve doğru olarak düzenlenmesi konusundaki eksikliklerin giderilmesi gerekmektedir. Bunlardan en acil olanı LED aydınlatma sistemlerindeki standartların belirlenmesidir. Türk Standartları Enstitüsü (TSE) bünyesinde oluşturulmuş olan "*MTC 33-Aydınlatma Armatürleri ve İlgili Donanımlar*" başlıklı komitede, LED ve LED ışık kaynaklı armatürlerin değerlendirilmesi ve uluslararası gelişmelere paralel olarak Türkiye'de de ilgili standartların yayımlanması gerekmektedir (Yurtseven vd 2011). Bu konuda gerekli düzenlemelerinin kısa zaman içerisinde sonuçlandırılması, Türkiye'deki LED piyasasının gelişmesi açısından son derece önemlidir.

LED'lerin bitkisel üretimde kullanılması bakımından geleneksel ışık kaynaklarına göre en önemli avantajlarından biri, tek renk dalga boyu ışık yayabilme özellikleridir. Bu özellik, mavi ve kırmızı dalga boylu bölgelerdeki ışığın bitkiye ulaştırılmasına olanak vermektedir. Bunun yanı sıra fotosentez yapan canlıların gereksinimlerine uygun dalga boylarında (renklerde) yapay aydınlatma olanağı vermeleri bitkisel üretim amaçlı uygulamalarda iyi bir alternatif oluşturmaktadır. Ayrıca bu lambalar canlıda meydana gelmesi muhtemel ışık stresinin azaltılması, diğer lambalara oranla hem üretim hem de kullanım aşamalarında çevreci olmaları gibi özellikleriyle de öne çıkmaktadırlar (Koç vd 2009). Öte yandan diğer lambalar gibi buldukları ortama aşırı derecede ısı yaymamaları nedeniyle doku kültürü, bitki yetiştirme odaları (growing chamber) gibi daha küçük hacimli yetiştirme ortamlarında ışık kaynağı olarak kullanılmaları işletmelere büyük avantajlar sağlamaları bakımından önemli görülmektedir. Özellikle sürekli ya da gün içerisinde uzun süreli aydınlatmanın yapıldığı bu alanlarda lamba ömrünün geleneksel aydınlatma kaynaklarına göre çok uzun olduğu (50 000 yanma saattinden fazla) LED lambalar, giderek artan ışık verimleri yanında düşük enerji tüketimleriyle de işletme giderlerini önemli ölçüde azaltabilecek özelliktedir.

LED ışık kaynaklarının morötesinden (UV: ultraviolet) kızılötesine (IR: infrared) kadar uzanan ve görünür ışık bölgesini de kapsayan geniş bir aralıkta üretimi söz konusu olabilmektedir. Araştırmacılar için oldukça iyi olanaklar sunan bu durum, özellikle görünür ve morötesi bölgede ışık elde etme ve bitkisel üretime yönelik araştırma çalışmalarının son yıllarda büyük bir artış göstermesini sağlamıştır (Miyashita vd 1995, Jao ve Fang 2003, Lawrance vd 2005, Shimizu vd 2005, Kondo vd 2008).

Fotosentezden yararlanma etkinliği açısından bakıldığında, LED'lerden yayılan fotonların, geniş spektrum lambalara göre farklılıklar içerdikleri ve özellikle kırmızı LED'lerin geleneksel lambalara göre daha az fotosentetik olmayan ışınım yaydıkları görülmektedir. Kırmızı renkli yüksek güçlü AllGaP tabanlı LED'ler 660 nm dalga boyunda ışık yayabilmektedirler. Bu dalga boyu bitkiler için önemli olan 640 nm dalga boyuna yakın olması açısından da önemlidir. Bu durum, bitkiler için gerekli olan PAR enerjisinden yararlanma etkinliğinin artmasını sağlamaktadır. Berkovich vd (2005) tarafından yapılan aydınlatma çalışmalarında birkaç dalga boyunun kısa bant spektrumuna sahip olmalarından dolayı, farklı aydınlatma koşullarına bitkilerin tepkisini belirlemek için en uygun ışık kaynağının LED'ler olduğunu bildirmişlerdir. Günümüzde kullanılan yüksek ışık akısına sahip LED'lerin bitki büyümesi için gerekli olan PAR miktarının elde edilmesinde yeterli olduğunu ifade etmişlerdir.

Bu çalışmanın amacı, farklı dalga boylarında ışık verebilen, aydınlık şiddeti ve fotosentezde etkili ışınım (PAR) değerlerinin bitki özelliklerine, ortama ve isteğe göre ayarlanabilen LED lambalı bir aydınlatma otomasyon sisteminin tasarlanması ve gerçekleştirilmesidir. Aydınlatma otomasyon sistemi, sera ve tam yapay ortamlarda bitkisel üretim uygulamaları ile bitki-ışık ilişkilerini araştırmaya yönelik planlanmış ve geliştirilmiştir. Tez kapsamında yapılan çalışmada denemeler için iklim kontrollü bir bitki yetiştirme kabini kullanılmış ve aydınlatma otomasyon sistemi bu kabin üzerine yerleştirilmiştir. Böylece tam yapay aydınlatma uygulamaları için gereken ortam sağlanmıştır.

Yapılan çalışma dört aşamada gerçekleştirilmiştir:

- Optik analizler ve LED lambanın tasarlanması,
- Isıl analizler ve uygun soğutucu seçimi,
- Elektronik yapı ve yazılım tasarımı,
- Bitkisel üretim uygulamaları olarak gruplandırılmıştır.

Geleneksel bitki yetiştirme kabinlerinde çoğunlukla gaz boşalmalı lambalar kullanılmaktadır. Bu lambaların aydınlık şiddeti genelde sabit olup bazılarında kısmen ayarlanabilir özelliktedir. Öte yandan bu lambalar, sadece soğuk beyaz ya da sıcak beyaz ışık verme özelliğinde olup, tayfin görünür bölgesinde ve bir miktarda IR ile UV ışınım vermektedirler. Gerçekleştirilen sistemde ise soğuk beyaz (6500 K), kırmızı, mavi ve UV-A bölgesi ışınimleri ayrı veya birlikte verilebilmektedir. Fotoperiyodik ve fotosentetik uygulamalar için ise, aydınlık şiddeti, PAR değeri ve bunların uygulama süreleri ayarlanabilmektedir. Seralar ve tam yapay ortamlar için elle veya ortamdaki ışık miktarına göre LED lambanın ışık seviyesini ayarlayabilen otomatik kullanım seçeneklerine sahiptir.

Yapay aydınlatma çalışmalarında kullanılan ışık kaynağının bitki deseni üzerindeki homojen dağılımı eşit büyüme ve verim açısından önemlidir. Moreno (2004) farklı dizilimlere sahip LED ışık kaynaklarının aydınlatma homojenliğine etkisini incelediği çalışmada düz bir yüzeyde, ışık kaynağının yaratmış olduğu aydınlık dağılımını model çalışmasıyla karşılaştırmış ve deneme ile model sonuçlarının uyum içinde olduğunu gözlemlemiştir. Deneme sonuçlarından yan yana iki LED dizilişli sistemde yüzey üzerinde ölçülen aydınlık şiddetinin merkezden dışa doğru azaldığı anlaşılmıştır. Benzer gözlem farklı LED dizilişlerinde elde edilen ışığın homojenliği konusunda yapılan inceleme ve analizler sonucunda da görülmüştür. Buna göre aydınlık şiddetinin merkezden dışa uzaklaştıkça azaldığı ve bu değerlerin aydınlatma yüzeyinin çok büyük bir kısmında homojen olduğu ve sadece kenarlarda farklılıkların bulunduğu tespit edilmiştir.

LED aydınlatma sistemlerinin tasarım aşamasında dikkat edilmesi gereken önemli bir konuda uygun soğutucu sistemin seçimidir. Ha (2009), çoklu kırmık LED dizileri üzerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi'ni (FEM: Finite Element Method) kullanarak ısıl analizler yapmış ve LED aydınlatma için kritik tasarım şartlarını araştırmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, LED çıkış akısının en yüksek seviyeye çıkarılabilmesi için sıcaklığın en düşük seviyeye çekilmesi gerektiği, bunun içinde kavşak noktası sıcaklığının ve LED dizisindeki LED'ler arasındaki boşluğun en uygun düzeyde olacak şekilde tasarlanmaları gerektiğini bildirmiştir.

Tez çalışması kapsamında da LED lamba üzerinde gerçekleştirilen FEM temelli ısıl analizler sonuçlarına göre en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri tesbit edilmiş ve uygun soğutucu seçimi yapılmıştır. Buna göre LED yongası üzerindeki en yüksek sıcaklık 197°C en düşük sıcaklık ise yaklaşık 183°C olarak bulunmuştur. Bu sıcaklık değerleri genelde üreticiler tarafından önerilen 30 000 yanma saati için 85°C değerinin çok üzerinde olduğundan düşürülmesi gerekmektedir. Yapılan analiz ve hesaplamalar sonucunda 450x450 mm boyutlarında, 4 mm aralıklı ve 18 mm uzunluğunda kanatçıklara sahip Al soğutucunun kullanılmasının bu sıcaklığın düşürülmesi için uygun olduğu tesbit

edilmiştir. Bu soğutucunun kullanılmasıyla LED üzerindeki sıcaklık yaklaşık 47°C'ye kadar düşürülmüştür.

Aydınlatma otomasyon sistemi kullanıcı dostu sade bir arayüze sahip özel bir yazılım tarafından kontrol edilmektedir. Geliştirilen yazılım ile farklı fotoperiyodik ve fotosentetik aydınlatma programları hazırlanabilmekte, ortamdaki ışık ve iklim verileri rapor halinde alınabilmektedir. Hazırlanan aydınlatma programları sonraki zamanlarda kullanılmak üzere saklanabilmektedir.

Aydınlatma otomasyon yazılımı yüksek performanslı bilimsel ve mühendislik uygulamalarının geliştirilmesinde tercih edilen LabVIEW (Laboratory Virtual Instruments For Engineering Workbench) programlama dili ile geliştirilmiştir. LabVIEW, bir G programlama (grafiksel programlama) ortamı olup test, ölçüm, cihaz kontrolü, veri işleme ve veri analizi süreçlerini gerçek zamanlı veya benzetim modeli olarak hızlı şekilde yapılma olanağı sunabilen, pek çok endüstriyel uygulamada tercih edilen bir geliştirme ortamıdır. LabVIEW, C programlama dilinin esnekliğini ve kapsamlı işlevselliğini sağlarken, kullanıcılara C programlama diline göre 5 ile 10 kat daha fazla verimlilik sunmaktadır (Jamal ve Pichlik 1999). LabVIEW açık yazılım geliştirme platformu sayesinde, TEDS-uyumlu duyargalar, aktivatörler, OPC uyumlu endüstriyel aygıtlar ve 4000'in üzerinde GBIP, VXI, PXI, PCI, seri, ethernet ve USB kontrollü ölçüm aygıtları için sürücü desteğini vermesi (Bishop 2006) açısından kullanıcılara önemli avantajlar sağlamaktadır. Bu sayede sistem kolaylıkla genişletilerek birden fazla sera veya bitki yetiştirme odasında aydınlatma uygulamalarının yapılabilmesine olanak vermektedir. Bu durum, sistemin esnek ve işlevselliğinin artırılabilir olması açısından da önemlidir.

2. KURAMSAL BİLGİLER ve KAYNAK TARAMALARI

2.1. Işık ve Işınım

Işık, insan gözünün duyarlılığına dayanan ve elektromanyetik spektrum içerisinde yaklaşık 400-700 nm dalga boyları arasında yer alan ve $c=2.998 \times 10^8 \text{ m.s}^{-1}$ hızında periyodik olarak hareket eden elektromanyetik dalgalardan oluşan ışınım enerjisidir. Fotosferden uzaya yayılan ışınım enerjisi dünyamıza ulaşana kadar 150 milyon km'lik bir boşluğu kat ederek yerkürenin atmosferine girer. Atmosfer tabakasını geçtikten sonra yeryüzüne ulaşır. Bu süreçte ışınım enerjisi uzayda, atmosferde ve suda farklı davranarak soğurulur, yansıtılır ve kırılır (Varınca ve Gönüllü 2006).

Bu süreç günümüzde tam olarak açıklanmasa da kabul gören yaklaşım 20. yüzyılın başında Max Planck tarafından ortaya konulan kuantum kuramıdır. Daha sonra açıklama ve matematik eşitlikler Einstein, Bohr, Schrödinger, Louis de Broglie, Heisenberg, Born ve Dirac'ın da aralarında bulunduğu çok sayıda bilim adamı tarafından geliştirilmiştir. 1900 yılına kadar ısıtılan herhangi bir cismin ışınımı, akkor haline getirilen katı bir cismin kimyasal bileşenlerinden bağımsız olarak her dalga boyunda sürekli olarak ışınım yaydığı, ışınımın tayfdaki dağılımının, cismin sıcaklığına ve frekansına bağlı olduğu kabul görmüştür. Ancak Planck, ışınımın belli büyüklükteki paketler halinde yayıldığını ve bu yayılmanın sürekli olmadığını ileri sürmüştür. Bu paketler günümüz fiziğinde kuantaya ya da foton (ışık özü) olarak adlandırılmaktadır (Koç 1995).

Işınım enerjisi, elektromanyetik bir dalga olarak kabul edilir, ancak bu şekilde tam olarak tanımlanamaz. Kütleli fotonlar belirli bir dalga boyu ve frekansa sahip elektromanyetik dalga gibi hareket ederek enerji taşınımını gerçekleştirirler. Güneş'in ışınım enerjisi, sinüs eğrisi değişimi göstererek dünyamıza değişik dalga boyuna sahip fotonlar tarafından taşınırlar. Bu sinüs eğrisinde iki tepe noktası arasındaki mesafe dalga boyu olarak adlandırılır. Birim zamanda bu eğri yörüngesinde kat edilen mesafe ise ışınım şiddetinin frekansını belirtir. Işık hızı ortam değişmediği sürece sabit olduğu için, fotonun enerjisi değiştiğinde dalga boyu ve frekansı değişir. Bu nedenle fotonların enerji içeriği, dalga boyu ya da frekanslarına bağlı olarak da ifade edilebilir.

Planck, enerji miktarının ışınım frekansıyla doğru orantılı olduğunu ortaya koymuştur. Belirtilen bu iki büyüklük ışık hızı ile ilişkilidir ve aşağıdaki eşitlik ile ifade edilir;

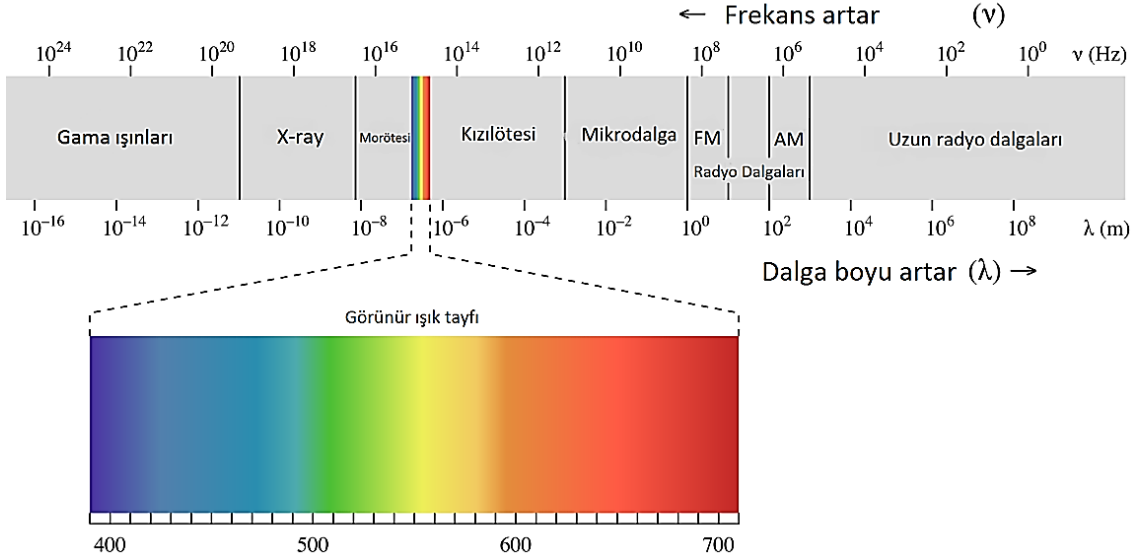
$$E = h.f \quad (2.1)$$

Burada, E fotonun enerji miktarı (J), h Planck sabiti ($6.626 \times 10^{-34} \text{ J s}$) ve f fotonun frekansı (s^{-1}) olarak gösterilmiştir. Öte yandan frekans, fotonun hızı ile doğru, dalga boyu ile ters orantılı olduğu için frekans yerine $c \lambda^{-1}$ konulursa;

$$E = h.c.\lambda^{-1} \quad (2.2)$$

elde edilir. Eşitlikte, c ışık hızı (m.s^{-1}), λ dalga boyu (m) dir (Kirk 1994).

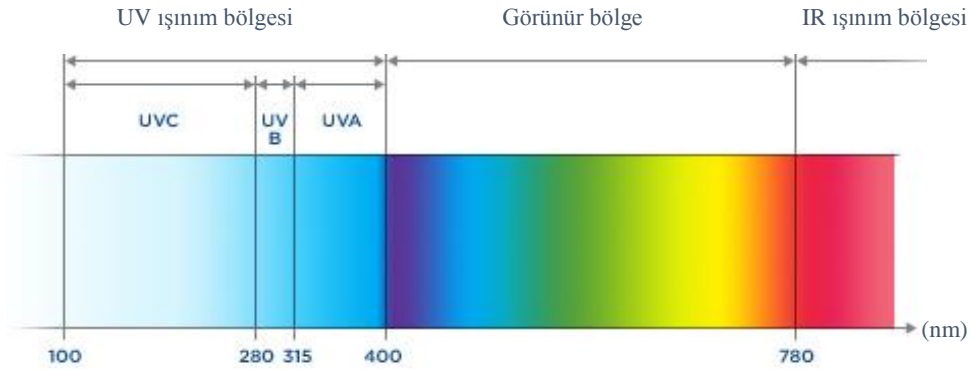
Doğal ve yapay kaynaklardan yayılan elektromanyetik dalgalar farklı dalga boylarında olabilirler (Yıldız vd 2010). Elektromanyetik dalgaların boylarına göre sınıflandırılmasıyla elektromanyetik tayf elde edilir (Şekil 2.1). Bu sınıflandırmada elektromanyetik ışınım, enerji düzeylerine göre düşük enerjiden yüksek enerjiye doğru; radyo dalgaları, mikrodalga, kızılötesi, görünür ışık, morötesi, X ışınları ve Gama ışınları olarak isimlendirilmektedirler. Bu tayf içerisinde insan gözü 380–760 nm dalga boyundaki ışığı (en uygun değer 560 nm) görebilirken, bitkiler bu aralıktaki ışığı fotosentez amacıyla kullanmaktadırlar.



Şekil 2.1. Elektromanyetik tayf

X-ışınları ve Gama ışınları atmosferin üst seviyelerinde azot (N) ve oksijen (O) tarafından tamamen soğurulur, bu nedenle yeryüzüne ulaşamazlar. Tayfin 200 nm dalga boyuna kadar olan kısmındaki UV ışınları ise oksijen molekülleri tarafından soğurulur. Bu enerji transferi nedeniyle oksijen moleküllerinin bir kısmı ışınımsal çözülmeye uğrarlar ve oksijen atomları açığa çıkar. Oksijen molekülleri ve atomları bileşik yaparak ozon (O₃) formuna dönüşürler. Oluşan O₃, 200-300 nm aralığındaki UV ışınlarını ve görünür ışınların da oldukça düşük bir kısmını absorbe ederek yeryüzüne ulaşmasını engeller (Bohren 2006).

UV ışınları kısa dalga boyuna sahip olup, görünür ve kızılötesi bölgeye göre daha fazla parçacık özelliği sergiler. Çeşitli olaylarda gösterdiği özelliklere göre kendi içinde üç banda ayrılır: UV-A, UV-B ve UV-C (Şekil 2.2). Bu ışınımın miktarı deniz seviyesinden dağlık bölgelere doğru rakım yükseldikçe fazlalaşır. Bundan dolayı yüksek yerlerdeki bitkiler bu ışınımın artmasından etkilenerek yapısal değişim gösterirler. Tüy, diken oluşturarak ve üst koruyucu tabakada mantar dokusu meydana getirerek, kendilerini bu ışınımın kötü etkilerinden korumaya çalışırlar. Ovalardaki bitkilere göre, yüksek yerdeki bitkiler UV ışınımının etkisiyle daha erken çiçek açarlar.



Şekil 2.2. UV ışınım bandları

UV-A, 315–400 nm dalga boyundadır ve morötesi ışınım bandları arasındaki en az enerjiye sahip olmasının yanı sıra en az zararlı ve en fazla bulunan tipidir. UV-A zararsızlığından ve flüorışıl materyallerin görünür ışık yaymasına neden olmasından ötürü kullanılmaktadır. UV-A ışınımına maruz kalan bitkilerde tüylenme, diken ve mantar tabakası oluşumu görülür. Bitkilerin tomurcuklarında ve tepe noktalarındaki büyüme hücrelerinin bölünmesi sırasında kromozomlara etkili olduklarında, onları değişikliğe uğratarak mutasyon meydana getirip, aynı bitki üzerinde farklı karakterde sürgünlerin oluşmasına ve böylece yeni çeşitlerin elde edilmesine de sebep olabilirler.

UV-B ışınımı, 280–315 nm dalga boyundadır ve UV ışınımının tipik olarak en zararlı formudur. UV-B atmosferde tamamen soğurulmadığından biyolojik dokulara zarar verebilecek derecede enerjiye sahiptir ve cilt kanserine yol açtığı bilinir. Güneşten gelen UV-B atmosfer tabakalarında, özellikle de ozon tabakası tarafından absorbe edilmektedir. UV-B'nin bitki gelişmesi üzerine çeşitli etkileri vardır. Dağlık bölgelerde miktarı artar ve buradaki bitkilerin bodur büyümesine ve çüce kalmasına sebep olur. Bu ışınımından korunmak üzere bitkilerde aşırı tüylenme, diken ve üst koruyucu dokuda kalın bir mantar dokusu meydana gelir.

UV-C ışınımı, 200–280 nm dalga boyunda olup, çok az miktarı bulunduğumuz ortama ulaşır. UV-C çeşitli lambalardan elde edilebilir. Bu lambalardan alınan UV-C ışınımı özellikle peynirhane, birahane, şaraphane, mantarhane ve ameliyathane gibi ortamlarda bulunan zararlı mikroorganizmaların temizlenerek ortamın steril hale getirilmesinde, dezenfektan ve sterilizasyon işlemlerinde kullanılmaktadır.

Kızılötesi (IR), diğer bandlara oranla foton başına daha az enerji kapsar. Bu yüzden kızılötesi fotonu çoğunlukla eşik değerini geçmesi için gerekli olan enerjiden mahrumdur ve genellikle soğurulan enerjiden ötürü değişen sıcaklığı ölçen termopil gibi termal detektörler yardımıyla ölçülür. Yapılan araştırmalarda her rengin bitkilerin üzerine yaptığı etki farklıdır. Genelde soğuk renkler bitkilerin bodur kalmasını sağlar ve boya kaçmasını engellerken, sıcak renkler boya kaçmayı hızlandırmaktadır. Kış aylarında sıcak renkler fazla olduğundan bitkilerde boylanma, yaz aylarında soğuk renkler fazla olduğundan bodurlaşma ortaya çıkar. Bu iki grup arasında denge sağlandığında büyüme ritmi normale gelir. Mor renk bitkilerde fotosentezi, mavi renk bodurlaşmayı, yeşil renk fotosentezi, fototropismusu, kloroplast değişimini ve mantar dokusu oluşumunu sağlar,

plazmanın zarar görmesini önler. Mavi ışığın ortamdaki uzaklaştırılmasıyla bitkiler yaşamsal olaylarını yapamaz ve yaşayamaz hale gelir. Sarı renk bazı bitkilerde seksüel gelişmeyi kuvvetlendirir. Kırmızı renk, bitkinin uzamasını ve boylanmasını temin eder, ayrıca tohum çimlenmesi, klorofil absorpsiyonu, fotosentez aktivitesi üzerine de etkileri vardır. Birçok bitkinin tohumları en iyi 660 nm dalga boyunda çimlenir. 730 nm dalga boyundan sonra çoğu kez çimlenme kısıtlaması ortaya çıkar. Mavi ışıkta olduğu gibi, kırmızı ışığın ortamdaki uzaklaştırılmasıyla bitkilerin yaşamı durur ve ölüm meydana gelir. Kırmızı ve mavi ışık miktarı güneş ışıklarının dünyaya geliş açısına, mevsimlere ve günün saatlerine göre değişir. Seeman'e (1952) göre, güneş ışıkları dünyaya 10–16° eğimle geldiğinde, kırmızı ışık miktarı mavi ışık miktarının 2 katıdır. Yaz aylarında güneş geliş açısının miktarı arttığından mavi ışık miktarı artmakta, kışın geliş açısı azaldığından kırmızı ışık miktarı çoğalmaktadır. Sabah ve akşam saatlerinde kırmızı, öğlen saatlerinde mavi ışık miktarı yüksektir.

Uzun dalga boylu ışınlar 760 nm'den daha yüksek dalga boyuna sahip olup, bunların ilk bölümü kızıl ötesi ve ısıtıcı ışınlar olarak bilinirler. Dünyanın ısınmasını sağlayan bu ışınlar, bitkilerde solunum, terleme, fotosentez, çiçeklenme gibi yaşamsal olaylarla birlikte, biyokimyasal reaksiyonların da meydana gelmesine hizmet etmektedirler. 10⁹ nm'den daha uzun dalga boylu ışınların diğer bir boyu elektrik yüküne sahip televizyon ve radyo dalga boylu ışınlardır. Bu ışınlar kendi arasında kısa, orta ve uzun dalga boylarına ayrılırlar (Günay 2005).

2.2. Renk Sistemleri

Renk, ışığın gözün retinasına değişik biçimde ulaşması ile ortaya çıkan bir algılamadır. Bu algılama, ışığın maddeler üzerine çarpması ve kısmen soğurulup kısmen yansımaya nedeniyle çeşitlilik gösterir ki bunlar renk tonu veya renk olarak adlandırılır. Araştırmacılar rengi farklı şekillerde ele almışlardır. Bunlardan bir bölümü yalnızca renkli yüzeyler ile ilgilenmiş, bir bölümü daha kapsamlı bir yaklaşımla, rengi duyulanma ya da ışığın fiziksel ya da psikolojik algılanması biçiminde açıklamış ve yüzey renkleri ayrımını yapmışlardır (Ünver 2000). Bunun sonucu olarak farklı renk sistemleri ortaya çıkmış ve değişik ülkelerde değişik renk sistemleri ulusal renk standardı olarak kullanılmaya başlanmıştır. Örneğin Munsell Renk Sistemi, ABD, Japonya ve İngiltere'de, Doğal Renk Sistemi (NCS), İsveç, Norveç ve İspanya'da, Alman Renk Kartları (DIN 6164), Almanya ve bazı orta Avrupa ülkelerinde ulusal renk standardı olarak kullanılmaktadır. Türkiye'de ise renk konusunda henüz bir standart yoktur (Yılmaz 2002).

Renk sistemleri, renkli yüzeylere yönelik olarak “*Renk Sıralama Sistemleri (Color Order Systems)*” ve yüzey renklerine yönelik olarak da “*Renk Uzayları (Color Spaces)*” olmak üzere iki ana gruba ayrılır.

2.2.1. Renk sıralama sistemleri

Renk sıralama sistemlerinde, benzer renkler yan yana getirilir ve renk değişimleri sürekli olacak biçimde sıralanır. Her sistemin kendine özgü renk tanımlama biçimi vardır. Tanımlanan renklerin belli bir düzende yer aldığı üç boyutlu şekle “renk katısı (color solid)” adı verilir. Renk sıralama sistemleri üç temel yolla oluşturulur:

- Boya karışım sistemi (*colorant mixture system*): Boya maddesinin düzenli değişen oranlarıyla ve çıkarmalı renk karışımı yöntemiyle renkler tanımlanır ve sıralanır.
- Renk karışım sistemi (*color mixture system*): Renkölçerler ile toplamalı renk karışımı yöntemine göre renkler tanımlanır ve sıralanır. En tanınmış örneği Ostwald Renk Sistemi’dir.
- Renk görünüm sistemi (*color appearance system*): Gözlemcinin renksel duyulanmasına bağlı olarak renkler tanımlanır ve sıralanır. En tanınmış örneği Munsell Renk Sistemi’dir.

2.2.1.1. Ostwald renk sistemi

Ostwald renk sistemi, renklerin bir çember üzerine düzenli olarak sıralandığı, dairenin merkezine doğru rengin grileştiği ve tümünün aşığı doğru koyulaşıp, yukarı doğru aşığı düşünüldükçe, renk çemberi boyunca taban tabana birleşmiş iki koniden oluşmuş geometrik bir yapıya sahiptir (Şekil 2.4). Ostwald renk sisteminde 4 temel renk ve 8 tonlama vardır. Ana renkler sarı, deniz mavisi, kırmızı ve deniz yeşilidir. Bu renklerde kendi aralarında 24 renk oluşturacak şekilde daire üzerinde yer alırlar (Agoston 1987).



Şekil 2.3. Ostwald renk sistemi (Agoston 1987)

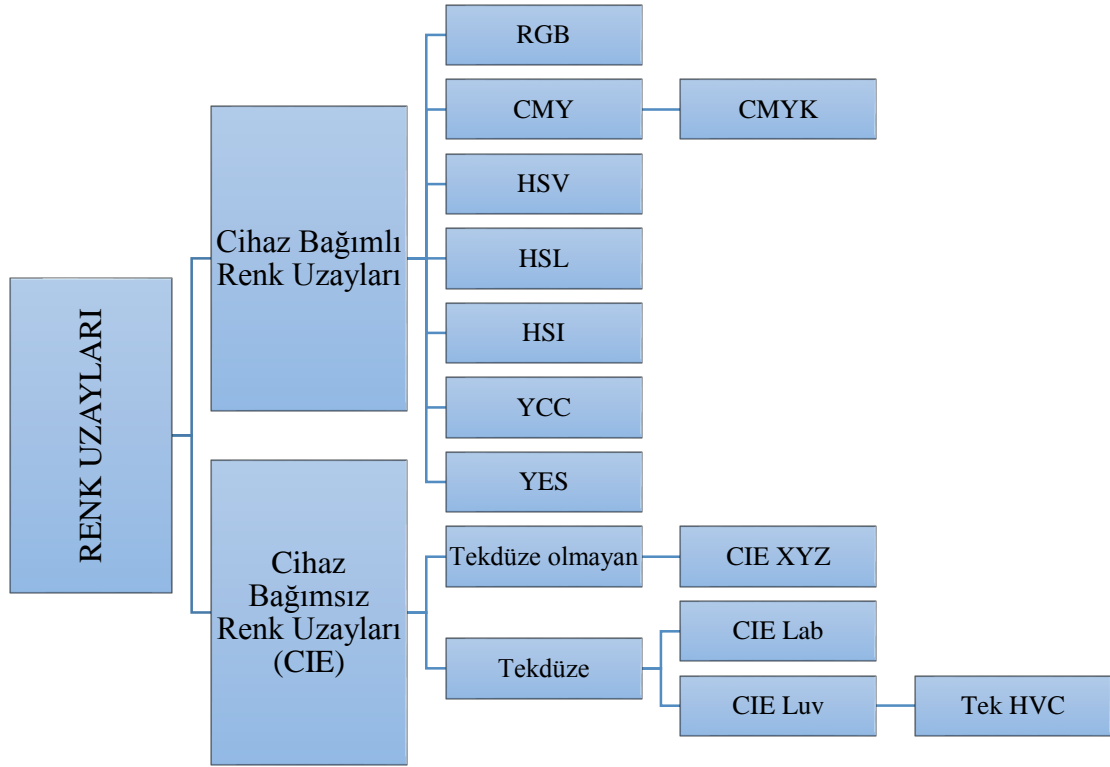
2.2.1.2. Munsell renk sistemi

Munsell renk sistemi, bir rengin görsel özelliklerinin üç bileşenle tanımlanabileceği ve herhangi bir bileşenin eşit adımlarının, eşit görsel algılama adımlarına karşılık geleceği düşüncesine dayanmaktadır (Ünver 2000). Sözü edilen üç bileşen renk adı (*H: hue*), değer (*V: value*) ve doğunluk (*C: chroma*) tur.

2.2.2. Renk uzayları

Renk uzayları renkleri tanımlamak için kullanılan matematiksel modellerdir. Renk uzayları, bütün renkleri temsil edecek şekilde oluşturulur. Renk uzayları 3 boyutlu olarak tasarlanır, çünkü renkmetri biliminin temelini oluşturan Grassmann'ın birinci kanununa göre bir rengi belirlemek için birbirinden bağımsız üç değişkene gerek vardır. Renklerin renk uzayındaki yerleri bu değişkenlere göre belirlenir.

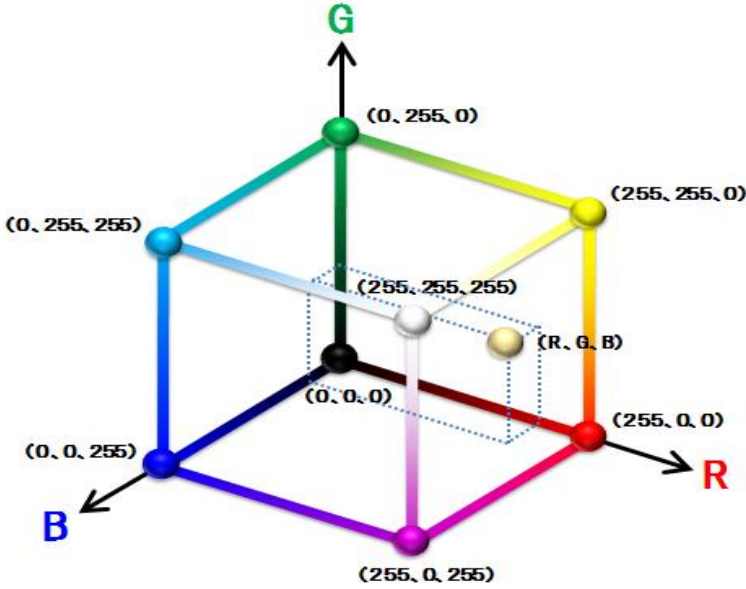
Farklı renkli görüntüleme ve işleme cihazları farklı renk uzayları kullanır. Örneğin televizyon, bilgisayar monitörleri ve tarayıcılar RGB renk uzayını, yazıcı ve çiziciler CMY(K) renk uzayını kullanır. Renk uzayları genel olarak cihaz bağımlı ve cihaz bağımsız renk uzayları olarak iki gruba ayrılır. Cihaz bağımlı renk uzaylarında renkler cihazın özelliklerine bağlı olarak üretilir. Yani tamamen cihazın teknik özelliklerine bağlıdır. Cihaz bağımsız renk uzayları ise CIE tarafından geliştirilen ve bütün renkler için renk ölçümünü sağlayan, renkmetride kullanılan uzaylardır. CIE tarafından geliştirilen bu renk uzaylarında renk ile ilgili ortaya konulan ve önerilen tanımlamalar (Standart gözlemci ve standart aydınlatıcı gibi) kullanılmıştır (Kang 1996). Şekil 2.3'de yaygın olarak kullanılan renk uzayları görülmektedir.



Şekil 2.5. Renk uzayları (Kang 1996)

2.2.2.1. RGB renk uzayı

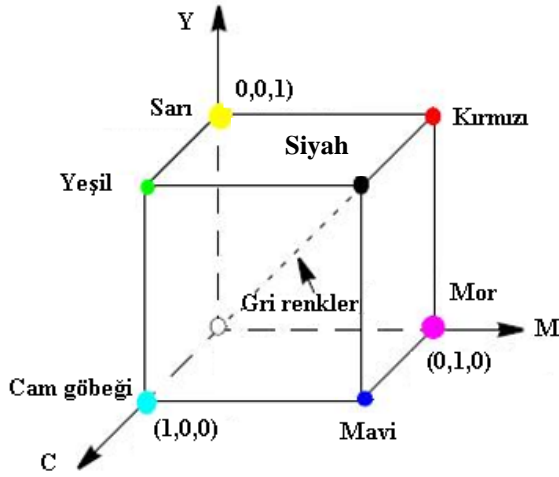
RGB renk uzayı koordinat eksenleri kırmızı, yeşil ve mavi olan bir uzay olarak düşünülebilir. Oluşturulmak istenen renkler bu üç ana rengin koordinatları cinsinden ifade edilir (Şekil 2.6). RGB renk uzayı, bilgisayar monitörleri, tarayıcılar ve katodik televizyon tüpleri gibi cihazlarda kullanılır. Herhangi bir rengi bilgisayarda görüntülemek için bu üç renk belirli yoğunluklarda karıştırılır.



Şekil 2.6. RGB renk uzayı (Yılmaz 2002)

2.2.2.2. CMY renk uzayı

CMY renk uzayı çıkarmalı renk karışım yöntemi yardımıyla birim küpte renklerin tanımlanmasıdır (Şekil 2.7). Cyan, magenta ve sarı, CMY renk uzayının eksenleridir. Bu sistem toplamalı renk karışımı yönteminin yani RGB renk uzayının tamamlayıcısıdır. Bunun anlamı CMY renk uzayını oluşturan iki bileşenin karışımıyla RGB renk uzayını oluşturan bir bileşenin elde edilmesidir. Örneğin cyan ve magenta karıştırılınca, cyanın emilmesiyle magenta kırmızıyı, magenta'nın emilmesiyle cyan yeşili yansıtır. Böylece sadece emilme olmayan bölgede mavi kalır. Benzer olarak cyan ve sarı karışımı yeşili ve magenta ve sarı karışımı kırmızıyı verir. CMY renk uzay küpünün (0,0,0) noktası beyazı ve (1,1,1) noktası siyahı gösterir. Teorik olarak küpün beyaz ve siyah noktalarını birleştiren diagonal çizgi boyunca ana renklerin eşit oranlarda katılmasıyla gri renkleri oluşur. CMY renk uzayı özellikle renkli baskı ve çoğaltma alanlarında, renkli yazıcılarda ve çizicilerde kullanılır.



Şekil 2.7. CMY renk uzayı (Agoston 1987)

2.2.2.3. CIE XYZ renk uzayı

X, Y ve Z değerleri üç ana rengin (kırmızı, yeşil, mavi) algılanmasını sağlayan sınırların beyne yolladıkları uyarıların toplamıdır. Her üç uyarımın ayrı ayrı toplam uyarı miktarına olan oranı rengi tanımlar. Beyin bu üç büyüklüğün bileşimini yaparken, oranlamalar ile de renk duyulanmasını gerçekleştirir. X, Y ve Z değerlerinin toplamı rengin görsel duyulanma toplamına eşittir. Bu toplam içinde kırmızı rengin algılanma oranı;

$$x = \frac{X}{X+Y+Z} \quad (2.3)$$

yeşil rengin algılanma oranı;

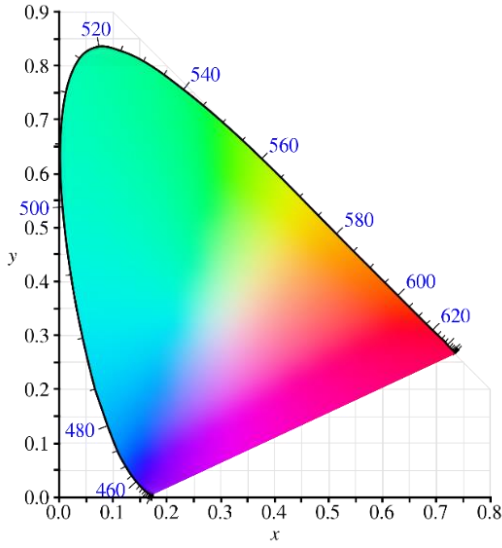
$$y = \frac{Y}{X+Y+Z} \quad (2.4)$$

mavi rengin algılanma oranı ise aşağıdaki şekilde olmaktadır;

$$z = \frac{Z}{X+Y+Z} \quad (2.5)$$

$$x+y+z=1 \quad (2.6)$$

Burada x , y ve z değerleri 0-1 arasında ve teorik olarak beyaz renk $x = y = z = (1/3)$ noktasıdır. Bu noktadan uzaklaştıkça renklerin doymuşluğu artar. CIE tarafından 1931 yılında standart aydınlatıcı (A, B, C, D₅₀, D₆₅, E, F) ve standart gözlemci (2°, 10°) tanımları üzerine kurulan CIE XYZ renk uzayının iki boyutlu gösterimi (gamut şekli) bu esasa dayanır (Şekil 2.8). Renk biliminde gamut renkli görüntü işleme cihazlarının sahip olduğu renk yelpazesi olarak tanımlanır (Bourgin 1994).

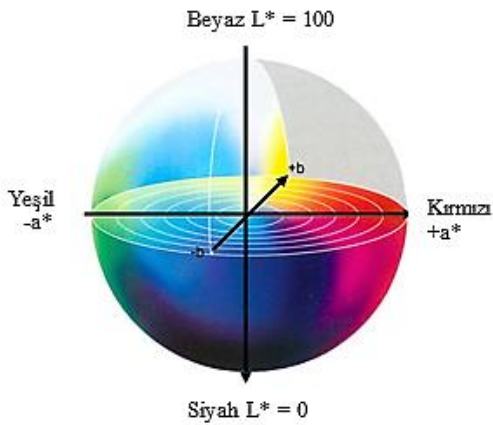


Şekil 2.8. CIE XYZ renk uzayının iki boyutlu gösterimi (Bourgin 1994)

2.2.2.4. CIE Lab renk uzayı

Bir rengin uyarımı değiştiği zaman, gözlemci bir süre sonra renkte bir farklılık algılayacaktır. CIE Lab renk uzayının en belirgin özelliği renk uzayının algılama yönünden düzgün değişim göstermesidir. CIE Lab renk uzayı Munsell renk sistemi üzerine kuruludur. CIE Lab renk uzayı 1976 yılında görsel medya için tasarlanıp oluşturulmuştur. Günümüzde CIE Lab renk uzayı çeşitli alanlar için standart renk uzayı olarak seçilmiştir ve bugün pek çok uygulamada kullanılmaktadır.

CIE Lab renk uzayında L bir rengin açıklığını, a kırmızı ve yeşilliği, b sarı ve maviliği gösterir (Şekil 2.9). Bu değerler CIE XYZ renk uzayına bağımlı olarak hesaplanır. Bu hesaplama için gerekli ilişki beyazın CIE XYZ uzayındaki değerleriyle sağlanır. Dolayısıyla bu değerlerin hesaplanması için yani X , Y ve Z değerlerinden L , a ve b değerlerinin hesaplanması için standart aydınlatıcının ve standart gözlemcinin hangisi olacağına karar verilmelidir.



Şekil 2.9. CIE Lab renk uzayı (Bourgin 1994)

2.2.3. Renk uzayları arasında dönüşüm

2.2.3.1. CIE XYZ renk uzayından RGB renk uzayına dönüşüm

CIE XYZ renk uzayında Y bileşeni, insan gözünün parlaklığa olan duyarlılığına karşı gelir. Y değeri ideal bir beyaz için 100 olarak alınır. Bunun anlamı her standart aydınlatıcıda ve her standart gözlemcide beyaz için $Y = 100$ 'dür. Çizelge 2.1'de CIE XYZ renk uzayındaki değerler görülmektedir.

Çizelge 2.1. CIE XYZ renk uzayındaki standart renk değerleri

Renk	X	Y	Z
Kırmızı (R)	0.64	0.33	0.03
Yeşil (G)	0.30	0.60	0.10
Mavi (B)	0.15	0.06	0.79
Beyaz (W)	0.31	0.33	0.36

Standart aydınlatıcı ve standart gözlemciye bağlı olarak beyaz gibi kırmızı, yeşil ve mavinin de ideal yani saf renk olduğu x , y ve z değerleri (X_R , Y_R , Z_R) bilinmelidir. Bu değerler genellikle üreticileri tarafından verilir. CIE XYZ renk uzayından RGB renk uzayına dönüşümün genel bağıntısı aşağıdaki gibidir;

$$\begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} \quad (2.7)$$

Burada dönüşüm matrisinin hesaplanması gerekmektedir. Dönüşüm matrisi,

$$\begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_R X_R & a_G X_G & a_B X_B \\ a_R Y_R & a_G Y_G & a_B Y_B \\ a_R Z_R & a_G Z_G & a_B Z_B \end{bmatrix} \quad (2.8)$$

şeklinde yazılabilir. Burada a_R , a_G ve a_B değerleri standart beyaza göre hesaplanır. Çünkü standart beyazın X_w , Y_w ve Z_w değerleri bilinmektedir. R , G ve B değerleri ise bu üç değer birbirine eşit olması halinde teorik olarak beyazın elde edileceği bilgisine dayanarak $R_w = G_w = B_w = 1$ alınabilir. Buradan,

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_R X_R & a_G X_G & a_B X_B \\ a_R Y_R & a_G Y_G & a_B Y_B \\ a_R Z_R & a_G Z_G & a_B Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 \\ 1 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$\begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_R \\ a_G \\ a_B \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$\begin{bmatrix} a_R \\ a_G \\ a_B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X_w \\ Y_w \\ Z_w \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

yazılıp, a_R , a_G ve a_B değerleri bulunur. Bu değerler denklem 2.8'de yerine yazılarak dönüşüm matrisi elemanları bulunmuş olur. Sonuç olarak CIE XYZ renk uzayından RGB renk uzayına dönüşüm aşağıdaki bağıntıyla yapılır (Bourgin 1994).

$$\begin{bmatrix} R \\ G \\ B \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_R & X_G & X_B \\ Y_R & Y_G & Y_B \\ Z_R & Z_G & Z_B \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} X \\ Y \\ Z \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

2.2.3.2. CIE XYZ renk uzayından CIE Lab renk uzayına dönüşüm

Dönüşüm için öncelikle standart aydınlatıcı ve standart gözlemciye göre beyazın hangi değerlerinin kullanılacağına karar verilmelidir. CIE Lab renk uzayının CIE XYZ renk uzayı değerlerinden elde edilmesini sağlayan bağıntılar şunlardır (Agoston 1987):

$$L = 116 \left(\frac{Y}{Y_w} \right) - 16 \quad (2.13)$$

$$a = 500 \left[f \left(\frac{X}{X_w} \right) - f \left(\frac{Y}{Y_w} \right) \right] \quad (2.14)$$

$$b = 200 \left[f \left(\frac{Y}{Y_w} \right) - f \left(\frac{Z}{Z_w} \right) \right] \quad (2.15)$$

$$f(\alpha) = \begin{cases} \alpha^{\frac{1}{3}}, & \alpha \geq 0.008856 \\ 7.787\alpha + \frac{16}{116}, & \alpha < 0.008856 \end{cases} \quad (2.16)$$

2.2.3.3. RGB renk uzayından CMY renk uzayına dönüşüm

RGB ve CMY renk uzayları birbirinin bütünüdür. Bu nedenle renk karışım yöntemleri ile Şekil 5.2 ve Şekil 5.3'ten RGB Renk Uzayından CMY Renk Uzayına Dönüşüm için aşağıdaki bağıntılar kullanılabilir:

$$C = 1 - R \quad (2.17)$$

$$M = 1 - G \quad (2.18)$$

$$Y = 1 - B \quad (2.19)$$

2.3. Işığın Bitki Gelişimine Etkisi

Güneşten gelen ışının yeryüzünde ölçülebilen spektral dağılımı yaklaşık olarak 300-1000 nm arasındaki dalga boyu bandı genişliğindedir. Ancak, yeryüzüne ulaşan ışının yalnızca %50'sinin fotosentetik etkili ışınım olduğu bilinmektedir. Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE: *Commission Internationale de L'Eclairage*), PAR bölgesinin elektromanyetik tayf içerisinde, 400-700 nm arasındaki dalga boylarını kapsadığını bildirmektedir. PAR aralığında olsa da, her bitki dalga boylarına karşı aynı duyarlılığa sahip değildir. Nispeten güçlü bir yansıma ve iletim sonucunda, yaprak tarafından en az yeşil ışık etkili olarak kullanılır. Yaprığın insan gözü tarafından yeşil olarak algılanmasının nedeni de bu durumdur. Bitkinin büyümesinde çeşitli dalga boylarının ışınım etkisi, tayfdaki bitki duyarlılık eğrisi ile gösterilebilir. Bu fotosentetik etkinlik tayfı her dalga boyu tarafından emilen fotonların sayısına (ışık kuantumu) bağlıdır. Böyle bir etkinlik tayfına ayrıca ışık tayfı kuantum etkisi de denir.

McCree (1972) yaptığı araştırmalarda, kuantum etkisinin en yüksek olduğu bölgenin en etkili fotosentezin sağlandığı turuncu-kırmızı bölge olduğunu göstermiştir. Bununla birlikte bitkilerin düzgün bir şekilde gelişmeleri için dengeli bir ışık tayfı alması oldukça önemlidir. Bu nedenle bitkilerde sağlıklı bir gelişim için mavi ışığın oranı da önemlidir. Bitkinin az miktarda mavi ışık alması uzamaya (aşırı kök büyümesi) ve bazen sarılaşan yapraklara neden olur. Öte yandan kırmızı oranının düşük olması kökün büyümesini engellemektedir. Bu duyarlılık tepkileri bitki türlerine göre değişmektedir.

Bitkiler, PAR bölgesinin yanında, elektromanyetik tayf dışındaki ışınları da algılayabilecek duyarlı pigmentlere sahiptirler. Bu pigmentlere fotoreseptör adı verilmektedir (Güvenç 2000). Fotoreseptörler, bitkilerin yapraklarında bulunan ve fotonları yakalayıp foton enerjisini kimyasal enerjiye dönüştüren başlıca aktif elemanlardır. Fotoreseptörler arasında bazı etkileşimler bulunmaktadır, yani birbirlerine bağımlıdırlar. Bir pigmentin hareketi ve işlevi, diğer pigmentlerin işlevlerine tesir etmektedir. Örneğin kısa gün koşullarında mavi ve kırmızı ışıkların kriptokrom ile fitokrom arasında sinerjistik etkileşimleri bulunmaktadır. Ancak sürekli aynı ışığın verilmesi durumunda bunlar birbirinden bağımsız hale geçerler. Çiçeklenme üzerinde kriptokrom ile fitokrom arasında antogonistik bir etkileşim söz konusudur (Casal 2000). Fotoreseptörler aşağıdaki şekilde sınıflandırılabilirler (Padem ve Özdamar 2002):

- Mavi ışık sistemleri
 - Kriptokrom
 - Fototropin
- Kırmızı-kızılötesi ışık sistemleri
 - Fitokrom

Kriptokrom: Kriptokromun aksiyon spektrumu ultraviyole ışınımına denk gelen 370 nm yakınında ve mavi spektral bölgede 400 ve 500 nm arasında 3 tepe noktası vermektedir. Kriptokromun moleküler yapısı üzerine yapılan çalışmalarda kriptokrom kromoforun, flavin veya karatinoid yapısında olabileceğini ortaya koymuştur. Kriptokrom, gövde uzaması, yaprak genişlemesi, çiçeklenme zamanı, hipokotil gelişimi, hücre uzaması gibi fizyolojik olaylarda yer almaktadır (Briggs ve Huala 1999, Lin 2000).

Fototropin: Fototropin, bir çeşit flavoprotein olup sitoplazmik kalsiyum yoğunluklarını ayarladığı ve protein kinaz aktivitesine sahip olduğu bilinmektedir (Lin 2000). Fototropin fototropizmi kontrol eder, yaprak alanı, gövde uzunluğu, kuru ağırlık, stoma açılımı gibi fizyolojik olaylarda etkili olmaktadır (Dougher ve Bughee 2001).

Fitokrom: Fitokrom, protein orijinli bir renk pigmentidir. Işıklı sürede ve ışık kalitesine göre, ışığın bulunduğu veya bulunmadığı zamanlarda bitki büyümesini ve gelişimini ayarlamaktadır (Andiç 2002). Çimlenme, sürgün uzaması ve dallanması, çiçeklenme, yaprak gelişimi, internodyum uzunluğunun kontrolü, gövde uzaması ve genişlemesi gibi bitki büyüme ve gelişmesinin birçok safhalarına etki etmektedir (Vardar vd 1973)

Hendricks ve Borthwick (1965) tarafından yapılan bir araştırmada *Xanthium Pennsylvanicum*'un çiçeklenmesinde, çiçeklenmeyi engelleyen dalga boyları 680 nm'nin her iki yanında yer alırken, çiçeklenmeyi uyaran 730 nm'ye komşu dalga boylarında bulunduğu gözlemlenmiştir.

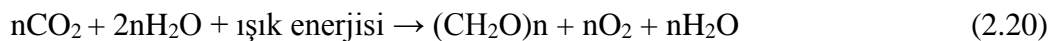
Bu araştırmacılar marul tohumlarının çimlenmesinde ışığın etkisini de incelemişler ve 660 nm'deki indüksiyonun, 730 nm'ye maruz bırakmakla ortadan kaldırılabilir olduğunu saptamışlardır (Taiz ve Zeiger 2002). Bunun için iki ışıkta kalma süresi arasında çok fazla zaman geçmemesi (Ortalama oda sıcaklığı koşullarında 20 saat) koşulu vardır. Bu şekilde olmazsa dormansi tamamen kaldırılmış demektir.

2.4. Fotosentez İçin Etkin Işınım

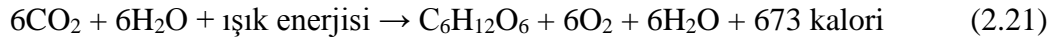
Işığın asıl işlevi, ışınım enerjisinin, CO₂, fotokimyasal ve biyokimyasal işlemlerle karbonhidratlara dönüştürdüğü bir enerji transferi işlemi olarak tanımlanabilen fotosentez olayıdır. Fotosentez sürecinde ışık enerjisi, bitkideki pigmentler (klorofil) tarafından emilir. Klorofildeki enerji düzeyi, emilen ışık özü nedeniyle yükselir. Çevre koşulları ve bitki türlerine bağlı olarak değişen bir doyum noktasına kadar ışınım şiddetinin artması ile fotosentez hızı da artar. Klorofil esas olarak mavi ve kırmızı ışığı emdiğinden, fotosentez hızı ışınım spektrumunun mavi ve kırmızı bölgesinde en yüksek değerdedir. Diğer taraftan, klorofil yeşil ışığın önemli bir bölümünü geçirir ve yansıtır. Bu nedenle yapraklar yeşil renk alır (Öztürk 2008).

Fotosentezin doğası gereği, fotosentez hızı O₂ miktarının değişimi ile saniyede birim alan başına yaprak yüzeyine düşen fotonların sayısı arasında yakın bir ilişki vardır. Bu yüzden, PAR için önerilen ölçüm birimleri kuantum sisteminde ve fotonların "mol" veya "mikromol" sayısı ile ifade edilmiştir. PAR'ın ölçümü Fotosentetik Foton Akısı Yoğunluğu (*PPFD: Photosynthetic Photon Flux Density*) olarak ifade edilmektedir. PPFD, birim zamanda birim yüzey alanına düşen fotonların mol sayısını vermektedir. Bununla birlikte, (*PPF: Photosynthetic Photon Flux*) terimi de aynı miktarı göstermekte ve sıkça kullanılmaktadır.

Fotosentez, fotoperiyodizm, fototropizm ve fotomorfogenesis ile birlikte toplam dört temel işleyiş, ışınım ve bitkiler ile ilgili etkileşimlerden sorumludur. Genel fotosentez denklemi şöyledir:



Ancak heksoz şekerleri ve nişasta ana ürünler olduğundan, genelde aşağıdaki basit denklem fotosentezin ifadesinde kullanılır:



Burada C, CO₂'den ve H, H₂O'dan gelmektedir. Denklemde görülen basit karbonhidratların yapısındaki O₂'nin, radyoaktif ağır su ile yapılan denemeler sonucu sudan geldiği bulunmuştur. Karbonhidratların yapısına katılan O ise, karbondioksitten gelmektedir. Fotosentez sırasıyla aydınlık ve karanlık safha olmak üzere iki kısımda gerçekleşir ve aydınlık safha için ışık gereklidir. Karanlık safhada ise ışık kullanılmaz. Fakat karanlık safhada aydınlık safhanın ürünleri kullanıldığı için aydınlık safha olmadan karanlık safha gerçekleşemez. Ayrıca bakterilerde H kaynağı olarak H₂O kullanılmadığı için ürün olarak O₂ açığa çıkmaz.

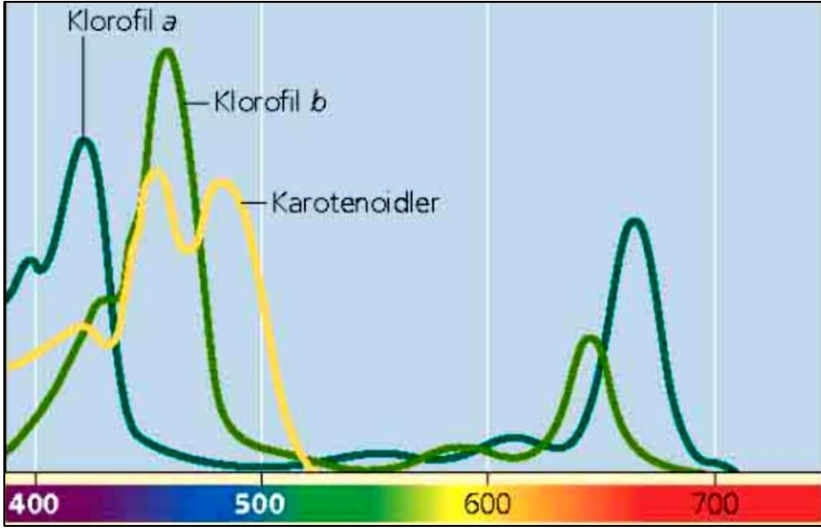
Fotosentez, ışık enerjisini kimyasal bağ enerjisine dönüştürerek ilk basamaktaki organik madde üretimini sağlayan mekanizmadır. Bitkiler besin zincirinin ilk halkasını oluşturduğundan, diğer tüm canlıların var olabilmesi ve yaşamlarını sürdürebilmeleri için gerekli enerji fotosentez olayı sırasında elde edilir. Fotosentezle havanın CO₂ ve O₂ dengesi korunmaktadır. Fotosenteze ilişkin bu bulgular, her yeşil bitkinin organik madde üreten bir fabrika, bu süreçte güneş enerjisini kullanan aygıtlarında kloroplastlar olduğunu göstermiştir. Yeryüzüne ulaşan güneş ışınlarının yalnızca yarısı fotosentezde kullanılmaktadır.

2.4.1. Pigmentler

Fotosentezde en önemli olgu, güneş enerjisini yakalayıp onu kimyasal bağ enerjisine dönüştürebilme yeteneğidir. Bu işlevi bitkilerin kloroplastlarında veya kromatoforlarında bulunan pigmentler (Renk verici madde) yapmaktadır (Larson 1997). Bu pigmentlerin başlıcaları *Klorofiller*, *Karotenoidler* ve *Fikobilinler* sayılabilir.

Klorofiller: Çeşitli dalga boylarındaki ışıkları emerek bitkide fotosentez olayının meydana gelmesine sebep olan, yeşil renkli bir pigmenttir. Bitkilerde bulunan klorofil beş çeşit olup, bunlar *a*, *b*, *c*, *d* ve *e* şeklinde adlandırılır. Bunların molekülleri birbirine çok benzer. Damarlı yeşil bitkilerde klorofil *a* ve *b*, 3/1 oranında bulunur. Diğer klorofiller bu bitkilerde bulunsu bile çok az veya eser miktardadır. Klorofil bitkide kloroplast adı verilen organellerin içinde bulunur.

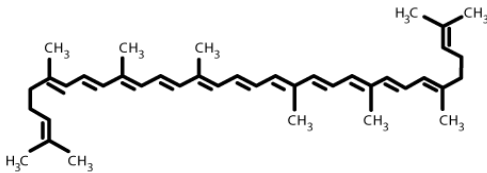
Klorofil *a*, bakteriler hariç bütün yeşil bitkilerde, Klorofil *b*, yüksek bitkilerde ve yeşil yosunlarda bulunur. Klorofil *d*, kırmızı yosunlarda, klorofil *c*, kahverengi yosunlarda, diadomlerde ve öğlena gibi bir hücreli kamçılılarda bulunur. Klorofil *a*, dalga boyu 662 nm, klorofil *b* ise dalga boyu 654 nm olan ışığı absorbe etmektedirler (Şekil 2.10). Klorofil *a*'nın formülü C₅₅ H₇₂ O₅ N₄ Mg olup dört tane pirrol halkasına sahiptir. Ortada, Mg pirrol halkasındaki azotlar ile çekirdek teşkil etmiştir. Pirrol halkaları birbirlerine karbon köprüleriyle bağlanmışlardır. Böylece büyük bir halka meydana gelmiştir. Klorofil *b* molekülünün kapalı formülü C₅₅ H₇₀ O₆ N₄ Mg'dir. Açık formülü klorofil *a*'dan biraz farklıdır. Klorofilin meydana gelmesi için ışık şarttır. Bazı fıstık çamı, eğrelti otları gibi bitkiler karanlıkta da yeşilliklerini korurlar.



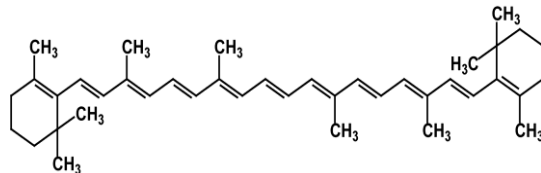
Şekil 2.10. Kloroplast pigmentleri tarafından absorbe edilen ışığın dalga boyları

Karotenoidler: Karotenoid bitkilerde ve bazı diğer fotosentetik mikroorganizmalarda (yosunlar, bazı mantarlar ve bazı bakterilerde) bulunan pigmenttir. Altıyüzün üzerinde bilinen karotenoid vardır; ksantofiller ve karotenler olarak iki sınıfa ayrılmaktadır. Karotenoidler, C_{40} çoklu doymamış (polyunsaturated) hidrokarbonların (karotenler) ve bunların oksitlenmiş türevlerinin (ksantofiller) bir sınıfını oluşturur. Bu bileşikler, yağa zengin bir turuncu-kırmızı renk verir. Ham hurma yağı en zengin bitkisel karoten kaynaklarından olup yoğunluğu 500-700 ppm'dir. Havuca göre 15, domatese göre 300 kat daha fazla retinol eşdeğerine sahiptir. Analizler α - ve β -karotenlerin toplam karotenoid muhtevasının yaklaşık %90'ını oluşturduğunu gösterir; geri kalanı ise δ - karoten, γ - karoten, fitofluen, fitoen, zeakaroten, likopen, neurosporen ve α - ve β -zeakarotenlerdir.

Tokoferol ve tokotrienoller ham hurma yağında 600-1000 ppm yoğunluğunda bulunur. Ana bileşenler γ -tokotrienol (%44), α -tokoferol (%22), δ -tokotrienoldür (%12); geri kalanı ise α - ve β -tokotrienoller γ - ve δ -tokoferollerden oluşur. En yaygın karotenoidler, likopen ve A vitamininin öncülü olan β -karotendir. Bitkilerde ksantofil lutein en bol karotenoiddir. Bitkilerin yapraklarında bulunan lutein ve diğer karotenoidler bariz değildir, çünkü klorofil gibi diğer pigmentler tarafından maskelenir. Şekil 2.11.a ve b sırasıyla Likopen ve β -karoten yapısını göstermektedir.



(a)



(b)

Şekil 2.11. a) Likopen ve b) β -karoten yapısı

Fikobilinler: Fotosentezde görevli, fikobilin olarak bilinen pigment maddesi ile proteinlerin oluşturdukları yapılardır. Suda çözünebilir protein gruplarıdır. Yapısındaki protein ve fikobilin pigmenti arasında kovalent bağ bulunur, oluşan yapı ışığı yakalamada bir kromatofor olarak görev yapar. Fikobilinler sadece su yosunlarında (algler) bulunurlar. Kırmızı alglerde bulunan ve bu grubun renginin nedeni olan kırmızı renklisine "fikoeritrin"; mavi-yeşil su yosunlarında bulunan mavi-yeşil renkli fikobiline "fikosiyanin" denir. Bu pigmentlerde fotosentezde kullanılan ışık enerjisinin soğurularak klorofile aktarılmasında rol oynarlar. Çeşitleri; Fikoeritrin, Fikosiyanin, Allofikosiyanin, Fikoeritrosiyanin'dir (O'Carra vd 1980).

2.4.2. Fotosentez hızını etkileyen faktörler

Klorofil taşıyan bir hücrenin birim zamanda kullandığı CO₂ veya ürettiği O₂ miktarı fotosentez hızıdır. Fotosentezin normal hızda devam etmesi için fotosenteze etki eden faktörlerin normal düzeyde olması gerekir. Birinin eksik olması fotosentezi durdurur. Bazı faktörlerin normalin üzerinde olması fotosentez hızına etki etmez, çünkü fotosentez hızı etki eden faktörlerin en düşük olanına göre belirlenir ve buna minimum yasası denir.

Fotosentez hızını etkileyen başlıca faktörler iki başlık altında toplanabilir (Bulut vd 2000);

- Çevresel faktörler
- Genetik faktörler

Çevresel faktörler;

Işık şiddeti: Başlangıçta ışık şiddeti artıkça fotosentez hızı artar, ancak belli bir sınırı aşınca fotosentez hızı sabit kalır.

Işığın dalga boyu: Taşıdığı enerjiyi belirlemede kullanılır. Klorofil, mavi-mor ve kırmızı dalga boylu ışıkta daha çok ışık soğurur. Klorofil soğurduğu ışık oranında ATP (Adenosine Tri-Phosphate) üretir, çünkü tepkimeye girecek CO₂ sayısı üretilen ATP sayısına bağlıdır.

CO₂ miktarı: Yeterli ışık varsa CO₂ artıkça fotosentez hızı artar. İki değişkenden miktarı düşük olan faktör (CO₂ veya ışık şiddeti) fotosentez hızını sınırlayan faktördür. Işık şiddeti düşük ise CO₂ fazla bile olsa fotosentez hızı düşük olur. Atmosferde CO₂ miktarı %0.034 oranında bulunur. Bu orandaki artış fotosentezi arttırır. CO₂ fotosentezin substratıdır. Substrat arttıkça reaksiyon hızı belli bir noktaya kadar artar ve sabitleşir.

Sıcaklık: Işık şiddeti düşük veya CO₂ yoğunluğu çok az ise sıcaklığın artması hızı arttırmaz. Diğer faktörler yeterli ise sıcaklığın artması hızı arttırır. Belli sıcaklığın üstünde hızı azalır, çünkü özellikle stromada bulunan karanlık reaksiyonlarda görev alan enzimlerin yapısı bozulur.

Madensel tuzlar: Bitkinin veya klorofilin yapısına katılan elementlerden birinin eksikliğinde diğerlerinin miktarı yeterli bile olsa büyüme sınırlıdır. Mg klorofilin yapısına

katılırken, Fe klorofil sentezinde katalizör görevi yapmaktadır. N, proteinler ve klorofil için gereklidir ve P, ATP, DNA ve RNA yapısına katılır.

Su miktarı: Su miktarı fotosentezi belirli bir sınıra kadar artırır, çünkü H₂O elektron kaynağıdır. O₂ suyun parçalanmasıyla oluşur. Su yüzdesi %15'in altına düşerse fotosentez durur.

Oksijen miktarı: Oksijen yoğunluğundaki artış fotosentez hızının azalmasına sebep olur. Havanın %21'lik oksijeni fotosentez için sınırlayıcı faktördür. Oksijen varlığı oksijenli solunumu hızlandırır. Dolayısıyla hem solunum hem de fotosentez için gerekli ortak maddeleri solunumda daha fazla kullanılmalarına yol açmaktadır.

Genetik faktörler;

Kloroplast sayısı: Bitki hücrelerindeki kloroplast sayısı 20-100 arasında değişir. Fotosentez reaksiyonlarının olduğu bu organellerin sayısı arttıkça fotosentez hızı da artar. Yaprığı koyu yeşil olan bitkilerde kloroplast çok, açık yeşil olanlarda azdır.

Yaprak genişliği: Yeşil bitkilerin yaprak yüzeyi ne kadar genişse, ışıktan yararlanma oranı o kadar fazla olur. Aynı şekilde yaprak sayısı arttıkça fotosentez hızı da artar.

Stomaların yapısı ve sayısı: Bitkilerin yapraklarında bulunan ve karbondioksit alımını sağlayan gözeneklerdir. Yapraktaki gözenek sayısı ne kadar fazla ise karbondioksitten o kadar fazla yararlanılacağından stoma sayısını ve fotosentez hızını etkileyecektir.

Kütikula (epidermis) kalınlığı: Bitkilerde su kaybı kütikula kalınlığına bağlı olarak fotosentez hızını etkileyecektir.

Enzim miktarı: Fotosentez enzimleri ne kadar fazla ise, fotosentez de o kadar fazla olacaktır.

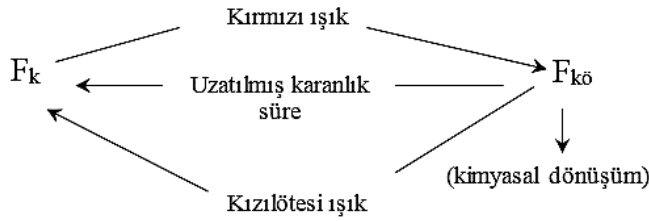
2.5. Fotoperiyodik Aydınlatma

Bitkilerde istenilen gelişmeyi kontrol edebilmek amacıyla gereksinim duyulan aydınlatmanın yapay olarak düzenlenmesi uygulamalarına "*fotoperiyodik aydınlatma*" adı verilir. Bitkiler fotoperiyodik aydınlatma uygulanarak tüm yıl boyunca yetiştirilebilir. Örneğin; fotoperiyodik aydınlatma ile krizantem ve sütleğende, karanfillerdeki kadar iyi sonuçlar elde edilmiştir (Karakaş 2008). Bu uygulamada amaç; elektriksel aydınlatıcılar yardımıyla günü uzatıp (geceyi kısaltıp), bitki bünyesindeki fitokrom kırmızı ötesi/fitokrom kırmızı (F_{kö}/F_k) oranını uzun gün etkisi yaratacak kritik değerin üzerinde tutabilmektir (Yağcıoğlu 2005).

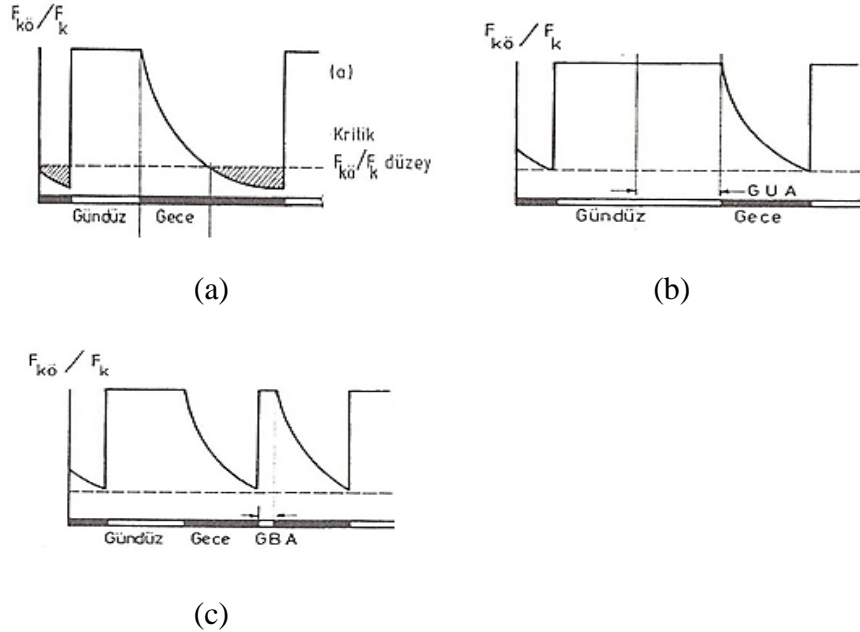
Fitokrom, bitkilerde meydana gelen fotoperiyodik tepkiler sonucu ortaya çıkan bir pigmenttir. Fitokromun birbirine dönüşebilen, fitokrom kırmızı (F_k) ve fitokrom kırmızı ötesi (F_{kö}) olmak üzere iki kimyasal formu bulunmaktadır. Fitokrom pigmentleri duyarlı oldukları dalga boyundaki ışınla karşılaştıklarında, kimyasal yapıları değişerek diğer ışına duyarlı hale dönüşürler. Kırmızıya duyarlı fitokromlar (F_k) duyarlı oldukları 660 nm dalga boyundaki ışınlarla karşılaştıklarında kimyasal yapıları değişir ve uzak kırmızıya

duyarlı şekle ($F_{k\ddot{o}}$) dönüşürler. Benzer şekilde, uzak kırmızıya duyarlı ($F_{k\ddot{o}}$) fitokromlar, duyarlı oldukları 735 nm dalga boyundaki ışınlarla karşılaştıklarında, kimyasal yapıları değişerek kırmızıya duyarlı şekle (F_k) dönüşürler. Fakat fitokrom kırmızı ötesinin fitokrom kırmızıya dönüşmesi için 735 nm dalga boylu kırmızı ötesi ışınlarla mutlak zorunluluk yoktur. Karanlıkta da fitokrom kırmızı ötesi çevre sıcaklığına bağlı olarak yavaş yavaş fitokrom kırmızı formuna dönüşür (Kendrick ve Frankland 1978).

Fitokromlarda fotodönüşümün başlayabilmesi için gerekli toplam enerji çok düşük olup, 1 veya 10 dakikalık ışınlamalar için $660 \text{ nm}'de 20 \text{ J.m}^{-2}$ olmaktadır (Hendricks ve Borthwick 1965). Bunun anlamı, daha tan yeri ağarırken ortaya çıkan ışınım enerjisinin fotodönüşümü başlatmak için yeterli olduğudur. Tan yerinin ağarmasıyla birlikte, fitokromların 660 nm dalga boyundaki ışınımın etkisiyle hızla ($F_{k\ddot{o}}$) şekline dönüştüğünü ve tüm aydınlık süre boyunca yaklaşık olarak %80 $F_{k\ddot{o}}$, %20 F_k oranını sağlayacak şekilde sabit bir oransal dağılım göstermektedir (Şekil 2.12). Gün batımıyla birlikte, $F_{k\ddot{o}}$ azalmakta, F_k sayısı artmakta ve buna bağlı olarak $F_{k\ddot{o}}/F_k$ oranı küçülmektedir (Şekil 2.13. a, b, c).



Şekil 2.12. Fitokrom dönüşümleri



Şekil 2.13. a) Doğal ışıklı ve karanlık süre içindeki $F_{k\ddot{o}}/F_k$ dönüşümü, b) günü uzatma ve c) geceyi bölme aydınlatması

Karanlık süre ne kadar uzun sürerse, o oranda fazla sayıda F_{k0} formundaki fitokrom, F_k formuna dönüşecektir. Bunun anlamı, sabah tan yeri ağardığında bitki bünyesindeki F_{k0}/F_k oranı ne kadar küçülmüşse, gece (karanlık) o kadar uzun sürmüş demektir. Bu işleyiş sonucu bitkiler, F_{k0}/F_k oranının ulaştığı değerden yararlanarak karanlık süreyi ölçmekte ve uzun ya da kısa gün şartlarında olup olmadıklarını anlamaktadırlar. Bu durum, bitkilerin genetik yapılarında o durum için şifrelenmiş davranışı göstermelerini sağlamaktadır. Etkili gün uzunluğunun çok yaygın yöntemleri üç ana gruba ayrılabilir (Yağcıoğlu 2005):

Günü Uzatma: Yapay ışık kaynakları gün batımından başlayıp yeterli süre boyunca çalıştırılarak veya gün doğumundan önce yakılıp, gün doğumunda söndürülerek de uygulanabilir.

Geceyi Bölme: Yapay ışık kaynakları gece yarısı belirli bir süre yakılıp söndürülür. Bu yöntemde aktif fitokrom kırmızı ötesinin, pasif fitokrom kırmızıya dönme hızının çok yavaş olması nedeniyle; aktif kimyasal yapıdaki fitokrom kırmızı ötesinin karanlıkta da etkisini bir süre devam ettirebilmesi, yöntemin temel hareket noktasıdır. Aydınlatıcılar, gece yarısı bir süre çalıştırılırlar. Yöntemin uygulanmasında önemli nokta, lambalar yakılmadan önceki ve söndürüldükten sonraki karanlık periyodun; F_{k0}/F_k oranının kısa gün etkisi yaratacak kritik değere inmesine yetmeyecek sürelerde kalmasının sağlanmasıdır. Örneğin; lambaların geceleri 22.00'de açılması ve 02.00'de kapatılmasıyla karanlık periyodun kesilmesi, fotoperiyodik olarak duyarlı bitkilerin tamamında uzun gün etkisini artırır. Bununla birlikte, birçok bitki türü karanlık dönemin 1 saat süresince kesilmesi durumunda tepki göstermektedir.

Geceyi Kesintili Bölme: Yapay ışık kaynakları gece yarısı belirli bir süre karanlık, belli sürelerde aydınlık olmak üzere periyodik olarak yakılıp söndürülmesi şeklinde uygulanır. Bu yöntemde de aktif fitokrom kırmızı ötesinin, pasif fitokrom kırmızıya dönüş hızının çok yavaş olmasından yararlanır. Aktif fitokrom kırmızı ötesinin karanlıkta da etkisini bir süre devam ettirebilmesi, geceyi bölme yöntemi sırasında, ışıkların sürekli yakılmayabileceği düşüncesini doğurmuştur. Buna göre, geceyi bölme aydınlatması süresi içinde, ışıkların belli bir düzene göre yakılıp söndürülmesi de aynı sonucu doğuracaktır (Deniz ve Ergüneş 2004).

Fotoperiyodik aydınlatmada, kırmızı ışık mavi ışıkla birlikte ve yüksek dozlarda verilebilirse çiçeklenmeyi, tohum üretimini ve meyve tutumunu artırıcı rol oynamaktadır. Mavi ışık bitkinin vejetatif gelişiminden sorumludur ve bitkinin morfolojik açıdan sağlıklı gelişmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Kırmızı ışığın ise çiçeklenme ve gelişmeye olumlu etkileri bulunmaktadır. Ayrıca tayfın mavi-yeşil bölgesi, enerjinin en yoğun olduğu bölge olarak bilinmektedir.

2.6. Bitkisel Aydınlatma İçin Tasarım Etmenleri

2.6.1. Işık miktarı ve yoğunluğu

Işık miktarının bitki için uygun seviyenin altında olması, bitkideki fotosentez etkinliğini ve hızını düşürebileceği gibi, üstünde olması durumunda da, fotosentez hızı durağan hale geçmektedir. Bitkisel aydınlatmada amaç, fotosentez hızını olabilecek en yüksek seviyeye getirmek için ışık düzeyini en uygun duruma ayarlamaktır. Bitkisel aydınlatma uygulamalarında ışık düzeyinin belirtilmesi için kullanılan en uygun birim, 400–700 nm dalga boyları aralığındaki belirli zaman süresince birim alana gelen kuantum veya foton miktarını gösteren kuantum akış yoğunluğu, Einstein veya $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ 'dir (Öztürk 2008). Farklı bitki türleri için en uygun ışık düzeyi; bitki sıra arası, beslenme düzeyi ve bitkinin yaşına göre değişim göstermektedir (Çizelge 2.2).

Çizelge 2.2. Bazı bitki türleri için önerilen ışık düzeyleri (Öztürk 2008)

Bitki türü	Işık düzeyi ($\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$)
Domates	450–750
Gül	450–750
Çilek	250–450
Marul	250–450
Hıyar	250–450
Kasımpatı	250–450
Krizantem	250–450
Karanfil	250–450
Afrika Menekşesi	150–250
Yapraklı Bitkiler	150–250

Kış dönemi, özellikle yüksek bölgelerdeki doğal ışınım düzeyindeki azalma bitkisel üretimi kısıtlayan bir faktördür. Seralarda ışınım düzeyini artırmak amacıyla yapay aydınlatma kullanılmaktadır. Yapay aydınlatma için yüksek ve düşük basınçlı sodyum buharlı, metal halojen, akkor telli ve flüorışıl lambalar ile son zamanlarda yarı iletken LED (Light Emitting Diode) lambalar kullanılmaktadır. Bazı bitki türleri için önerilen ışınım enerjisi, aydınlatma dönemi, aydınlatma süresi ile aydınlatma amacı Çizelge 2.3'de verilmiştir (Başçetinçelik 1977).

Çizelge 2.3. Bazı bitkiler türleri için ışınım enerjisi ve aydınlatma özellikleri (Başçetinçelik 1977)

Bitki türü	Işınım enerjisi (mW.m ⁻²)	Aydınlatma dönemi	Aydınlatma süresi (h)	Aydınlatma amacı
Domates	6000	Ekim-Şubat	14-16	Erkenci verim artışı
Hıyar	3000	Kasım-Şubat	Gün uzatma	Gelişmeyi hızlandırma
Çilek	200	Ocak ortasında	8-9 (gece)	Erken çiçek gelişimi
Karanfil	1300	Ocak-Şubat	Bütün gece	Sap ve çiçek artışı
Yıldız Çiçeği	2300	Eylül sonrası	6 (gece)	Çiçek artışı
Atatürk Çiçeği	300	Ekim başında	2-3 (gece)	Çiçeklenmeyi geciktirme
Küpe Çiçeği	1200	Eylül-Ekim	4	Çiçeklenme artışı
Şebboy	10000	Ocak-Şubat	16	Çiçek oluşumu
Lale, Nergis	3000-5000	Aralık-Şubat	12	Çiçeklenmeye zorlama

Fotoperiyodik aydınlatmada, fotosentez ve bitki gelişimini hızlandırmak için gerekli olan değerlerden daha düşük ışık miktarı gereklidir. Fotoperiyodik aydınlatma için ışınım enerjisi 6-12 W.m⁻² veya 20-40 µmol.s⁻¹.m⁻² yeterlidir (Öztürk 2008).

2.6.2. Aydınlatma süresi

Bitkilerin normal hayat evrimlerini tamamlayabilmeleri için belli bir gün uzunluğuna ihtiyaçları vardır. Gece ve gündüz uzunluğunun yıl içindeki çevrimi, bitkilerin büyümesini ve çiçeklenmesini doğrudan etkiler. Bitkilerin ışık ve karanlık dönem sürelerine verdikleri tepkiye fotoperiyodizm denir. Fotoperiyodizm bitkinin vejetatif dönemden generatif aşamaya geçmesinde etkilidir. Zieslin ve Mor (1990), gül yetiştiriciliği üzerinde yaptıkları çalışmalarda, vejetatif büyüme ve çiçeklenmenin yapay aydınlık şiddeti (<250 µmol.s⁻¹.m⁻²) ve aydınlatma süresiyle ilişkili olduğunu bildirmektedirler. Krizantem yetiştiriciliğinde ise yapay aydınlatma düzeyi ve süresinin, büyüme ve hasat süresi üzerinde önemli bir etkiye sahip olduğu saptanmıştır (Andersson 1990). Fotoperiyodizme göre 3 tür bitki vardır:

Kısa gün bitkileri: Günde 13–14 saatten az fotopriyotta çiçeklenme olurken, daha uzun ışık sürelerinde yapraklanma (vejetatif büyüme) görülür. Bazı fasulye, bezelye ve ıspanak çeşitleri, şeker pancarı, turp, yonca, patates, kasımpatı gibi bitkiler kısa gün bitkilerine örnek olarak gösterilebilirler.

Uzun gün bitkileri: Günde 13–14 saatten fazla ışık almaya başlayınca çiçek açar; daha kısa sürelerde ise ancak vejetatif olarak gelişirler. Ispanak, turp, salatalar, soğan, dereotu, havuç, lahana, bamya, bazı bezelye çeşitleri gibi bitkiler, uzun gün bitkilerine örnek olarak gösterilebilirler.

Nötr bitkiler: Fotoperiyot süresine bağlı olmaksızın çiçek açan bitkilerdir. Domates, biber, ayçiçeği, patlıcan, karnabahar, tütün, bazı patlıcan çeşitleri nötr bitkilere örnek olarak gösterilebilirler.

2.6.3. Işık kalitesi

Fotosentezi artırmak için yapılan aydınlatma uygulamalarında ve fotoperiyot kontrolü için ışık kaynağı seçiminde ışık kalitesi önemlidir. Elektromanyetik tayfın PAR olarak bilinen ve 400-700 nm dalga boyları aralığındaki özellikle mavi (460-480 nm) ve kırmızı ışık (650-700 nm) bitkiler tarafından fotosentez işlemi için en etkin olarak kullanılan dalga boylarıdır. Bu bakımdan bu aralıktaki ışık, fotosentez hızını artırdığından özellikle tercih edilir.

Ticari sera üretiminde, fotosentezi artırmak için yapılan aydınlatma uygulamalarında ve fotoperiyot kontrolü için ışık kaynağı seçiminde ışık kalitesi önemlidir. Tayfın 400-700 nm dalga boyları arasında kalan ışık, fotosentez hızını artırdığından özellikle tercih edilir. Gün uzunluğunu artırmak için kullanılan bir ışık kaynağı, pitokrom fotoreseptörünü etkileyebilmek için, kırmızı bölgede yeterli ışık sağlamalıdır. Bazı durumlarda, belirli dalga boylarının bağıl etkilerini artırmak için, ışık kalitesinin özellikle değiştirilmesi istenebilir. Bu işlem, genellikle bitki büyüme ve gelişmesini değiştirmek amacıyla yapılır. Örneğin; kırmızı ötesi ışığın azaltılıp, mavi ışığın artırılması sonucunda; kısa, koyu renkli ve kuvvetli bitkiler elde edilir. Işık kalitesi aynı zamanda Botrytis gibi bazı hastalıkların da gelişmesini etkileyebilir. Bu amaçla, çok dar dalga boylarında ışık yayan diyotlar kullanılabilir. Işınım spektrumu ve dalga boyunun farklı olması nedeniyle, bitkilerin yapay aydınlatmadan yararlanma etkinliği, doğal güneş ışınımından farklıdır. Yapay aydınlatma uygulamalarında yaygın olarak kullanılan sodyum buharlı lambaların bağıl fotosentezik etkinliği, güneş ışınımından %34 oranında daha yüksek olmalıdır (Öztürk 2008).

2.7. Fotosentez İçin Etkin Işınımın Yapay Işık Kaynakları ile Sağlanması

Örtü altında yetiştirilen bitkilerin PAR enerjisinden fotosentez için yararlanma etkinliği aşağıdaki eşitlik ile belirlenebilir (Yağcıoğlu 1996):

$$\eta = I_0 t \frac{I_m}{I_0 + I_m} 3600 \quad (2.22)$$

Burada; η bitkinin PAR enerjisinden yararlanma etkinliği ($J.m^{-2}$), I_0 bitkiye ulaşan ışınım enerjisi ($W.m^{-2}$), I_m bitkinin en yüksek düzeyde fotosentez yapabilmesi için gerekli ışınım enerjisi ($W.m^{-2}$), ve t aydınlatma süresi'dir (h).

Fotosentez için etkin ışınım (PAR), genel olarak güneş ışınımından sağlanır. Özel olarak tasarlanmış ışık kaynakları ile güneş ışınımına benzer ışınım sağlanmakla birlikte, bir veya birkaç adet ışık kaynağı aynı anda kullanılarak güneş ışınımında olduğu gibi 300 nm'den 2700 nm'ye kadar değişen spektral dağılım elde edilemez. Bazı ışık kaynaklarının ışınım gücü dağılımları Çizelge 2.4'te verilmiştir. UV 300-340 nm, PAR+RF 400-850 nm, IR 850-2700 nm ve ısı ışınım >2700 nm dalga boyları arasında dikkate alınmıştır.

Işınım ölçümlerinde radyometrik ve kuantum birim sistemleri, aydınlatmada ise fotometrik birim sistemi kullanılır. Radyometrik birimler belirli dalga boyu aralığında $W.m^{-2}$, kuantum birimleri ise 400-700 nm dalga boyları arasındaki Fotosentetik Foton Akısı Yoğunluğunun (PPFD) belirlenmesinde kullanılmakta ve $\mu mol.s^{-1}.m^{-2}$ veya

Einstein olarak ifade edilmektedir. Fotometrik ölçümlerde ise lm.m^{-2} veya lx birimleri kullanılmaktadır.

Çizelge 2.4. Bazı ışık kaynaklarının ışınım gücü dağılımı (ASAE 1994)

Işık kaynakları	UV 300-340 nm (W)	PAR+RF 400-850 nm (W)	IR 850-2700 nm (W)	Isıl ışınım >2700 nm (W)	Toplam (W)
Serin beyaz flüorışıl	2.0	36	1	61	100
Cıva buharlı	3.0	19	18	60	100
Yüksek basınçlı cıva buharlı	0.4	50	12	38	100
Düşük basınçlı cıva buharlı	0.1	56	3	41	100
Akkor telli	0.2	17	74	9	100
Metal halojen	4.0	41	8	47	100
Güneş	6.0	59	33	2	100

Bitkilerin çiçeklenme, çoğalma ve uzama gibi fotomorfojenik tepkilerine yardımcı olan ve yaklaşık 380-800 nm dalga boyları arasında yer alan ışınım “fotomorfojenik ışınım” olarak adlandırılır ve kuantum akış miktarı ($\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$) veya ışınım enerjisi (W.m^{-2}) olarak ölçülebilir. Değişik tip lambalardan yayılan ışınım, 400- 850 nm dalga boyu aralığında ışınım enerjisi (W.m^{-2}) veya 400-700 nm dalga boyu aralığında foton akış yoğunluğu olarak tanımlanır. Bazı yapay ışık kaynaklarından yayılan ışınım enerjisinin, aydınlık şiddetine veya foton akışı yoğunluğuna dönüştürülmesinde kullanılan sabit değerler Çizelge 2.5’de verilmiştir. Spektral güç dağılımlarındaki değişim nedeniyle, birimlerin birbirine dönüştürülmesi dalga boyuna bağlı olarak her ışık kaynağı için ayrı yapılmalıdır (Çizelge 2.6).

Çizelge 2.5. Işınım enerjisine (W.m^{-2}) dönüştürme değerleri (ASHRAE 1991)

Işık kaynakları (400-700 nm)	klx	$\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$
Güneş	4.02	0.22
Yüksek basınçlı sodyum buharlı	4.45	0.20
Düşük basınçlı sodyum buharlı	1.92	0.20
Metal halojen	3.05	0.22
Cıva buharlı	2.62	0.22
Ilık beyaz flüorışıl	2.81	0.21
Serin beyaz flüorışıl	2.93	0.22
Akkor telli	3.99	0.20

Çizelge 2.6. Işınım dönüşüm faktörleri (ASAE 1994)

Işık kaynakları	W.m ⁻² değerini $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ değerine dönüştürmek için çarpım sabiti	lx değerini $\mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$ değerine dönüştürmek için bölüm sabiti
Güneş ve gökyüzü	4.57	54
Mavi gökyüzü	4.24	52
Yüksek basınçlı sodyum buharlı	4.98	82
Metal halojen	4.59	71
Cıva buharlı	4.52	84
Ilık beyaz flüorişil	4.67	76
Serin beyaz flüorişil	4.59	74
Bitki gelişimi için flüorişil	4.80	33
Akkor telli	5.00	50
Düşük basınçlı sodyum buharlı	4.92	106

Bitkilerin yeterli fotosentez yapıp iyi bir gelişme gösterebilmeleri için, fotosentez işleminde kullanılacak 400-700 nm dalga boyunda günlük toplam 1.2-1.7 MJ.m⁻² ışınım enerjisi almaları gerekmektedir. Fotosentez amaçlı yapılan aydınlatma “*Tamamlayıcı Fotosentetik Aydınlatma (TFA)* ve *Tam Yapay Fotosentetik Aydınlatma (TYFA)*” olmak üzere iki grup altında incelenebilir (Yağcıoğlu 2005);

Tamamlayıcı fotosentetik aydınlatma (TFA): Doğal ışığın yeterli olmaması durumunda eksik olan ışınım enerjisinin elektrik lambaları kullanılarak sağlandığı uygulamadır.

Tam yapay fotosentetik aydınlatma (TYFA): Özel olarak hazırlanmış ve iklimlendirilmiş çimlendirme ve köklendirme odalarında, doğal güneş ışığının olmadığı şartlarda, özellikle çimlendirme ve köklendirme çalışmaları için gerekli toplam PAR enerjisinin tamamının elektrikli aydınlatıcılar tarafından sağlandığı uygulamalardır.

Çizelge 2.7’de, fotosentez amaçlı aydınlatma için kullanılacak lambaların uygunluk dereceleri verilmiştir (Yağcıoğlu 2005). Çizelgeye göre, TFA uygulamaları için en uygun lamba tipi yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar olurken, TYFA amaçlı uygulamalar için ise flüorişil lambalar olduğu görülmektedir.

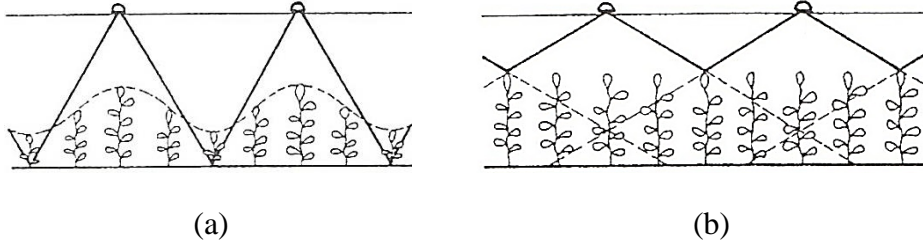
Çizelge 2.7. Fotosentez için kullanılacak lambaların uygunluk dereceleri (Yağcıoğlu 2005)

Lamba Tipi		Tamamlayıcı Fotosentetik Aydınlatma (TFA)	Tam Yapay Fotosentetik Aydınlatma (TYFA)
Flüorışıl lamba	MCF	-	İdeal
	MCFR	-	İdeal
Yüksek basınçlı cıva buharlı lamba	MB	Kullanılabilir	-
	MBFR/U	Çok uygun	Uygun
	HLRG	Uygun	Uygun
Yüksek basınçlı cıva buharlı halojen lamba	MBI	Çok uygun	Uygun
	MBIF	Çok uygun	Uygun
Düşük basınçlı sodyum buharlı lamba	SOX	Çok uygun	-
Yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba	SON	İdeal	-

TYFA uygulamaları bilimsel amaçlı çalışmalar dışında, daha çok fide yetiştiriciliğinde dış ortamdan tamamen yalıtılmış çimlendirme odalarında kullanılmaktadır. Bu uygulamada bitkiye verilecek yeterli PAR enerjisinin yanında, fotomorfogenetik sapmaların oluşmaması için ışının tayf kompozisyonunun da doğal ışığa yakın olmasına dikkat edilmelidir.

Fotosentez amaçlı aydınlatma uygulamalarında uygun lamba seçimine, sayısına ve sağlanacak ışınım enerjisinin yetiştirme alanına tekdüze olarak dağılmasına özen gösterilmelidir. Aydınlik tekdüzeliğinde ideal olan %100 oranının sağlanması pratik olarak mümkün değildir. Bu nedenle, dağılım tekdüzeliğinin %80 olması iyi bir değer olarak kabul edilebilir. TFA uygulamalarında yetiştirme alanı üzerindeki değerler arasındaki $\pm\%20$; TYFA uygulamalarında ise $\pm\%10$ farklılığın, o ortamdaki yetiştirilen bitkilerin gelişmesi açısından bitkiler arasında önemli bir fark oluşturmadığını göstermiştir. Aydınlik tekdüzeliğinin kabul edilebilir değerlerde kalabilmesi için, lambalar arası mesafeye, yansıtıcı seçimine ve asılma yüksekliklerine dikkat edilmesi gerekmektedir. Yansıtıcı seçimi ve yerleştirilmesinde yapılacak hatalı uygulamalar, bitkilerin büyüme ve gelişmelerinde önemli farklılıklar ortaya çıkaracaktır.

Şekil 2.14.a, dar açılı yansıtıcılar kullanılmış bir uygulamada yeterli örtme payı olmadığı için aydınlık tekdüzeliği bozulmuş ve az ışık alan bitkilerin gelişimi geri kalmıştır. Ancak, Şekil 2.14.b'de olduğu gibi geniş açılı yansıtıcılar kullanıldığında yeterli örtme payı sağlanabilmiştir.



Şekil 2.14. a) Dar açılı ve b) geniş açılı yansıtıcılar kullanıldığında örtme payının durumu

Üretim alanlarının kenar kısımlarında meydana gelebilecek olumsuzlukları en aza indirebilmek için kenar/alan oranının küçük olmasına çalışılması gerekir. Bu oran, alan büyüdükçe ve kareye yaklaştıkça küçülür. Örneğin, kenar/alan oranı, 1 m²'lik bir alanda 4 (4/1) iken, 100 m²'lik bir alanda 0.4 (40/100) ve 100 m x 1 m boyutlarındaki bir dikdörtgen alanı için 2.02 (202/100) olurdu. Bu nedenle sera ortamında aydınlatma lambaları ile sağlanan ışınım enerjisini etkin bir şekilde kullanabilmek için, aydınlatma yapılacak alan olabildiğince büyük ve kare şeklinde düzenlenmelidir. Ayrıca, günlük olarak gerekli toplam ışınım enerjisi, kısa süreli yüksek ışınımsal aydınlık şiddeti yerine uzun süreli düşük ışınımsal aydınlık şiddeti şeklinde uygulanması gerektiği bildirilmektedir (Yağcıoğlu 1996).

2.7.1. Lamba yerleştirme özellikleri

Bir serada yapay aydınlatma amacıyla kullanılacak olan lambaların yerleştirme özellikleri şunlara göre belirlenir;

- Sera boyutlarına bağlı olarak belirlenecek tasarım şekli,
- Gerekli aydınlık şiddetine bağlı olarak belirlenecek olan lamba tipi.

Bu iki özelliğe göre, lamba asılma yüksekliği, bir lambanın aydınlatacağı alan ve lambalar arası uzaklık özellikleri belirlenir (Yağcıoğlu 1996). Sera eni ve boyu doğrultusunda lamba sırası sayıları;

$$LSS_e = \frac{SE}{LAM_e} \quad (2.23)$$

$$LSS_b = \frac{SB}{LAM_b} \quad (2.24)$$

eşitlikleriyle belirlenebilir. Burada, LSS_e seranın eni doğrultusunda lamba sıra sayısı, LSS_b seranın boyu doğrultusunda lamba sıra sayısı, SE sera eni (m), SB sera boyu (m), LAM_e lambalar arası enine mesafe (m) ve LAM_b lambalar arası boyuna mesafedir (m).

Serada yapay aydınlatma amacıyla kullanılacak toplam lamba sayısı (LS) ise şu eşitlikle bulunabilir;

$$LS = LSS_e \times LSS_b \quad (2.25)$$

Serada yapay aydınlatma için gerekli toplam kurulu güç;

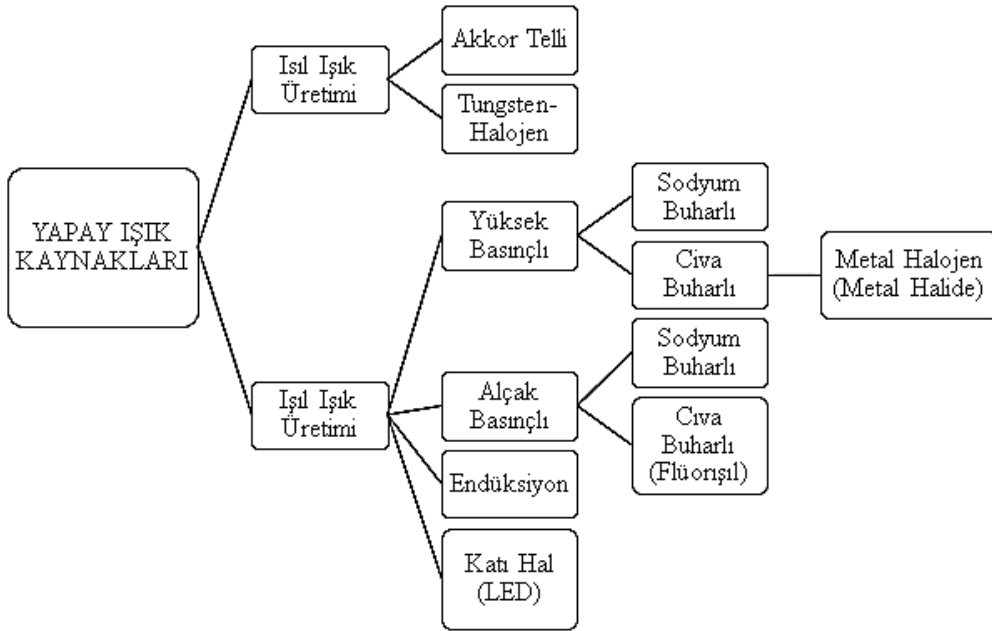
$$TKG = LS \times LG \quad (2.26)$$

eşitliğiyle hesaplanır. Burada, *TKG* toplam kurulu güç (W) ve *LG* bir lambanın gücüdür (W).

2.8. Bitkisel Aydınlatmada Kullanılan Yapay Işık Kaynakları

Fotosentez amaçlı yapılan yapay aydınlatma uygulamaları hem ilk yatırım maliyetleri hem de işletme maliyetleri açısından pahalı yatırımlardır. Bu tesislerin etkinliği, kullanılacak lambalara, ışıklıklara, montaj özelliklerine ve bitkinin ışınım enerjisinden yararlanma durumuna bağlıdır. Bitkiler, üzerlerine düşen ışınım enerjisinden etkin şekilde yararlanabilmeleri için, gerekli günlük toplam ışınım enerjisinin, kısa süreli yüksek ışınımsal aydınlık şiddeti yerine, uzun süreli düşük ışınımsal aydınlık şiddeti uygulaması şeklinde verilmesinin daha uygun olduğu anlaşılmıştır (Yağcıoğlu 2005). Yüksel (1995), yapay aydınlatmanın küçük alanlarda kullanılmasının daha ekonomik olacağından fide yetiştirme seraları için daha uygun olabileceğini, böylece az lambadan daha çok bitkinin yararlanabileceğini bildirmektedir. Bunlarla birlikte, bitkisel aydınlatma amaçlı kullanılan yapay ışık kaynaklarının (Şekil 2.15) seçiminde aşağıda belirtilen etmenler de dikkate alınmalıdır (Yurtseven 2012);

- Işık rengi mümkün olduğunca güneş ışığına yakın olması ve ışığın dalga boyu,
- Etkinlik faktörünün büyük olması ve yaydığı toplam enerji,
- Uzun ömürlü olması,
- Fiyatının uygun olması,
- Kullanım kolaylığının olması,
- Sarsıntı ve darbelere dayanımlı olmasıdır.

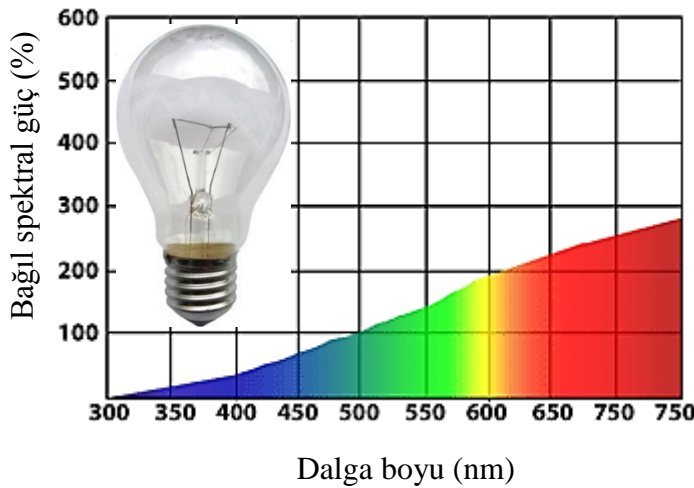


Şekil 2.15. Bitkisel aydınlatma uygulamalarında kullanılan yapay ışık kaynakları

2.8.1. Akkor telli lambalar

Işık elde etme biçimi ısı ışımaya olan akkor lambada, tungsten (volfram) telden geçen elektrik akımı teli ısıtarak akkor duruma getirir ve telin ısınmaya başlamasıyla elektrik enerjisi ışınım enerjisine dönüşür. Bu lambaların yaydıkları ışınımın çok büyük bir bölümü ısı, küçük bir bölümü görünür ışınımlardır. Bu nedenle, verimleri çok düşüktür ($10-20 \text{ lm.W}^{-1}$). Fakat yüksek renksel geriverim değerlerine sahiptirler ve yüksek renksel geriverim talep eden kısa yanma sürelerindeki uygulamalarda kullanılabilirler. Bundan dolayı yayılan ışıkta bütün frekanslar mevcuttur ve bütün renkler temsil edilmektedir. Bu lambaların ömürleri yaklaşık 750-1000 yanma saattir (Deniz 2012).

Akkor lambalarda ortaya çıkan enerjinin büyük bölümü kırmızı veya kırmızı ötesi ışınımdır. Açığa çıkan kırmızı ötesi ışınım oranı, toplam enerji çıktılarının yaklaşık %80-90'ı düzeyindedir. Vakum lambalarda ise bu oran yaklaşık %91 düzeyindedir. Akkor telli lambadan yayılan fizyolojik olarak etkili olan ışınım, spektrumun turuncu ve kırmızı aralığında yer alır ve yayılan toplam enerjinin sadece %10-20'sini oluşturur (Bickford ve Dunn 1973). Akkor telli lambanın ışınım spektrumu Şekil 2.16'da gösterilmiştir.



Şekil 2.16. Akkor telli lamba ve tayfdaki güç dağılımı

Bitkilerdeki çiçeklenmenin fotoperiyodik kontrolünde kırmızı ışınımın etkin bir rolü bulunmaktadır. Öte yandan uzak-kırmızı ışınım enerjisi gövde uzunluğunu artırıcı etki yapmaktadır. Akkor telli lamba ışığında kırmızı ve uzak-kırmızı dalga boyları yüksek seviyelerdedir. Bu nedenden dolayı özellikle uzun gün bitkilerinde çiçeklenmeyi teşvik etmek amacıyla uzak-kırmızı ışık kaynağı olarak kullanılır. Akkor telli lambalar tek olarak kullanıldığı gibi flüorışıl lambaları desteklemek amacıyla kullanılmaktadır (Öztürk 2008).

Akkor halojen lamba, akkor lambanın atmosferindeki gaz karışımının değiştirilmesi (halojen eklenmesi) ile oluşturulmuş bir ısı ışık kaynağıdır. Bu tür lambaların atmosferinde kullanılan halojen moleküllerinin tungsten teli yenilemeleri nedeniyle, tel sıcaklığı 2900°C sıcaklığa kadar çıkabilmektedir. Böylece halojen ampul içerisindeki flamandan daha yüksek ve daha beyaz bir ışık elde etmek mümkün

olabilmektedir. Bunun sonucunda da, aynı güçteki akkor lambaya göre, hem ışık verimi hem de renk sıcaklığı biraz yükseltilebilmektedir. Lamba ömürleri akkor telli lambalara göre iki kat daha fazladır (YEGM 2012).

2.8.2. Gaz boşalmalı lambalar

Işığın dolaylı ya da dolaysız bir biçimde bir gazın, bir metal buharının ya da gaz-buhar karışımının içinde oluşan elektriksel boşalma ile üretildiği lambalardır. Bunlar, içi gaz veya metal buharıyla doldurulmuş tüp yapısı, tüpü diğer yardımcı donanımları dış etmenlerden koruyan ampul yapısı ve bazı modellerde ampulünün iç yüzeyine sürülen fosfor tozlarından oluşmaktadır. Gaz boşalmalı lambalar, tüp içerisinde yayılmış atomların ve elektronlarının temel yörüngelerinden uzak bir yörüngeye geçip tekrar temel yörüngelerine dönmeleri sırasında enerji seviyesi farkı sonucunda ışınım yayarak çalışırlar (Ünal 2009).

Gazların veya metal buharların iletkenliği, serbest elektron oluşturan gücün büyüklüğüne, gaz veya metal buharın cinsine, basıncına ve içinde bulunduğu kabın geometrik boyutlarına bağlıdır (Özkaya 1972). Gaz boşalmalı lambalar; cıva buharlı, sodyum buharlı ve metal halojen lambalar olmak üzere üç grupta toplanırlar.

2.8.2.1. Cıva buharlı lambalar

Cıva buharlı lambaların bir balast yardımıyla çalışanları olduğu gibi kendinden balastlı tipleri de bulunmaktadır. Kendinden balastlı tiplerinde hem cıva buharlı deşarj hem de akkor telli ışık renklerinin karışımı ile ışık renkleri ve renksel geri verimlilikleri daha iyi seviyelere ulaşabilmektedir (Şekil 2.17).

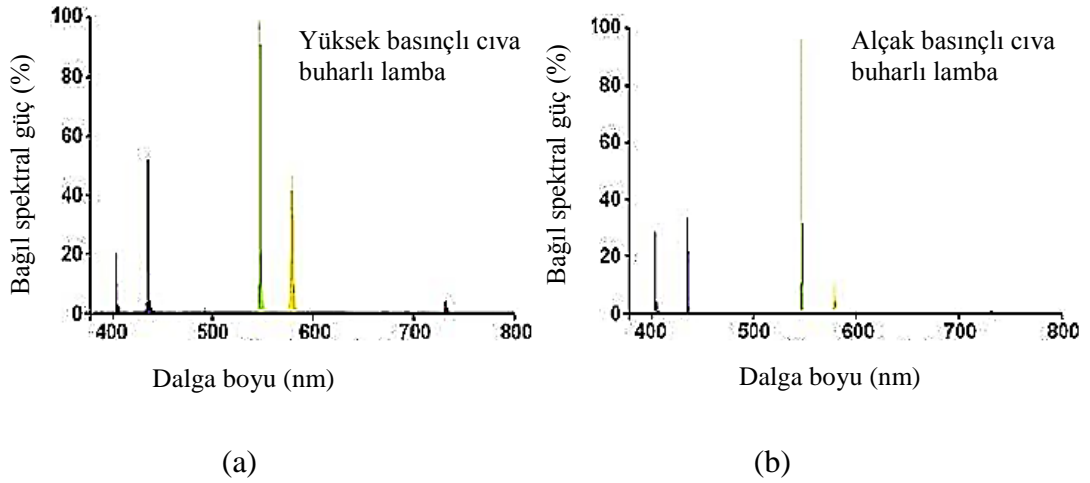


Şekil 2.17. Cıva buharlı lamba

Cıva buharlı lambaların yaydıkları ışık, maviye yakın olup çok az miktarda kırmızı ışık yayarlar. Bu lambalarda ışık, elektrik akımının cıva buharının içinden geçmesiyle oluşur. Lambadaki cıva buharı miktarını genel olarak 2 - 4 atm değerinde olan son çalışma basıncı belirler. Cıva buharlı lambalar, alçak ve yüksek basınçlı olmak üzere iki tipte üretilmektedirler (Schiler 1997).

Alçak basınçlı cıva buharlı (flüorüslü) lambalar: Güçleri 35-180 W aralığında ve etkinlik faktörleri 60-140 lm.W⁻¹ kadar olan bu lambaların verimleri %27 civarındadır. Kullanım süreleri ise 16000 yanma saatidir. Bu lambaların yaydıkları ışık yaklaşık olarak 590 nm civarında olup, çok dar bir band aralığındadır. Bu dar band aralığının, bitki gelişiminde olumsuz etkilere neden olabileceğinden, bitkisel üretimde kullanılmalarının bazı sakıncaları bulunmaktadır.

Yüksek basınçlı cıva buharlı lambalar: Lamba verimi %13 seviyesindedir. Ömürleri yaklaşık 15000 yanma saati ve güçleri 1000 W civarına kadar çıkabilmektedir. Etkinlik faktörleri $35-65 \text{ lm.W}^{-1}$ olan bu lambalar, daha çok yol ve park aydınlatmasında kullanılmaktadır. Bu lambalar spektral enerji dağılımlarında 404.7, 438.5, 546.1, 557 ve 590 nm dalga boylu cıva enerji bandları oluşturmaktadırlar (Başçetinçelik ve Tezer 1983). Alçak ve yüksek basınçlı cıva buharlı lambanın tayftaki güç dağılımları Şekil 2.18.a ve b'de görülmektedir.



Şekil 2.18. a) Yüksek basınçlı ve b) alçak basınçlı cıva buharlı lambaların tayfdaki güç dağılımları

Bitkisel aydınlatmada, cıva-tungsten lambalar yerine daha çok flüorışıl tip cıva buharlı lambalar tercih edilmekte ve normal bitki gelişimi rahatlıkla sağlanabilmektedir (Öztürk 2008). Cıva buharlı lambaların bitkisel üretim amaçlı uygulamalarda tercih edilme nedenleri aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Lamba ve donanımları küçük olduğundan daha az gölge oluştururlar,
- Işık verimi yüksek olduğundan serada olabildiğince yükseğe yerleştirilebilirler,
- Diğer geleneksel ışık kaynaklarına göre ömürleri daha uzundur,
- Yüksek güçlü flüorışıl lambalara göre yerleştirme maliyeti daha düşüktür,
- Lamba sert cam malzemeden yapıldığından, su damlacıklarının ısıl şokundan etkilenmezler.

2.8.2.2. Flüorışıl lambalar

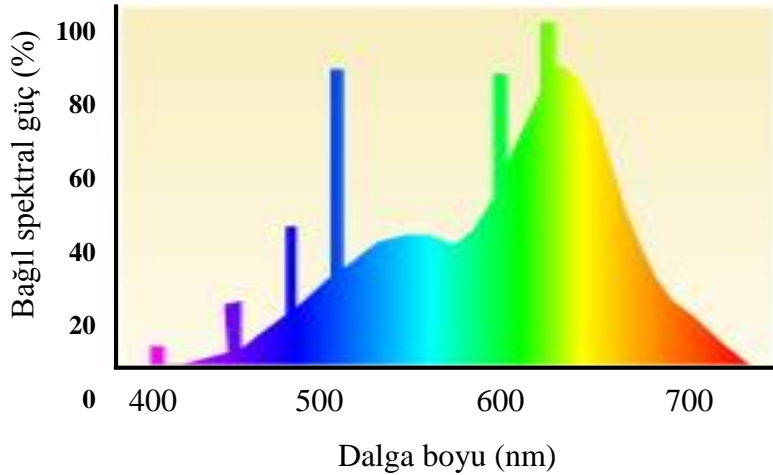
Flüorışıl lambalar, elektrotların yaydığı elektronların cam tüp içinde cıva atomlarıyla çarpışmasının sonrasında yayınladığı ultraviyole ışınımının lambanın iç yüzeyindeki fosfor kristalleri (flüorışıl tozlar) tarafından görünür ışığa çevrilmesi ile ışık verirler. Flüorışıl lambalar, starter ve balast gibi yardımcı elemanlara ihtiyaç duyan geleneksel yapıda olabildikleri gibi, çalışması için yardımcı elemanlara ihtiyaç duymayan elektronik ateşlemeye sahip kompakt (*CFL: Compact Fluorescent Lamp*) yapıda da bulunmaktadır. Kompakt flüorışıl lambalar, yoğunluk sağlamak amacı ile kıvrılmış, sarılmış küçük çaplı flüorışıl lambalardır. Bu lambalar, akkor telli lambaların tükettiği elektrik enerjisinin dörtte birini tüketirler ve %90 daha az ısı üretirler (Şekil 2.19).



Şekil 2.19. Flüorışıl lamba tipleri

Flüorışıl lambalar genel olarak yüksek aydınlık düzeyine sahip, $50-100 \text{ lm.W}^{-1}$ verimli, doğrusal ve yaygın ışığa sahip lambalardır. Ömürleri ise, 4000 - 15000 yanma saatidir. Bunların yanında, doğru bağlanmadıklarında, ışığın titremesi ve stroboskopik etki gibi olumsuzluklarla karşılaşılabilir. Ayrıca, sera aydınlatma uygulamalarında tesisat giderleri yüksektir ve yansıtıcı ile birlikte kullanılması bitkilerin gölgede kalmasına neden olabilmektedir. Standart serin beyaz lambalara göre daha geniş spektrumda ışık yayabilme özelliğine sahiptir.

Bitkisel üretim amaçlı kullanılan flüorışıl lambalar serada tekdüze bir şekilde enerji dağılımı sağlarlar. Dağılım paterni akkor telli lambalar gibi eş merkezli halkalar şeklinde değil, merkezdekinin akım şiddeti en fazla ve en dıştağının ise en az olacak şekilde oluşan eliptik şekildedir. Bunlara ilave olarak, flüorışıl bitki büyütme lambaları kullanıldığında akkor telli lambalarla üretimde birçok bitkide karşılaşılan boğumlar arası uzunluğun artması gibi olumsuzlukların önüne geçilebilir. Flüorışıl lambaların spektral dağılımı lamba tipine bağlı olarak değişmekle birlikte, genel dağılım Şekil 2.20'deki gibidir.

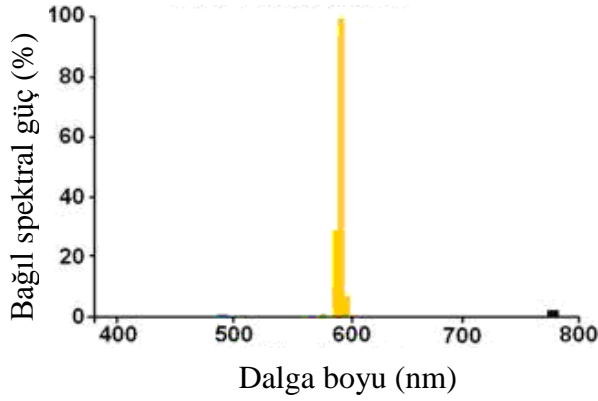


Şekil 2.20. Flüorışıl lambaların tayfdaki güç dağılımı

2.8.2.3. Sodyum buharlı lambalar

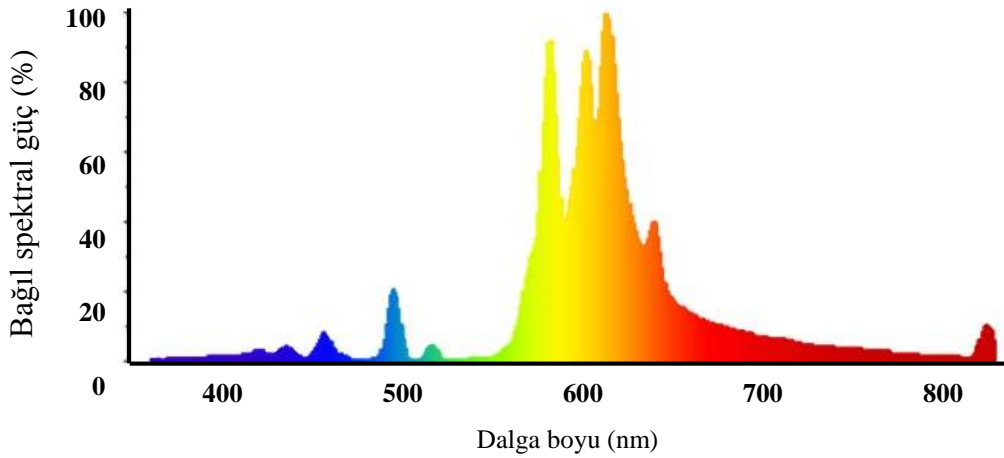
Bu lambalar kızgın elektrotlu deşarj lambaları olup, ışık elektrik akımının sodyum buharı içerisine geçmesi sırasında meydana gelmektedir. Işık etkinlikleri en yüksek ve ışık rengi sarıdır. Ömürleri 3000 - 5000 yanma saatidir. Buna karşılık ilk tesis giderleri fazladır. Bu lambalar, alçak ve yüksek basınçlı olmak üzere iki tipte üretilmektedirler:

Alçak basınçlı sodyum buharlı lambalar: Işık etkinlikleri $100 - 200 \text{ lm.W}^{-1}$ civarında olup, tam aydınlatmanın sağlanması için 7-15 dakika süreye ihtiyaç olmaktadır. Lambanın tayfdaki güç dağılımı Şekil 2.21’de görülmektedir (Vitoone 2012).



Şekil 2.21. Düşük basınçlı sodyum buharlı lambanın tayfdaki güç dağılımı

Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar: Sodyumun buharlaşmasını ve ateşlemeyi sağlamak için cıva ve asal gaz ihtiva ederler. Çalışma sıcaklığı 700°C civarında olan bu lambalarda, ışınımın oldukça geniş bir bölüme yayılmasından dolayı renk seçimi bakımından alçak basınçlı sodyum buharlı lambalara göre daha üstündürler. Ancak buna karşılık, etkinlik faktörleri daha düşüktür ($65-140 \text{ lm.W}^{-1}$). Bu lambalarda da balast ve ateşleyici kullanılmaktadır. Şekil 2.22 yüksek basınçlı sodyum buharlı lambanın tayfdaki güç dağılımını göstermektedir.



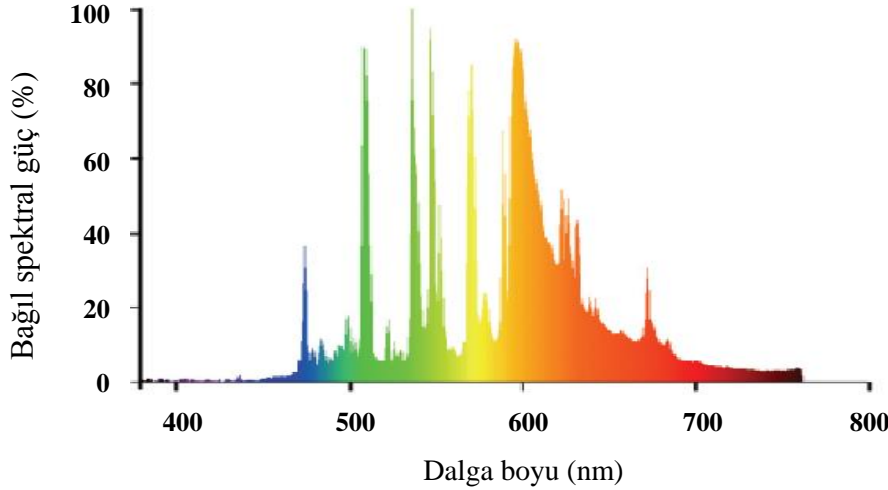
Şekil 2.22. Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambanın tayfdaki güç dağılımı

2.8.2.4. Metal halojen lambalar

Metal halojen lambalarda ışığın büyük bölümü, deşarj tüpünün içine konan cıva ve metal tuzları ile birlikte neon-argon veya kripton-argon karışımının ışınımından oluşan yüksek yoğunluklu boşalma ile sağlanır. Bu lambalarda üç tip halojen bileşimi vardır;

- Sodyum, talyum ve indiyum iyotları,
- Sodyum ve skandiyum iyotları,
- Talyum ve disprosyum iyotları.

Sodyum, talyum ve indiyum'un bulunduğu bazı halojenler sırasıyla 589, 535, 435 nm dalga boyunda tek bantlı; skandiyum, talyum ve disprosyum bazı halojenlerde de görünür ışınım bölgesinde çok bantlı spektrum oluşturur. Kalay gibi halojenler ise görünür bölgede sürekli spektrum meydana getirir (Başçetinçelik ve Tezer 1983). Metal halojen lambaların tipik ışınım spektrumu Şekil 2.23'de görülmektedir.



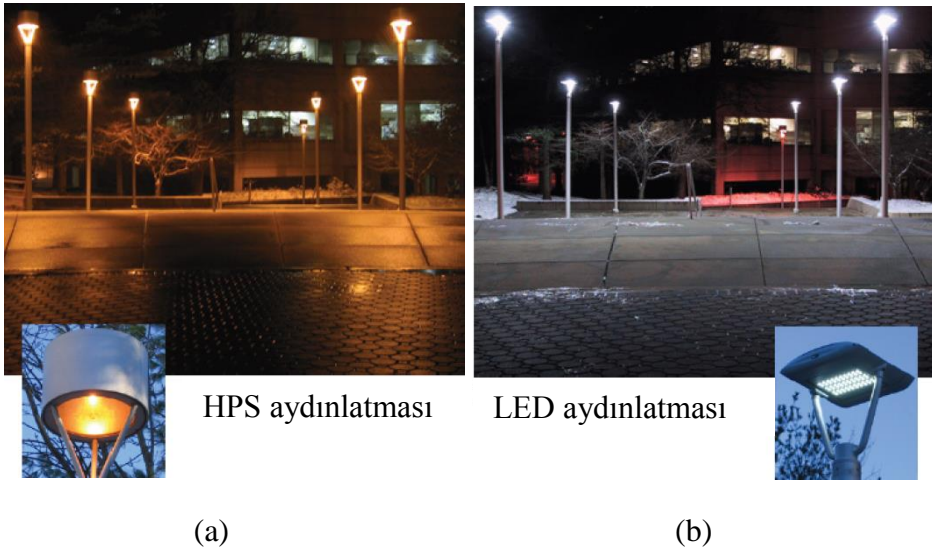
Şekil 2.23. Metal halojen lambanın tayfdaki güç dağılımı

Lamba ömrü 5000- 20000 saat kadardır. Işık tayfları düzgün fakat sürekli değildir. Renk sıcaklıkları 3000 - 6000 K değerindedir ve 6000 K renk sıcaklığı ile gün ışığına çok yakın bir ışık verebilmektedirler. Renksel geri verimlilikleri ise %80 civarındadır. Işık akısı 19000-200000 lm ve ışık verimleri 160 lm.W⁻¹ değerine kadar çıkabilmektedir. Düşük güçte ışığı mavileşir ve kaliteli bir ışık elde edilemez. Bu yüzden gerilim değişimi %5 değerini aşmamalıdır (Foton Elektroteknik 2012).

2.8.3. Katı hal lambalar

Katı hal lambalar ışık yayan yarı iletken diyotlardan (*LED: Light Emitting Diode*) oluşmaktadır. Başlangıçta yalnızca zayıf kırmızı ışık verebilen LED'ler, günümüzde elektromanyetik tayfin çeşitli dalga boylarında ve yüksek parlaklıkta ışık verebilmektedirler. LED, 1920'lerde Rusya'da Oleg Vladimirovich Losev adlı bir radyo teknisyeni tarafından bulunmuştur. 1962 yılında Amerika Birleşik Devletleri'nde pratik olarak uygulanabilen elektronik bir bileşen haline getirilmiştir ve ilk ticari üretimi 1962 yılında gerçekleştirilmiştir. İlk üretilen kırmızı LED'ler sinyal ve göstergelerde kullanılmıştır. 1972 yılında, Siemens Semiconductor Division ilk radyal kılıf LED'i üretmiş, 1980'lerin sonu ve 1990'ların başında LED teknolojisinde iki büyük aşama kaydedilmiştir. Bunlardan birincisi, kırmızı LED'e ilave olarak sarı, yeşil, mavi ve beyaz LED'lerin geliştirilmesi, ikinci olarak da, ışık verimliliklerinin artırılmasıdır.

LED'lerin kullanıldığı başlıca uygulamalar arasında; araçlarda gösterge aydınlatması, stop, fren ve sinyal lambaları, ses sistemleri, navigasyon sistemleri, cep telefonları, iç ve dış ortam aydınlatmaları, büyük trafik bilgilendirme göstergeleri ve reklam panoları sayılabilir. Bunların dışında özellikle yükselen verimleri, tek renk ışık verebilme yetenekleri ve düşük enerji tüketimlerinin verdiği avantajlarından dolayı tarımsal üretim amaçlı yapay aydınlatma uygulamalarında da kullanımları hızla yaygınlaşmaktadır. Özellikle yükselen verimleri ve düşük güç tüketimleri nedeniyle cadde, sokak, yol gibi dış ortam aydınlatma uygulamalarında geleneksel aydınlatma lambalarının yerine artık LED aydınlatma sistemlerinin tercih edildikleri görülmektedir. Şekil 2.24.a ve b, bir sokak aydınlatmasındaki standart yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba (HPS) ile LED lamba aydınlatmaları arasındaki aydınlık şiddeti ve ışık dağılımı arasındaki farkları göstermektedir (DOE 2008).

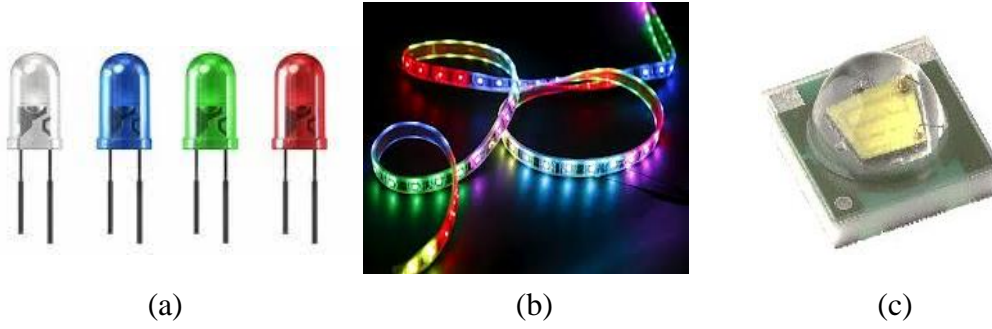


Şekil 2.24. a) HPS ve b) LED aydınlatmada sistemlerinin ışık dağılımları (DOE 2008).

HPS ve LED lamba ile yapılan bu uygulamada daha önce 97 W olan HPS lamba, 72 W LED lamba ile değiştirilmiştir. Burada HPS lambanın en düşük aydınlık şiddeti 13.45 lx ve ortalama aydınlık şiddeti 38.10 lx iken, LED lambanın en düşük 20.45 lx ve ortalama 39.07 lx olarak ölçülmüştür. Aydınlatılan alandaki ışık homojenliğine

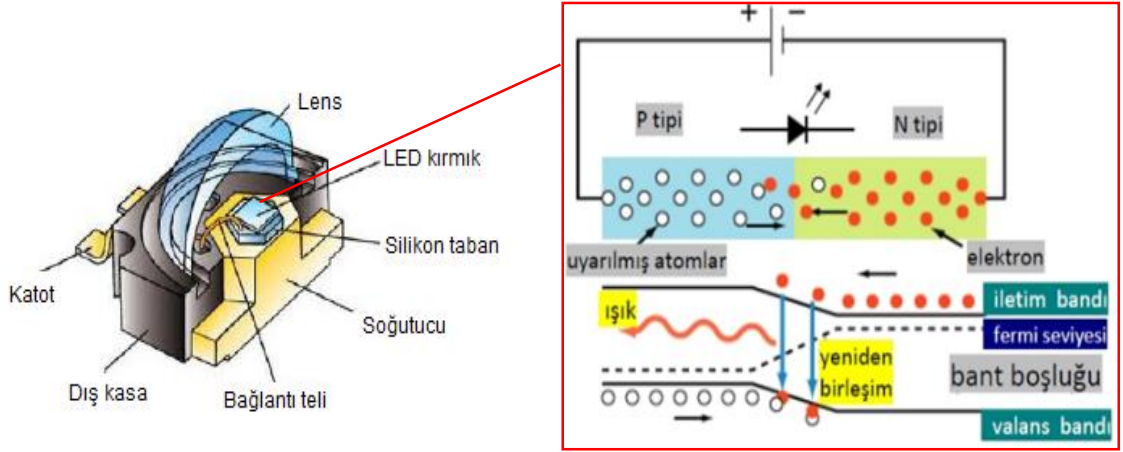
bakıldığında ise en yüksek ve en düşük aydınlık şiddeti oranı, HPS lamba için 6.04:1 iken, LED lamba için bu oran 2.68:1 olarak hesaplanmıştır. Bu da daha düşük orana sahip olan LED lambanın HPS lambaya göre daha homojen bir ışık dağılımına sahip olduğunu göstermektedir. Öte yandan LED lambanın kullanılması enerji tüketimi yönünden de daha ekonomiktir.

LED'ler şekil olarak radyal biçim başta olmak üzere çok çeşitli yapılarda ve boyutlarda kılıflandırılırlar. Normal baskı devreler için pin ayaklı üretildikleri gibi, yüzey montaj teknolojisi (*SMT: Surface Mount Technology*) ve doğrudan baskı devre üzerine montajlı (on-board) biçimlerde üretimleri de ticari olarak piyasaya sürülmektedir. Şekil 2.25.a, b ve c'de yaygın olarak kullanılan farklı kılıflardaki LED'ler görülmektedir.



Şekil 2.25. a) Pin ayaklı, b) şerit ve c) yüzey montaj LED görünüşleri

LED'ler yapısal olarak incelendiğinde, n ve p tipi yarıiletken katmanlar arasına yerleştirilmiş aktif katman tabakasından ve bunların elektriksel bağlantılarından oluşan opto-elektronik bir eleman yapısındadır. LED'ten doğru yönde bir akım geçirildiğinde elektronlar aktif katmanı uyarır ve böylece ışık üretilir. Üretilen ışık doğrudan veya reflektörden yansıma ile pencere katmanından yayılır. Aktif katmanın madde yapısına bağlı olarak görülebilir ışık tayfının belirli bir bölümünde ışık yayarlar. Başka bir ifadeyle tek renk ışık üretilir ve aktif katmanda kullanılan madde LED ışığının rengini belirler. Aktif katman üzerinde üç ana rengi veren maddeler yerleştirilerek RGB (Red, Green, Blue) LED modülleri de üretilmektedir. Işının spektrumunu belirleyen aktif katman, çeşitli yarı iletken malzemelerden tasarlanmaktadır. Şekil 2.26'da LED yarı iletken aktif katmanları ve Çizelge 2.8'de katmanlarda kullanılan malzemeler ile elde edilen dalga boyları verilmiştir. Şekil 2.27.a, b ve c'de, sırasıyla akım-gerilim karakteristiği, spektrum karakteristiği ve ışımaya diyagramı görülmektedir.

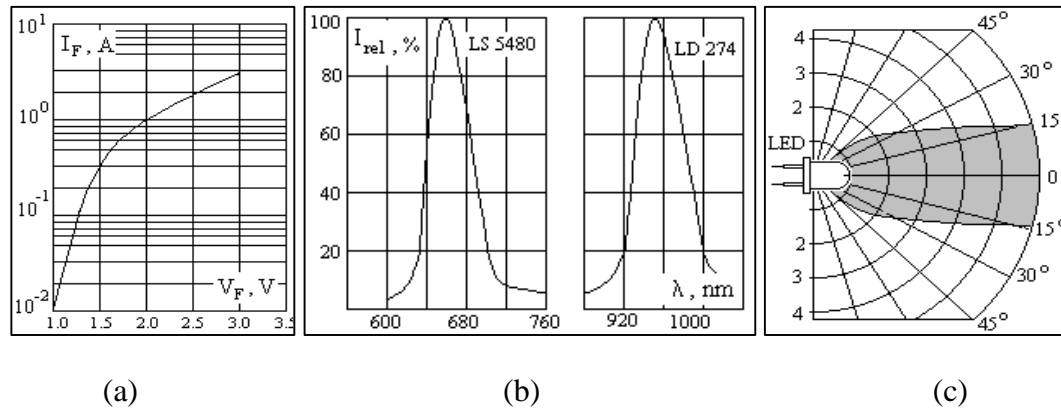


Şekil 2.26. LED yarıiletken katman yapısı

Çizelge 2.8. Aktif katman yarı iletken malzemeler ve elde edilen dalga boyları (Musayev 1999).

Yarı iletken malzeme	Dalga boyu (μm)
SiC, InGaP, GaN	0.4 – 0.68
GaP, GaAsP	0.60 – 0.70
GaAs, GaAsP	0.70 – 0.95
GaAlAs,	0.70 – 0.95
GaAsSb, AlGaAsSb	1.00 – 2.00

Şekil 2.27.a'da görülen akım-gerilim karakteristiğine göre, akım ile gerilim arasındaki bağıntı lineer değildir. LED bir fotoalıcı şeklinde çalıştırıldığı durumda fotoiletken rejiminde akım-gerilim karakteristiğinin tıkama bölgesi kullanılır (Musayev 1999).



Şekil 2.27. a) Akım-Gerilim karakteristiği, b) kırmızı ve kızılötesi LED'lerin spektrum karakteristiği ve c) ışınma diyagramı (Musayev 1999).

Sürekli gelişen LED teknolojisinin son ürünü Organik LED'lerdir (*OLED: Organic Light Emitting Diode*). Molekül ağırlığı düşük organik malzemeler (SM-OLED) veya polimer temelli materyallerden (PLED) oluşan OLED'ler çoğunlukla düz ekran için kullanılmaktadırlar ve sıvı kristal ekran (*LCD: Liquid-Crystal Display*) teknolojisine alternatif olarak sunulmaktadırlar. Düşük enerji tüketmesi, ince, hafif ve kıvrılabilir olması nedeniyle son zamanlarda cep telefonu, monitör ve televizyon ekranlarında kullanımı yaygınlaşmıştır (Şekil 2.28).



Şekil 2.28. OLED kıvrılabilir ekran (MIT Technology Review 2007)

Tipik olarak iki elektriksel kontak (elektrot) arasında kalan ve ışık yayan bir dizi ince film organik katmandan oluşmaktadır. Farklı katmanlara sahip LCD'lerden farklı olarak OLED'ler tek katmanlıdır. Başlangıçta gösterge uygulamaları için geliştirilen OLED'ler, parlak renkli görüntüleri ile düşük güçte geniş görüş açısı sağlayan ekranların geliştirilebilmelerine olanak sağlamışlardır (Geffroy vd 2006). LCD ekranlarda olduğu gibi bunlarda arkadan aydınlatma gerektirmezler. Bunun yanında, OLED'ler plastik ve kıvrılabilir malzeme üzerine yerleştirilebilir özelliklerde olduğundan, kıvrılabilir ekranların üretilmesine olanak sağlayacaktır.

LED'lerin başlıca özellikleri ve sağladığı faydalar arasında şunlar sayılabilir:

- Tek renk ışık kaynağıdır (dar bantlı): Işık istenilen dalga boyunda olduğu için renk filtresi, prizma gibi renk ayrıştırıcılara ihtiyaç yoktur.
- Çok küçük ışık kaynağı olması sayesinde küçük ebatlı armatürler geliştirilebilir,
- Tasarımcılara geniş ve kolay kullanım olanağı tanır,
- Hızlıdır, 200 ns içinde ışık vermeye başlar,
- Uzun ömürlüdür (kullanım şartlarına bağlı olarak 50000-100000 saat),
- Işık verimliliği sürekli artmaktadır. Cree inc. (2012) tarafından Nisan 2012'de 254 lm.W^{-1} verime ulaşıldığı bildirilmiştir,
- Geleneksel yapay ışık kaynaklarına göre çok daha düşük ısı üretirler,
- Özel mercekle yapısı sayesinde ışık kolayca yönlendirilebilir,
- Görülebilir renk tayfındaki hemen bütün renkler elde edilebilir,
- Işık seviyesi ayarlanabilir,
- Şok ve titreşimlere dayanıklıdır,
- Beyaz LED için 3200-6500 K arası farklı renk sıcaklıkları verebilir,
- Çevrecidir; yapısında cıva gibi ağır metaller ve halojen gazları yoktur.

2.8.3.1. LED'lerin elektriksel özellikleri

LED'lerin bir araya getirilmesiyle oluşturulan büyük LED dizilerinin yanında, çok daha küçük boyutlu onlarca LED kırmığının tek bir kılıf içerisinde birleştirilmesiyle oluşturulmuş 1 W-80 W güç aralığındaki yüksek güçlü LED (*High Power LED*) modüller de yaygın şekilde kullanılmaktadır (Şekil 2.29).






Şekil 2.29. Yüksek güçlü LED modüller (Cree inc. 2012)

Profesyonel uygulamalarda bu LED modülleri için tasarlanmış sürücülerin kullanılması, LED'lerin verimli çalışmaları açısından oldukça önem taşımaktadır. Bu amaçla, LED modüllerinin besleme ihtiyacı için akım kontrollü ve darbe genişlik modülasyon (*PWM: Pulse Width Modulation*) yöntemi ile çıkış veren güçlü sürücülerin kullanılması önerilmektedir. PWM, LED'in ışık seviyesini ayarlamak için kullanılabilir en iyi yöntem olmakla birlikte, LED'den alınacak verimi de en iyi düzeye çıkarmaktadır. Ayrıca, bu yöntem ile her renk sayısal olarak 0-255 arasındaki kademelerde ayarlanarak 16 milyon renk elde edilebilmektedir. Çizelge 2.9'da farklı güçlerde beyaz ışık veren LED çeşitlerine ait özellikler ve kullanım alanları verilmiştir (Scholand ve Dillon 2012).

LED'lerde rengine göre ışık etkinliği de farklılık göstermektedir. Kırmızı ışık veren LED 45 lm.W^{-1} ile en yüksek verimliliğe sahip olurken, sarı 35 lm.W^{-1} , yeşil 18 lm.W^{-1} , mavi 8 lm.W^{-1} civarındadır. Beyaz ışık veren LED için ise üretici firmalara göre değişmekle birlikte $160\text{-}250 \text{ lm.W}^{-1}$ aralığındadır.

Elektrik devrelerinde ise bir LED normal diyot gibi davranmaktadır ve rengine göre farklı besleme gerilimine ihtiyaç duymaktadır. Bu nedenle, normal diyotlarda 0.7 V civarında olan birleşme gerilimi, LED'lerde renklerine göre $1.6\text{-}4 \text{ V}$ aralığında değişmektedir. Genellikle kırmızı ve sarı LED'ler $1.9\text{-}2.6 \text{ V}$, yeşil, mavi ve beyaz LED'ler $2.5\text{-}4 \text{ V}$ arasında gerilimle çalışırlar. Öte yandan LED empedansları, üzerinden geçen akımın büyüklüğüne bağlı olarak doğrusal olmayan bir eğri ile değişkenlik gösterirler. Çizelge 2.10'da farklı renklerde ışık veren LED'lere ait ileri akım ve gerilim değerleri verilmiştir (Cree Inc. 2012).

Çizelge 2.9. Farklı güçlerde beyaz ışık veren LED çeşitlerine ait özellikler (Scholand ve Dillon 2012)

Özellik	Led çeşitleri			
	 Düşük güçlü	 Orta güçlü	 Yüksek güçlü	 Çoklu yonga dizisi
Sürme akımı	5-20 mA	50-150 mA	≥ 350 mA	350-6500 mA
Öngerilim	2.9-3.5 V	2.9-3.5 V	2.9-3.5 V	3-3.5 V
Güç	<0.1 W	<0.5 W	1-3 W	1-3 W
Kırmık boyutu	200-360 μm	380-600 μm	500-1500 μm	4-36 mm^2
Işık akısı	4-15 lm	12-65 lm	70-120 lm	≤ 6000 lm
Kılıf	Yuvarlak, oval, yüzey montaj (SMD)	Yüzey montaj (SMD)	Soğutuculu	Soğutuculu, çoklu yonga dizili
Tipik uygulamaları	Cep telefonları, LCD arka ışık aydınlatması, uyarı ekranı ve göstergeleri	TV arka ışık aydınlatması, otomobil ön farları, büyük ekranlar, genel aydınlatma	Otomobil ön farları, projeksiyon cihazları, genel aydınlatma	Genel aydınlatma, projeksiyon cihazları, otomobil ön farları

Çizelge 2.10. LED karakteristik değerleri (Cree Inc. 2012)

LED ışık rengi	İleri akım değeri (mA)	İleri gerilim değeri (V)
Koyu mavi, mavi, Yeşil	125	3.1
Kırmızı-turuncu, kırmızı Amber		2.0
Beyaz		2.1
Koyu mavi, mavi		3.2
Yeşil	350	3.3
Kırmızı-turuncu, kırmızı-amber		3.4
Koyu mavi, mavi, beyaz		2.2
Yeşil	500	3.5
		3.6

Uygulamalarda LED ışığının şiddetinin mümkün olduğu kadar yüksek olması istenir. LED'lerden elde edilen ışık akısı, içinden geçen akımla orantılı olduğundan akım arttırıldıkça ışık akısında artacaktır. Bu durumda LED'in iç direncinden dolayı üretilen ısı artacak ve normal hizmet ömründen önce tahrip olacaktır. Ayrıca ısının artması, ışık

verimliliğini de olumsuz yönde etkileyecektir. Örneğin, 700 mA'lık bir LED'den 750- 800 mA akım akıtarak yüksek ışık değerleri elde edilebilir, ancak LED kırmığı çok ısınacağından ömrü oldukça azalacaktır. Bundan dolayı sıcaklığın makul seviyeler arasında tutulabilmesi için yüksek güçlü LED'ler uygun soğutucularla birlikte kullanılmalıdır (Şekil 2.30).

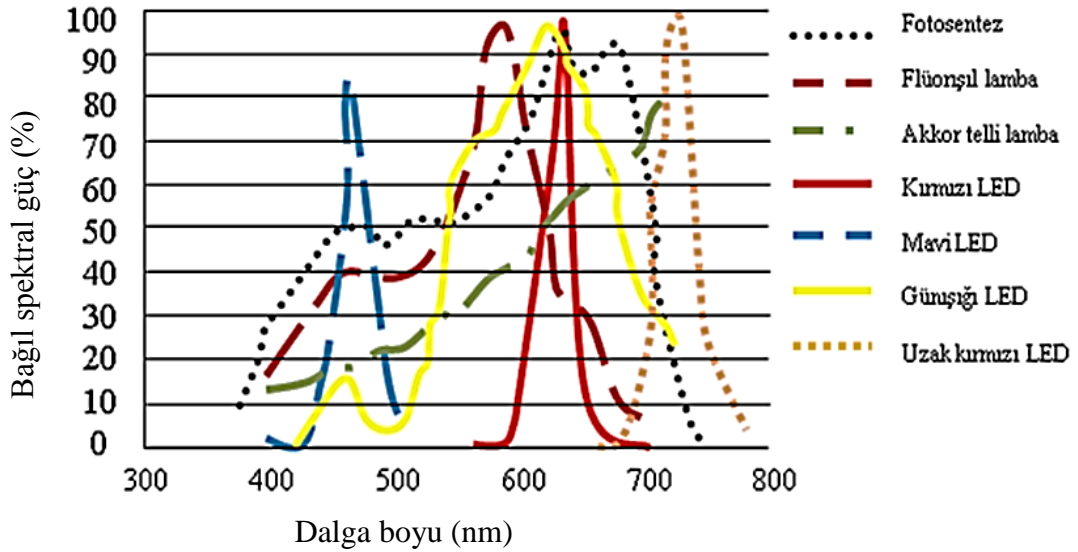


Şekil 2.30. Soğutucu üzerine yerleştirilmiş yüksek güçlü LED yapıları (Cree Inc. 2012)

2.9. Yapay Işık Kaynaklarının PAR Yönünden Karşılaştırılması

Yapay ışık kaynaklarının fotosentez ve fotoperiyodik uygulamalarda verimi artırıcı etkileri bulunmaktadır. Özellikle PAR bölgesinin yer aldığı 400-700 nm dalga boyu aralığında yapay ışık kaynaklarının etkinliği birbirinden farklıdır (Şekil 2.31). Bir ışık kaynağından yayılan ışığın bitkilere üç etkisi vardır (Öztürk 2008);

- Çiçeklenmeye olan etkisi,
- Uzama veya morfogenizme olan etkisi,
- Kuru ağırlık veya verim gibi gelişmelere olan etkileri.



Şekil 2.31. Fotosentez ve yapay ışık kaynaklarına ait karakteristik eğriler (Çağlayan ve Ertekin 2011)

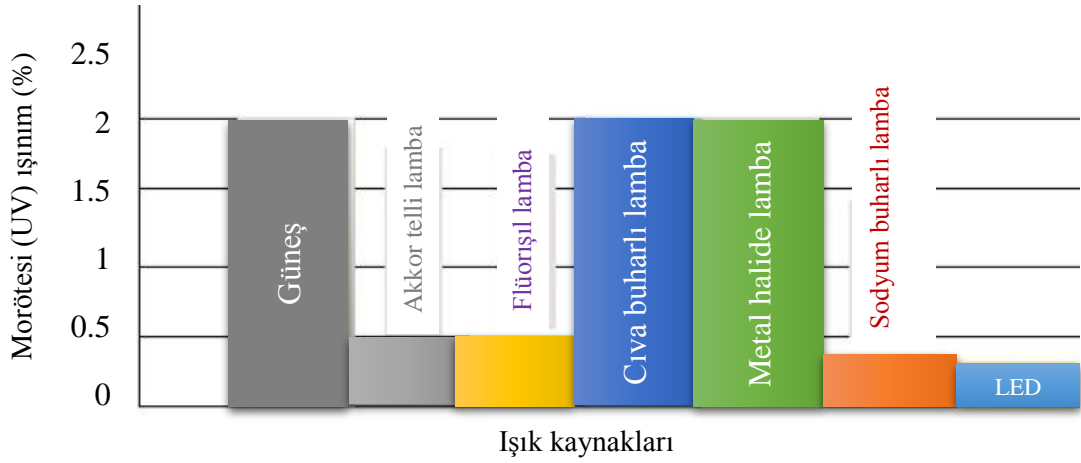
Şekil 2.31 mavi, kırmızı ve uzak kırmızı ışık veren LED lambaların, fotosentez karakteristiğinin ilgili dalga boylarındaki enerjiyi karşılamak için uygun olduğunu göstermektedir. Gerçekten de klorofil sentezi 445 ve 650 nm dalga boylarında maksimum seviyeye yükselmekte, 500-575 nm'lik dalga boyu aralığında ise azalarak %20 ve daha altındaki oranlara düşmektedir. Öte yandan diğer ışık kaynaklarının yaydıkları dalga boylarının büyük bir kısmı PAR eğrisinin dışında yer almaktadır. Bu durum, bu tür ışık kaynaklarının bitkilerin gelişiminde LED'lere göre daha az verimli olduklarını göstermektedir. Diğer bir ifadeyle, LED'ler tükettikleri elektrik enerjisinin neredeyse tamamını fotosentez tayfinin içerisindeki dalga boylarında yaymaktadırlar (Koç vd 2009).

Bitkilerin fotosentez etkinliğine katkısı bakımından yapay ışık kaynaklarının tesir dereceleri birbirinden farklıdır. PAR bölgesinin yer aldığı 400-700 nm arasındaki etkinlik, 400-850 nm arası bölgedeki etkinlikten farklı olmaktadır. Bazı yapay ışık kaynaklarının bu dalga boylarındaki güç dönüşümü Çizelge 2.11'de verilmiştir.

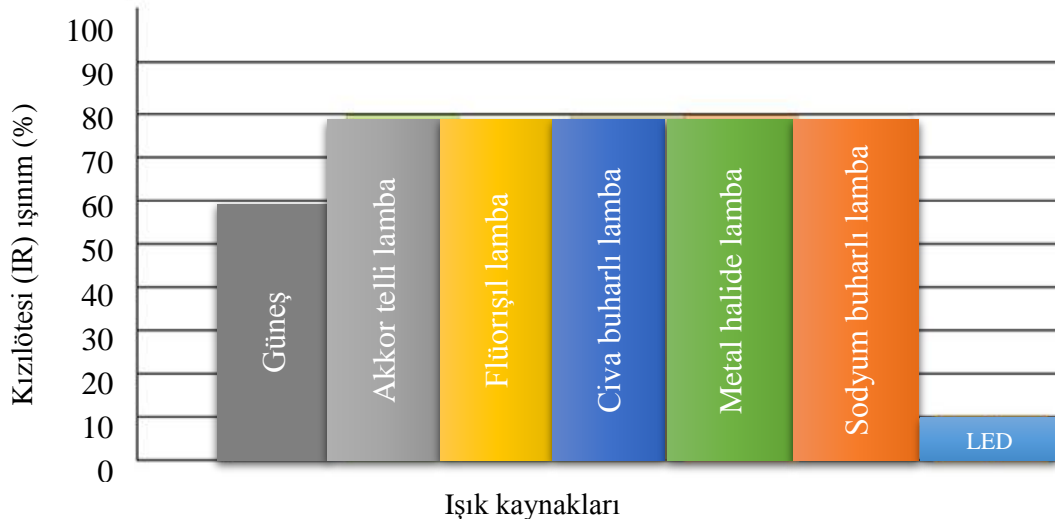
Çizelge 2.11. Bazı yapay ışık kaynaklarında güç dönüşümü (ASHRAE 1991)

Lamba tipi	Lambanın çektığı güç (W)	Işınım (400-700nm) (%)	Işınım (400-850nm) (%)	Diğer Işınım (%)	İletim ve taşınım (%)	Balast kaybı (%)
Akkor telli	100	7	15	75	10	0
Serin beyaz flüorışıl	225	19	19	34	35	12
Ilık beyaz flüorışıl	46	20	20	32	35	13
Kızılötesi flüorışıl	46	2	9	39	39	13
Cıva buharlı	440	12	13	61	17	9
Metal halojen	460	27	30	42	15	13
Yüksek basınçlı sodyum buharlı	470	26	36	36	13	15
Düşük basınçlı sodyum buharlı	230	27	31	25	22	22

LED'lerin önemli bir başka özelliği de, tayfin morötesi (UV) bölgesinden kızılötesi (IR) bölgesine kadar olan geniş bir aralıkta ışık verebiliyor olmalarıdır. Bu bölgelerdeki LED ışığının görüntüsünün belirlenmesi, özellikle görünür ve morötesi ışık altında yetiştirilen bitki türlerinin vereceği tepkilerin araştırılması açısından önemlidir (Lawrance vd 2005, Shimizu vd 2005, Kondo vd 2008). Şekil 2.32 bazı ışık kaynaklarından birim güç başına % olarak verdikleri morötesi (UV) ve Şekil 2.33 kızılötesi (IR) ışınım miktarlarını göstermektedir.











Şekil 2.32. Bazı ışık kaynaklarından birim güç başına yayılan UV ışınım miktarı



Şekil 2.33. Bazı ışık kaynaklarından birim güç başına yayılan IR ışınım miktarları

Yaygın olarak kullanılan elektriksel ışık kaynaklarının özellikleri Çizelge 2.12’de karşılaştırılmıştır (Çağlayan ve Ertekin 2010). Buna göre; kullanım ömrü bakımından LED lamba diğerlerine göre önemli seviyede avantajlı olduğu görülmektedir.

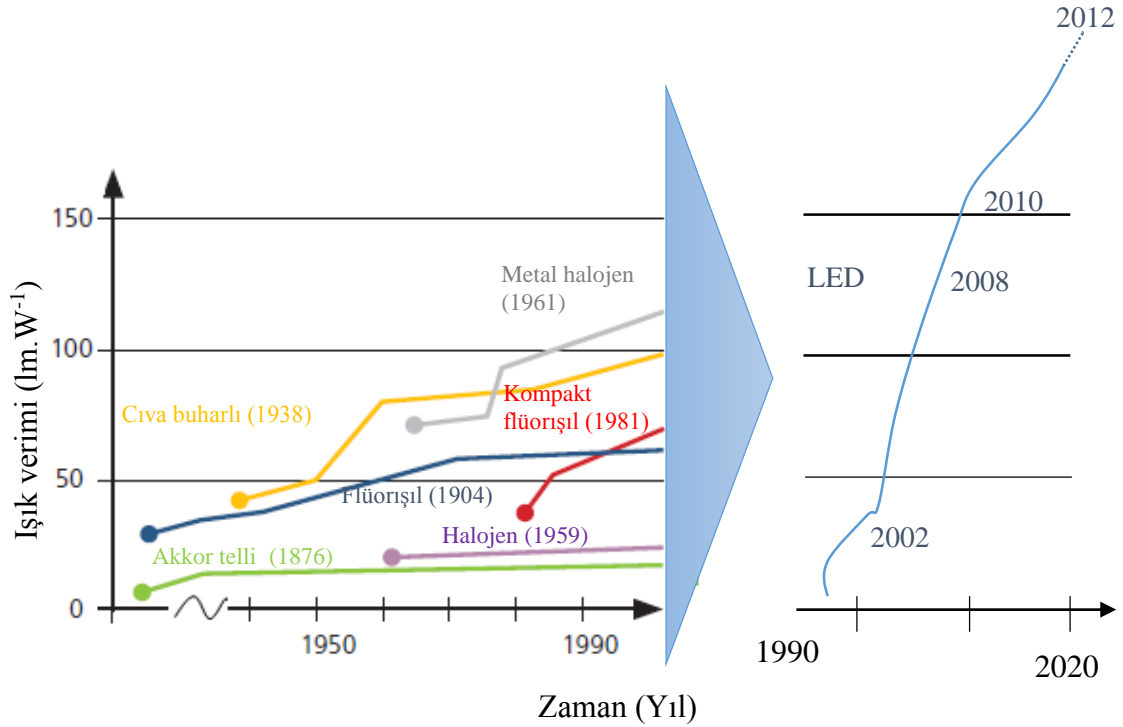
Çizelge 2.12. Bitki yetiştirme lambalarının karşılaştırılması (Çağlayan ve Ertekin 2010)

Teknik özellik	Akkor telli	Halojen	Metal halide	Yüksek basınçlı Cıva buharlı	Kompakt flüorışıl	Alçak basınçlı sodyum buharlı	Yüksek basınçlı sodyum buharlı	LED
								
Işık verimi (lm.W ⁻¹)	10 - 22	16 - 30	75 - 125	40 - 75	70 - 120	100 - 200	100 - 150	80 - 160
Giriş gücü (W)	20 - 60	55 - 100	150 - 1200	50 - 500	10 - 50	10 - 180	50 - 600	0.2 - 100
Çevreye verdiği kirlilik	Yok	Halojenler (A metalleri)	Ar, Hg	Ar, Hg	Az miktarda Hg	Na, Ne, Ar	Na, Ne, Ar, Hg	¹ Yok
Elektronik balast	Gerek yok	Genelde gerek yok	Akım kontrolü için gerekli	Gerekli	Yapısında mevcut	Gerekli	Gerekli	Sabit akımlı sürücü gerekir
CRI	100	100	70 - 95	40 - 60	80 - 90	30	25 - 85	65 - 97
Lamba ömrü (saat)	1000	2000 - 4000	5500 - 7000	6000 - 8000	4000 - 15000	12000 - 20000	10000 - 15000	50000
CCT (K)	2700	2700 - 3500	3800 - 7000	3200 - 4200	2700 - 5000	Belirlenmesi zor	2000 - 3000	2700 - 8000
Ayarlanabilirliği (%)	0 - 100	0 - 100	50 - 100	Yok	3 - 100 sürekli ayar zarar verir	Yok	50 - 100	0.1 100

¹ LED yarı iletken malzemeden üretilmiştir. Bu nedenle atık durumundaki LED uygun şekilde yok edilmelidir. Aksi halde bünyesinde bulunan arsenik ve fosfor gibi tehlikeli kimyasal maddeler çevreye yayılabilir.

2.10. Işık Verimleri ve Maliyetler

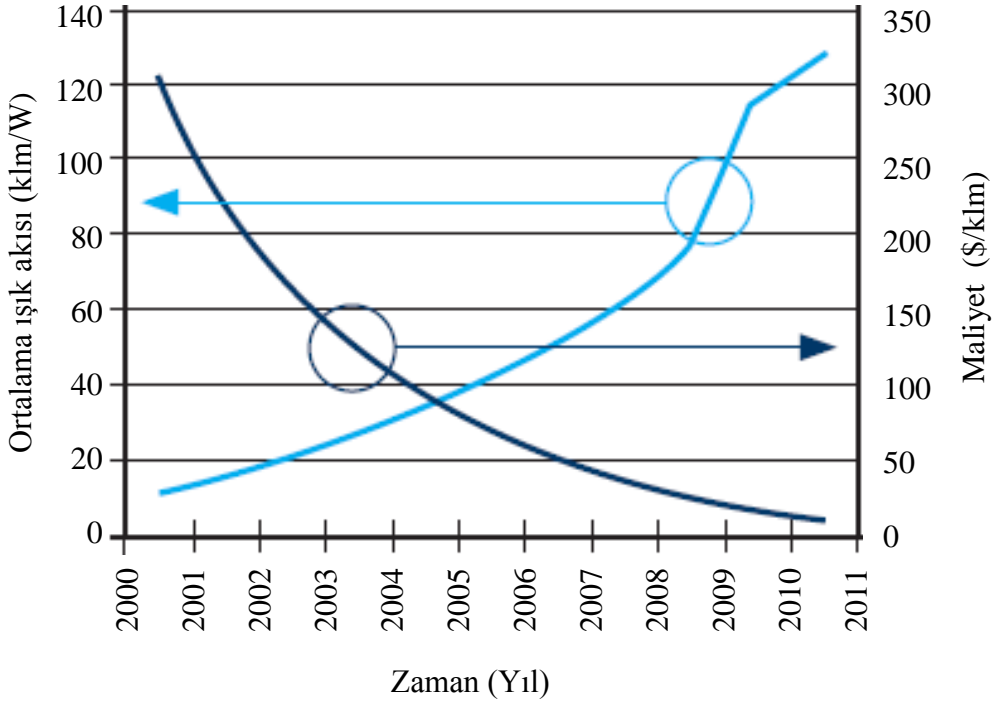
LED ışık kaynaklarının birim güç başına ortalama ışık akısı son 10 yılda yedi kattan fazla artış gösterirken, maliyetleri (klm/\$) yaklaşık 1/30'una kadar düşmüştür. Şekil 2.34'de yapay ışık kaynaklarının ışık verimlilikleri yıllara göre karşılaştırılmıştır. Şekil incelendiğinde LED'lerin, aydınlatma teknolojisi alanında en hızlı gelişen ışık kaynakları olduğu görülmektedir.



Şekil 2.34. Işık kaynaklarının verimliliklerindeki artışın yıllara göre değişimi (Navigant Consulting Inc. 2012)

Tüm bu gelişmeler sonucunda, LED üreticileri ışık verimi ile ilgili sıklıkla yeni rekorları ve kaydettikleri gelişmeleri duyurmaktadırlar. Son olarak Nisan 2012'de Cree inc., laboratuvar çalışmalarında LED ışık veriminde 254 lm.W⁻¹ değerine ulaştığını duyurmuştur. Bu verim değeri flüorışıl ve akkor telli lamba gibi geleneksel yapay ışık kaynaklarıyla karşılaştırıldığında oldukça yüksektir. LED modül ve aydınlatma sistemleri özellikle 1990'lı yılların sonuna doğru hızlı bir gelişme içerisine girmiş, soğuk ve sıcak beyaz ışık veren LED ışık kaynakları günümüzde kullanım alanlarını artırarak geleneksel pek çok ışık kaynağının yerine tercih edilir duruma gelmiştir.

LED modül ve lambalarının maliyetleri 2010 yılına gelindiğinde, on yıl öncesine göre önemli ölçüde düştüğü görülmektedir. LED piyasasına göre maliyetlerdeki düşüş bu şekilde devam edecek olursa, 2010 yılı fiyatı 13 \$/klm olan maliyetin, 2015 yılına gelindiğinde 0.95 \$/klm değerine kadar düşeceği tahmin edilmektedir. Şekil 2.35 LED ışık akısının yıllara göre değişimi ve Çizelge 2.13'de yıllara göre birim ışık akısı başına düşen LED modül maliyetleri verilmiştir.



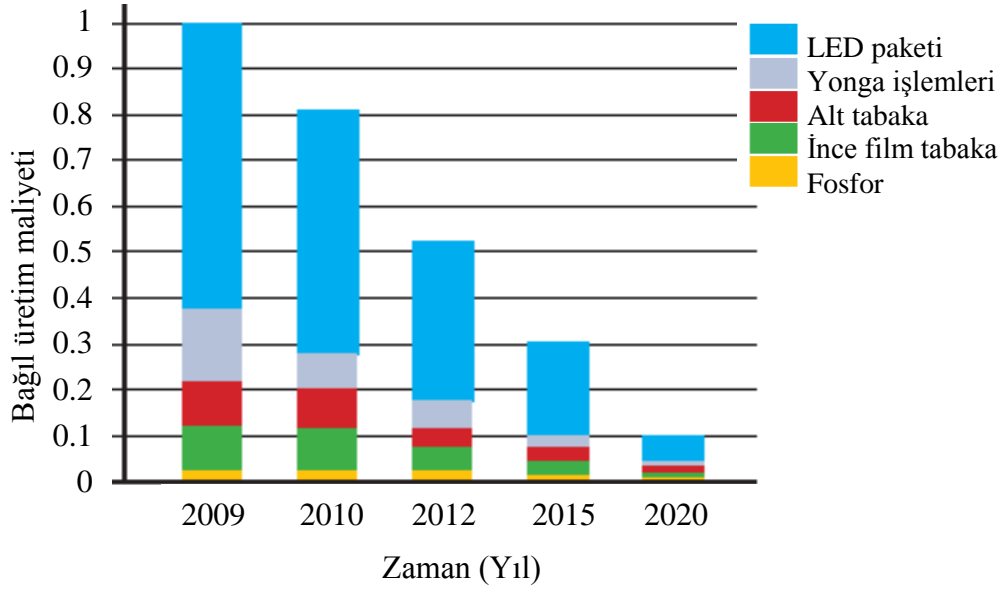
Şekil 2.35. LED ışık akısının yıllara göre değişimi (Navigant Consulting Inc. 2012)

Çizelge 2.13. Yıllara göre birim ışık akısı başına düşen LED modül maliyetleri (Navigant Consulting Inc. 2012)

	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018
\$/klm	13.00	7.70	4.57	2.71	1.60	0.95	0.56	0.33	0.20

Bu hızlı fiyat düşüşünün üç ana sebebi vardır. Bunlar; GaN veya SiC gibi yapı materyalleri yerine silikon malzeme kullanılması, 300 ve 400 mm yerine 10.16 ve 15.24 mm ölçülerinde daha küçük yonga plakalarının kullanılması, silikon tabaka üzerindeki ince GaN teknolojisinin iyileştirilmesi.

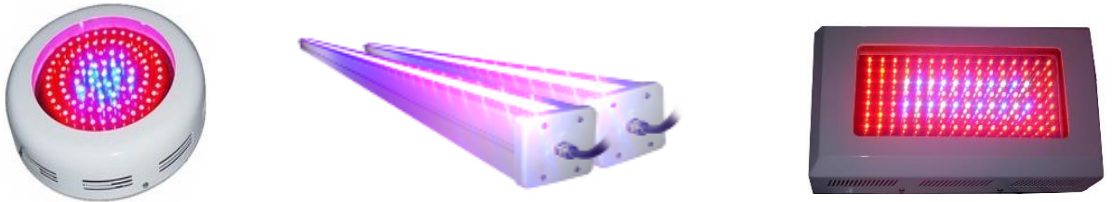
LED gövdesinin oluşturulmasında kullanılan yeni teknolojiler, LED kalıp üretim teknolojisindeki gelişmeler ve LED kalıplarının artan etkinliği sayılabilir. Bu yenilikler sayesinde, LED üretim maliyetlerinin düşürülebileceği ve önemli derecede tasarruflar sağlanabileceği tahmin edilmektedir (Şekil 2.36).



Şekil 2.36. LED üretim maliyetlerinin yıllara göre değişimi (Navigant Consulting Inc. 2012)

2.11. LED Bitki Yetiştirme Lambaları

Tarımsal uygulamalarda kullanılan LED yetiştirme lambaları, dikdörtgen ya da yuvarlak tiplerde üretilmektedirler ve güçleri sahip olduğu LED sayısına göre 7 ile 600 W arasında değişmektedir. Bu LED'ler $10 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ foton akısına sahip kırmızı ve mavi renkli olup, bir plaka üzerinde belirli oranlarda karışık olarak dizilmektedirler. Bitkilerde klorofil molekülleri mavi ve kırmızı dalga boylarını daha iyi soğurduğundan, bu ışık niteliklerinin özellikle ototrofik büyüme alışkanlıkları ile ilişkili gelişimsel özelliklerin iyileştirilmesinde etkili olmaktadır (Yeh ve Chung 2009). Bu nedenle tarımsal uygulamalarda kullanılan LED yetiştirme lambalarında farklı oranlarda kırmızı ve mavi LED'ler kullanılmaktadır. Bu oranın genellikle %90 kırmızı + %10 mavi veya %80 kırmızı + %20 mavi şeklinde olduğu görülmektedir (Koç vd 2009). Bazı firmalar ise LED lamba üretiminde sadece kırmızı ve mavi renkteki LED'leri değil, aynı zamanda gün ışığı ve yeşil renkleri de kullanmaktadırlar. Böylece fotosentez hızını artırmak için gerekli dalga boyu sağlanmış olmaktadır. Şekil 2.37.a, b ve c'de tarımsal amaçlı bitkisel üretim uygulamalarında kullanılan LED bitki yetiştirme lamba tipleri ve Şekil 2.38'de çeşitli uygulama örnekleri görülmektedir.



Şekil 2.37. a) Yuvarlak (UFO), b) çubuk (light bar) ve c) panel tip LED bitki yetiştirme lambaları (FOBSUN Electronics Ltd. 2012)



Şekil 2.38. LED ışığı altında yetiştiricilik uygulamaları (Philips Inc. 2012)

2.12. Kaynak Taramaları

Günay (1982), ışığın bitkilerde fizyolojik olaylara karşı yaptığı etkiler yanında, morfolojik olarak organların şekline, çiçek organlarının oluşmasına ve çiçeklenmesine etkileri olduğunu bildirmiştir. Araştırmacı, ışık şiddetinin artmasının bitkilerde bodurlaşma, tüylenme ve antosiyanin gibi renk pigmentlerinin oluşumunun artmasına neden olurken, ışık şiddetinin azalmasının, bitkide hücre ve bitki boyunun uzaması, cılızlaşması, sararması ve beyazlamasına da (etiyoleşme) neden olduğunu belirtmektedir.

Odabaş (2003), yaptığı çalışmada ışık ve sıcaklığın baklada kantitatif etkilerini tespit etmiş ve bunları matematiksel modellere dönüştürmüştür. Elde edilen modeller ışığında yaprak alanı ve verim tahmini model programları geliştirmiştir.

Masson vd (1990), CO₂ ile ışık şiddetinin birlikte fotosentez hızını artırması yanında, bitkinin morfolojik parametrelerini de etkilediğini ifade etmişlerdir. Araştırmacılar domates, brokoli, marul ve kereviz fidelerine uygulanan ek ışıklandırma ile sürgün ve kök kuru ağırlıklarında artış meydana geldiğini belirlemişlerdir.

Ertekin (2002), ışık enerjisinin organik madde üretiminde önemli olduğunu, zayıf ışıkta ince, soluk renkli gövdelere sahip olduğunu, düşük karbonhidrat ihtiva eden yapraklar meydana geldiğini ve gövde gelişmesinin yavaşladığını bildirmiştir.

Bruggink (1992), genç dönemde bitkilerde ışığa karşı gösterilen büyüme tepkisinin karmaşık olduğunu bildirmiştir. Bu durumu, fotosentezde ışığın neden olduğu değişikliklerin yanında, ışığın bitkilerin morfolojik parametrelerini de etkilediği şeklinde açıklamıştır.

Uzun (1996), ışığın bitki morfolojisine olan etkisi sonucu, farklı yaprak/toplam bitki kuru ağırlık oranlarının oluşabileceğini, ayrıca düşük ışık koşullarında bitkilerde daha az kuru madde birikimi olacağını belirtmiştir. Araştırmacıya göre yüksek sıcaklık ve ışık şartlarının, düşük sıcaklık ve ışık şartlarına oranla daha hızlı gövde büyümesine neden olmaktadır.

Uzun (2001), yaptığı araştırmada, domateste bitki boyu üzerine sıcaklık ve ışık şiddetinin çok önemli interaktif etkisinin olduğunu, en yüksek bitki boyunun düşük ışık ve yüksek sıcaklık şartlarında elde edildiğini, patlıcanda bitki boyunun sıcaklıkla doğrusal ve ışıkla eğrisel olarak artış gösterdiğini bildirmiştir. Ayrıca bitki gövde çapı ile sıcaklık arasında pozitif eğrisel, ışık şiddeti ile pozitif doğrusal bir ilişki bulunduğunu kaydetmiştir.

Challa ve Schapendonk (1984), oransal yaprak ağırlığının ışık şiddetindeki değişikliklerden önemli derecede etkilenmediğini belirtmişlerdir. Bununla birlikte Loach (1970) ve Whitehead (1973), gölgelemeyle birlikte oransal yaprak ağırlığının da artabileceğini kaydetmişlerdir.

Picken vd (1986) ve Heuvelink (1989), ışığın bitkideki kuru madde dağılımı üzerine çok önemli etkisinin olduğunu, öte yandan ışık yoğunluğunun artması ile oransal yaprak alanının da önemli derecede azaldığını belirtmişlerdir. Araştırmacılar ayrıca, ışık miktarının artmasıyla doğru orantılı olarak yaprak kalınlığının da arttığını tespit etmişlerdir.

Eser (1986), yaptığı araştırmanın sonucunda, solunumda bir yandan karbonhidratların okside olması ile ortaya çıkan enerji sayesinde canlılığın sürekliliği sağlanırken, diğer yandan besin maddesinin parçalanması sonucu canlıda ağırlık kaybının ortaya çıktığını belirtmiştir. Araştırmacı, bitkilerde solunumun hızlı ya da yavaş seyretmesinde ışıklanma süresinin ve ışık yoğunluğunun etkili olduğunu, eğer solunum ile ağırlık kaybının fotosentezle karşılanamazsa bitkilerin normal gelişme ve büyümelerine devam edemeyeceğini ve öleceğini söylemektedir. Bu nedenle de bitkilerin canlılıklarını sürdürebilmeleri için fotosentezle meydana getirecekleri kuru maddenin, solunumla kaybettikleri kuru maddeden fazla olması gerektiğini bildirmektedir.

Özkaraman (2004), kavun bitkisinde yaptığı araştırmasında; oransal kök ağırlığı, net asimilasyon oranı, nispi büyüme hızı, oransal yaprak alanı ve özgül yaprak alanını incelemiştir. Bu özelliklerin sıcaklık ve ışık şiddeti sınırlarında zamanla azaldığını; oransal yaprak ağırlığı ve yaprak kalınlığının zamanla arttığını tespit etmiştir. Araştırmacı net asimilasyon oranı, nispi büyüme hızı, kök, gövde ve yaprak kuru ağırlıklarının düşük sıcaklık ve yüksek ışıktaki; bitki boyu, yaprak alanı ve özgül yaprak alanının ise düşük aydınlık şiddeti ve yüksek sıcaklıkta arttığını kaydetmiştir. Yüksek aydınlık şiddeti ve sıcaklıkta da gövde çapının, boğum ve yaprak sayılarının arttığını bildirmiştir.

Bruggink ve Heuvelink (1987), domates, hıyar ve biber bitkilerini yılın farklı zamanlarında yetiştirmişler ve domates bitkisinde net asimilasyon oranının ışık şiddetinden daha fazla etkilendiğini belirlemişlerdir. Genellikle $400 \text{ J.cm}^{-2}.\text{g}^{-1}$ ve daha üstü ışık şiddeti değerlerinde net asimilasyon oranının en yüksek, nispi büyüme hızının ise $300 \text{ J.cm}^{-2}.\text{g}^{-1}$ ışık şiddetinde en yüksek değerini aldığını bildirmişlerdir.

Uzun (1996), domates bitkisinde değişik sıcaklık uygulamalarının yüksek ışık yoğunluğu altında, tohum ekiminden çiçek çıkışına kadar geçen süreyi etkilemediğini belirtmiştir. Fakat düşük ışık yoğunluğunda ve yüksek sıcaklıklarda, düşük sıcaklıklara oranla tohum ekiminden çiçeklenmeye kadar geçen zamanın arttığını kaydetmiştir.

Vural vd (2000), ışığın bitki dokularında sıklığa ve gevşekliğe etki ettiğini ve ışığın azalmasının bitkilerin zayıf gelişmesine, hücre dokularının zayıflamasına, hasat olgunluğuna daha geç ulaşılmamasına ve verimin azalmasına neden olacağını bildirmişlerdir.

Pearson (1992), De Koning (1994) ve Uzun (2000), düşük ışık şiddetinde sıcaklığın ortalama taze meyve ağırlığı üzerine etkisinin oldukça az olduğunu ve hangi sıcaklıkta olursa olsun ışık şiddetinin artmasının taze meyve ağırlığını da arttırdığını bildirmektedirler.

Şeniz (1992), biberlerin gün uzunluğuna karşı etkisiz oldukları, bununla birlikte ışık şiddetinden kısmen hoşlandıkları ve ışık yoğunluğunun düşmesinin bitkilere bol yapraklı bir görünüm kazandırdığını belirtmektedir. Araştırmacı, düşük aydınlık şiddetinin çiçek tomurcuklarının oluşumunu durduğundan meyve verimini azalttığını, buna karşılık, aydınlık şiddetinin artmasıyla meyve oluşumunun arttığını bildirmiştir.

Eltez (1995), sera sebze yetiştiriciliğinde fide üretim döneminde yapılan ilave aydınlatmanın fide kalitesine ve verime etkilerini araştırmıştır. Araştırmacı çalışma kapsamında hıyar, domates, patlıcan ve biber sebzelerinin fidelerinde 250 ve 400 W'lık yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar kullanmıştır. Bu amaçla doğal ışığın şiddetini ve süresini uzatmak için ilk 2 hafta 14 saat ve sonraki haftalarda dikime kadar 12 saat ilave aydınlatma uygulaması yapılmıştır. Araştırmanın fide yetiştirme devresinde elde edilen bulgulara göre; ilave aydınlatmanın türlerde fide başına düşen yaprak sayısını, alanını ve gövde kalınlığını arttırdığı, gövde ve kök uzunluğunu olumlu yönde etkilediği, gövde ve kök yaş ve kuru ağırlıkları ile kuru madde miktarlarını arttırdığı saptanmıştır. Çalışmada biber fideleri hariç diğer fidelerin yetiştirme sürelerinin kontrol bitkilerine göre kısaldığı tesbit edilmiştir. İlk yıl yapılan denemelerde hıyar ve patlıcan fidelerinde 12, ikinci yıl ise 13 gün domates fidelerinde 12 gün erkencilik sağlanmıştır. Araştırmanın yetiştirme aşamasında erkenci verimler bakımından 250 W ve 400 W'lık yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalarla yapılan ilave aydınlatma uygulamalarında kontrole göre sırasıyla, hıyar yetiştiriciliğinde; ilk yıl %72.6 ve %74.9'lük, ikinci yıl ise %100.5 ve %18'lik, patlıcan yetiştiriciliğinde; ilk yıl %181.3 ve %137.1'lik, ikinci yıl %313.7 ve %221.8'lik, domates yetiştiriciliğinde; %95.3 ve % 128.4'lük, biber yetiştiriciliğinde ise; %91.4 ve %72'lik bir artış sağlanmıştır. Toplam verimler bakımından ise sırasıyla, hıyar yetiştiriciliğinde; ilk yıl %23.1 ve %28.8'lik, ikinci yıl ise %39 ve %11.8'lik, patlıcan yetiştiriciliğinde; ilk yıl %51.5 ve %55.1'lik, ikinci yıl %42.9 ve %42.6'lık, domates yetiştiriciliğinde; %33.1 ve %26.2'lik, biber yetiştiriciliğinde ise; %6.9 ve %16.9'lük bir artış sağlanmıştır.

Karagüzel vd (2003), tarafından gün uzunluğunun acıbakla (*Lupinus varius L.*) populasyonunda tohum bağlama, tohum ve elde edilen tohumların çimlenme özelliklerine etkisi araştırılmıştır. Araştırmada ısıtmasız plastik sera koşullarına 14 ve 16 saat gün uzunluğu uygulanmıştır. 14 ve 16 saat gün uzunlukları doğal gün uzunluğunun geceyi bölme (GBA) aydınlatması ($400-700 \text{ nm}$ dalga boyunda $1.8-1.9 \mu\text{mol.s}^{-1} \cdot \text{m}^{-2}$) ile 14 ve

16 saate tamamlanması şeklinde uygulanmıştır. Fotoperiyodik aydınlatmalar çiçeklenmeye kadar geçen süreyi kısaltmış, doğal ve 16 saat gün uzunluğu etkisinde daha yüksek sayıda çiçek elde edilmiştir. Birincil çiçek salkımlarında doğal ve 14 saat gün uzunluğu, ikincil çiçek salkımlarında ise 16 saat ve doğal gün uzunluğu daha yüksek bakla ve tohum sayısı ile bakla oluşturma ve tohum bağlama oranlarının elde edilmesini sağlamıştır. En yüksek tohum verimleri (g/bitki) doğal ve 16 saat, en yüksek tohum ağırlıkları (g/tohum) ise 16 ve 14 saat gün uzunluğu uygulamalarında elde edilmiştir. Sonuçlar gün uzunluğunun çiçeklenme süresi ve çiçek sayısı, sıcaklıkların ise dölllenme ve tohum bağlama üzerinde daha etkin olduğuna ilişkin ipuçları vermiştir. 12 günlük çimlenme testleri sonucunda gün uzunluklarının etkisinin oluşan fidelerin yalnızca sürgün boyu ve kuru ağırlığına yansıdığı, 16 ve 14 saat gün uzunluğu etkisinde elde edilen tohumların fidelerinde bu değerlerin daha yüksek olduğu belirlenmiştir.

Karagüzel (2003), tarafından yapılan çalışmada, minimum gece sıcaklığı 12°C'ye ayarlanmış kontrollü cam ve ısıtmasız plastik serada benzer toprak koşullarına dikilen, aynı gübreleme programı ve fotoperiyodik aydınlatma (400-700 nm dalga boyunda $1.8 \mu\text{mol.s}^{-1}.\text{m}^{-2}$) ile 16 saat yapay gün uzunluğu uygulanan *Gypsophila paniculata* 'Perfecta' bitkilerinin büyüme ve çiçeklenme özelliklerinin saptanması amaçlanmıştır. Fotoperiyodik aydınlatma için seralarda kurulu, 150 W gücünde metal yansıtıcı yerden yükseklikleri 175 ± 5 cm ve aralarındaki mesafe 310 cm olan akkor telli lambalarla oluşturulmuş ve her gün için ayrı değerler verilerek 7 günlük aydınlatma programları yapamaya elverişli aydınlatma sistemlerinden yararlanılmıştır. Kontrollü cam sera koşulları, dikim zamanları arasında önemli fark olmaksızın dikimden çiçek tomurcuklarının görülmesi ve dikimden çiçeklenmeye kadar geçen süreleri plastik sera koşullarında büyütülen bitkilere göre önemli ölçüde kısaltmıştır. Buna karşın, bitki boyu, çiçeklenen sürgün sayısı, çiçekli sürgün boyu ve çiçeklenme kalitesi açısından en iyi sonuçlar plastik serada yetiştirilen bitkilerden elde edilmiştir. İncelenen büyüme ve çiçeklenme özellikleri açısından dikim zamanları arasındaki farklar kontrollü sera koşullarında azalmış, plastik sera koşullarında ise dikim zamanlarının bu özellikler üzerindeki etkisi önemli farklılıklarla sonuçlanmıştır.

Karagüzel (1999), ısıtmasız plastik sera koşullarında dikim sıklığının *Gypsophila paniculata* L. 'Perfecta'da bazı verim ve kalite özellikleri ile fotoperiyodik aydınlatma için tüketilen enerjinin verimli kullanımına etkisini araştırmıştır. Fotoperiyodik aydınlatma için 15.6 W.m^{-2} tesis kurulu gücü hesaplanmış, 150 W gücündeki akkor telli lambalar kullanılmıştır. Lambaların toprak yüzeyindeki aydınlık şiddeti 95-100 lx olarak ayarlanmıştır. Aydınlatma, doğal gün uzunluğunun 10 dakika aydınlık ve 20 dakika karanlık sürelerden oluşan geceyi kesintili bölme aydınlatması (GKBA) ile 16 saate tamamlanması şeklinde uygulanmıştır. Üretim sezonu boyunca $6.80 \text{ bitki.m}^{-2}$ sıklığında dikilen bitkilerde çiçekli sürgün başına 21.3 Wh ve çiçekli sürgün yaş ağırlığının her kilogramı için ise 220.7 Wh enerji harcanırken, bu değerler $1.70 \text{ bitki.m}^{-2}$ sıklığında dikilen bitkilerde 63.8 Wh ve 528.9 Wh'a yükselmiştir. Sonuç olarak, çiçekli sürgün başına ve çiçekli sürgün yaş ağırlığının kilogramı için kullanılan enerji miktarlarının önemli ölçüde azaldığı saptanmıştır.

Brazaityé vd (2009), sera koşullarında farklı LED birleşimlerinin domatesin büyümesi, gelişmesi ve verimi üzerine etkilerini araştırmışlardır. Domates fideleri bitki büyüme odalarında yetiştirilmiştir. Deneylerde, 447 (L1), 638 (L2), 660 (L3), 669 (L4) ve 731 (L5) nm dalga boylarında ışık veren beş yüksek güçlü LED aydınlatma sistemi

kullanılmıştır. Bunun yanında farklı dalga boylarında ek LED'ler de yer almıştır. Bunlar sırasıyla L1 için ek LED kullanılmazken, L2 için 380 nm, L3 için 520 nm, L4 için 595 nm, L5 için 622 nm dalga boyuna sahip ek LED kullanılmıştır. Araştırmacılar, hiçbir ışık birleşiminin erken domates verimi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığını; ancak LED birleşimlerine ek olarak kullanılan sarı ışığın domates verimini düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Yeh ve Chung (2009), doku kültürü ve büyüme odası endüstrisinin uzun süredir üretim için yapay ışık kaynaklarını kullanmakta olduğunu bildirmişlerdir. Bu ışık kaynakları, tüp biçimli flüorışıl lamba (TFL), yüksek basınçlı sodyum lambası (HPS), metal halojen lamba (MH) ve akkor telli lambalardır. Doku kültürü ve büyüme odası endüstrisinde en popüler ışık kaynağı ise TFL'dir. Ancak TFL, bir doku kültürü laboratuvarında toplam elektrik gücünün %65'ini tüketmektedir. Sonuç olarak, bu sanayiler sürekli olarak daha verimli ışık kaynakları aramaktadırlar. Bu bakımdan LED aydınlatma sistemleri bu alanda kullanılabilir ışık kaynakları olarak gösterilmektedir.

Yeh ve Chung (2009), kullanım ömürleri sırasıyla 1000 ve 8000 saat olan akkor telli ve flüorışıl lambalara göre LED'lerin 100000 saat gibi çok uzun olduğunu belirtmişlerdir. Buna ek olarak LED'ler, konvansiyonel ışık kaynaklarına göre, boyutları küçük, belirli dalga boylarına sahip, ısı üretimleri az ve ayarlanabilir ışık yoğunluğu ve kalitesine sahiptirler. LED'ler bu özellikleri nedeniyle doku kültürü ve büyüme odaları gibi kontrollü bitki büyüme ortamları için mükemmel ışık kaynakları olarak görülmektedir.

Kommareddy ve Anderson (2004), LED lambalarının da bulunduğu çeşitli ışık kaynaklarının etkinliğini karşılaştırmak için algler üzerinde yaptıkları çalışmada akkor telli lamba, Gro-lux flüorışıl lamba ve dalga boyu 643 nm ve 663 nm'lik LED lambalarından oluşan paneller kullanmışlardır. Denemelerinde ışık yoğunluklarının ölçülmesi için ışık kaynaklarının 2.4 m uzağına bir algilayıcı yerleştirmişlerdir. Araştırmacılar alglerin fotosentez yapabilecekleri en uygun dalga boyu aralıkları olan 400-500 nm ile 600-700 nm dalga boylarını karşılaştırmışlardır. Buna göre alg yetiştiriciliği için en uygun ışığın, 643 nm dalga boyundaki LED'lerden oluşan ışık kaynağı tarafından sağlandığını belirlemişlerdir. Ayrıca, LED'lerin sadece gönderilen enerji bakımından değil, 10000 saat çalışma sonucunda algler için en uygun dalga boyu olan 600-700 nm'lik aralıkta tüketilecek enerji bakımından da en ucuz kaynak olduğu belirlenmiştir.

Bula vd (1991), 21 günlük dönemde, $325 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ fotosentetik foton akısına sahip LED aydınlatma sistemi altında marul bitkisinin (*Lactuca sativa L. 'Grand Rapids'*), büyümesinin literatürde bildirilen soğuk beyaz flüorışıl ve akkor telli lamba koşullarında yetiştirilen bitki büyümesi ile aynı olduğunu bildirmişlerdir. Yaprak şekli, rengi ve dokusu gibi bitki özelliklerinin, soğuk beyaz flüorışıl lamba koşullarında büyüyen bitkilerinkinden farklı olmadığı görülmüştür. Bitkisel aydınlatma için LED sistemlerinin elektrik enerjisi dönüşüm verimliliği tahminleri, flüorışıl lamba için yayımlanan değerlerin iki katı olduğu görülmüştür.

Aynı araştışıcılar, klorofil moleküllerinin mavi ve kırmızı dalga boylarını daha iyi soğurduğunu, bu ışık niteliklerinin özellikle ototrofik büyüme alışkanlıkları ile ilişkili gelişimsel özelliklerin iyileştirilmesinde etkili olduğunu ifade etmişlerdir. Ayrıca, LED'ler ile yalnızca bu istenilen dalga boylarının verilebileceği ve böylece beyaz ışığın içinde bulunan diğerk dalga boylarının kullanımlarının ortadan kaldırılarak bitki büyüme lambalarının gereksinim duyduğu güç miktarının azaltılmasının da sağlanabileceği bildirilmektedir.

Tennessee vd (1994), büyüme odasında farklı iki koşulda (LED ve ksenon ark lambası) kudzu (*Pueraria lobata*) yapraklarının fotosentezi, stoma iletkenliği ve izopren emisyonunu karşılaştırmışlardır. Kırmızı LED ışığının stomayı yeterince açıp açmadığını belirlemek için stoma iletkenliği ölçülmüştür. LED'ler 0–1500 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ PAR aralığında, eşit kırmızı ışık alanı (maksimum emisyon: 656±5 nm) üretmişlerdir. Çevresel CO₂ koşullarında kırmızı ışığa fotosentetik tepki beyaz ışıkta ölçülen tepkiden çok az sapsmış ve stoma iletkenliği de aynı eğilimi takip etmiştir. Fotosentezin CO₂'e tepkisi aynı PAR koşullarında (1000 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$), LED veya ksenon ark lambalarının kullanıldığı durumlara göre benzer olduğu saptanmıştır. Yüksek CO₂ seviyelerinde, beyaz ve kırmızı ışık arasında istatistiksel olarak fark olmadığını tespit etmişlerdir. Bazı yapraklar her iki lamba türünde fotosentezin geri besleme inhibasyonunu sergilemişlerdir. Elektron taşınımı, karbon metabolizması ve iz gaz emisyon çalışmalarını içeren fotosentez araştışmalarında, güvenilirliği, tekrarlanabilirliği ve taşınabilirliği artırılmış LED'e dayalı fotosentez lambalarının kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Yanagi ve Okamoto (1994), 5 adet ıspanak bitkisini 125 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ PAR koşulunda, kırmızı LED ve 5 adet 40 W gücünde flüorışıl lamba altında yetiştirmişlerdir. LED lambanın kullanıldığı deney koşulunda kuru madde oluşumu flüorışıl lambaya göre daha düşük bulunmuştur. Aynı şekilde, kırmızı LED koşullarında yaprak alanı flüorışıl lambaya göre daha küçüktür. Yine de, LED'lerin bitki gelişimi için yapay bir ışık kaynağı olarak kullanılabilceği sonucuna varmışlardır.

Avercheva vd (2009), yüksek basınçlı sodyum (HPS) lambaları veya kırmızı-mavi foton oranının 7 olduğu (470 nm) ve kırmızı (650 nm) LED'lerden oluşan ışık kaynağı altında 15 ve 27 günlük Çin lahanasının, (*Brassica chinensis L.*) büyüme, şeker, protein içeriği, fotosentetik pigmentleri ve bunun yanında klorofil flüorışıl parametrelerini karşılaştırmışlardır. Bitkilerin bir grubu 391±24 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ PAR değerlerinde yetiştirilirken (Normal seviye), diğerk gruba 107±9 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (Düşük seviye) PAR koşulları uygulanmıştır. Üçüncü grup bitkiler ise ilk 12 güne kadar düşük, daha sonra normal ışık seviyesinde yetiştirilmişlerdir. LED altında ve normal ışık koşullarında yetiştirilen bitkiler filiz ağırlıkları açısından yüksek basınçlı sodyum lambalarından farklı olmadığı, fakat daha düşük kuru ve yaş kök ağırlığı yanında yapraklarda da daha düşük toplam şeker içeriği saptanmıştır. Bitkilerin düşük ışık koşullarına tepkisinin her iki ışık kaynağında aynı olduğu saptanmıştır. Araştışıcılar LED tabanlı ışık kaynaklarının bitki yetiştirmek için kullanılabilir olduğunu göstermişlerdir. Aynı zamanda, belirtilen aydınlatma koşullarında bazı bitki fotosentez ve büyüme özellikleri tespit edilmiştir.

Berkovich vd (2005), yapay aydınlatma koşullarının, bitkilerin ışığa verdikleri tepkilerin belirlenmesi için en iyi yöntem olduğunu bildirmişlerdir. Bu yaklaşım, farklı emisyon spektrumlarında ve değişen ışık yoğunluğundaki ışık kaynaklarının kullanımını sağlamaktadır. Birkaç dalga boyunun kısa bant spektrumuna sahip olmalarından dolayı, farklı aydınlatma koşullarına bitkilerin tepkisini belirlemek için en uygun ışık kaynağının LED'ler olduğunu bildirmişlerdir. Günümüzde kullanılan yüksek ışık akıllı LED'lerin bitki büyümesi için gerekli olan PAR değerlerinin üretilmesinde yeterli olduğunu ifade etmişlerdir.

Pinho vd (2007), camlı sera koşullarında marul (*Lactuca sativa var. crispa L. 'Frislice'*) bitkisi üzerinde, LED tabanlı tamamlayıcı 460 nm mavi ve 630 nm kırmızı aydınlatma sistemleri ile yaptıkları denemelerde, büyüme performansını incelemişler ve kırmızı-turuncu LED'lerin biyokütle birikiminin artırılmasında etken olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Araştırmacılar, marul büyüme parametrelerinin tamamlayıcı spektral uyarlanmış LED aydınlatma sistemi ile geliştirilebileceğine işaret ederek, mavi ve kırmızı LED sistemine ek olarak çok az miktarda 594 nm sarı ışık ilavesinin biyokütle birikimini artırıcı yönde teşvik ettiğini ve bitkide yaprakların sayısını arttırdığını bildirmişlerdir.

Moreno (2004), farklı dizilişlere sahip LED ışık kaynaklarının aydınlatma homojenliğine etkisini incelemiştir. Çalışmada radyometrik analiz deneysel sonuçları, model sonuçlarıyla karşılaştırılmıştır. Düz bir yüzeyde, ışık kaynağının yaratmış olduğu ışınimsal aydınlık şiddeti ($W.m^{-2}$) değerinin dağılımı incelenmiştir. Yan yana iki, daire ve doğrusal LED dizilişi modelleri de kullanılmıştır. Denemeler belirli yükseklikler için gerçekleştirilmiştir. Deneme ile model sonuçlarının uyumu içinde olduğu gözlenmiştir. Deneme sonuçlarından yan yana iki LED dizilişli sistemde yüzey üzerinde ölçülen ışınimsal aydınlık değerinin merkezden dışa doğru azaldığı gözlenmiştir. Benzer gözlem doğrusal LED dizilişli sistem incelendiğinde, ışınimsal aydınlık değerinin merkezden dışa uzaklaştıkça azaldığı ve bu değer aydınlatma yüzeyinin çok büyük bir kısmında homojen olduğu ve sadece kenarlarda farklılıkların bulunduğu tespit edilmiştir.

Wu vd (2009), güç LED'lerini (100 W) kullanarak güneş enerjisi destekli otoyol LED aydınlatma sistemleri üzerine çalışmalar yapmışlar ve 10 km uzunluğunda iki şeritli otoyol için kurulum masrafını tahmin etmeye çalışmışlardır. Direkler arası mesafe 30 m'dir. Güneş enerjili ve şebeke destekli LED aydınlatma sistemlerini, cıva buharlı lambalarla karşılaştırmışlardır. Şebeke ve güneş enerjisi destekli LED aydınlatma sistemlerinin kurulum maliyeti sırasıyla 22 ve 26 milyon \$ olarak hesaplanmıştır. Diğer taraftan cıva buharlı lamba aydınlatma sisteminin kurulum maliyeti 18 milyon \$'dır. LED aydınlatma sistemlerinin kurulum maliyetinin yüksek olmasının, LED lambaları ve güneş enerjisi panellerinden kaynaklandığını bildirmişlerdir. Fakat LED aydınlatma sistemlerinde %75 enerji tasarrufu sağlanabildiğinden, güç üretimi ve elektrik taşıma hatlarının maliyeti çok büyük oranda azalmaktadır. Şebeke ve güneş enerjisi destekli LED aydınlatma sistemlerinin geri ödeme süreleri sırasıyla 2.2 ve 3.3 yıl olarak hesaplanmıştır.

Çolak vd (2007), güneş pili panelleri ile şarj edilebilen bir akü sistemi üzerinden beslenen LED'li aydınlatma armatürünün iki farklı mercekle kullanılarak tasarlanması ve uygulanması üzerine bir araştırma yapmışlardır. Yapılan deneysel çalışmaları sonuçlarına göre, 45° lik merceğin 15° lik merceğe göre daha geniş alanın daha az ışık şiddetiyle aydınlatılabildiğini saptamışlardır. Bu durum, kullanılan mercekle açısının aydınlatma yüzeyi üzerinde etkili olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, 3 m yüksekliğindeki bir

aydınlatma mesafesi için, aydınlatılacak yüzey dar bir alan ise küçük açılı mercekle, sokak aydınlatması gibi geniş alanlarda ise büyük açılı merceklerin kullanımının uygun olacağını bildirmektedirler.

Yurtseven vd (2011), Türk Standartları Enstitüsü (TSE) bünyesinde oluşturulmuş olan “MTC 33- Aydınlatma Armatürleri ve İlgili Donanımlar” başlıklı ayna komitede, LED ve LED ışık kaynaklı armatürlerin değerlendirilmesi ve uluslararası gelişmelere paralel olarak Türkiye’de de LED ve LED ışık kaynakları hakkındaki standartların eş zamanlı olarak yayımlanması gerektiğini belirtmektedirler. Yazarlar, Türkiye’deki LED piyasasının zamanında ve doğru olarak düzenlenmesi açısından bu çalışmanın acil yapılması gerektiğini bildirmişlerdir.

Aydınşakir vd (2005), ısıtmasız plastik sera koşullarında yürüttükleri bir araştırmada doğal gün uzunluğunun devamı şeklinde akkor telli ve sodyum buharlı lambalar kullanarak ek aydınlatma yapmışlar ve bu lambaların Altınbaşak (*Solidago x hybrida ‘Tara’*) da bazı verim ve kalite özellikleri üzerine etkilerini belirlemişlerdir. Fotoperiyodik aydınlatma için 100 W gücündeki 4 adet akkor telli lambalar aralarında 3.00 m mesafe bırakılarak toprak yüzeyinden 1.75 ± 0.05 m’ye; 400 W gücündeki 1 adet sodyum buharlı lamba ise 3.00 ± 0.05 m’ye ayarlanmıştır. Akkor telli lamba ile sağlanan $1.6 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ lik ışık şiddetine karşılık sodyum buharlı lamba ile $7.8 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ lik ışık şiddeti verim ve kalite açısından yeterli olmuş ve benzer çalışmalarla paralellik göstermiştir. Her iki ışık kaynağı araştırma süresi boyunca aynı enerjiyi harcamasına rağmen birim alandan elde edilen çiçekli sürgün yaş ağırlıkları karşılaştırıldığında sodyum buharlı lamba altında yetiştirilen bitkilerin çiçekli sürgün yaş ağırlıkları 530.8 g.m^{-2} daha yüksek bulunmuştur. Bu da harcanan aydınlatma enerjisinin daha verimli kullanıldığı ve üreticilerin aynı enerji miktarı ile daha fazla verim almaları anlamına gelmektedir. Araştırmanın diğer bulgularına göre; verim, sap uzunluğu, salkım uzunluğu, gövde çapı ve çiçekli sürgün yaş ağırlığı değerleri üzerinde sodyum buharlı lamba uygulamalarının en iyi sonuçları verdiği belirlenmiştir.

Sirel (2009), LED ve geleneksel ışık kaynaklarının ışık akılarını karşılaştırmış, çok yakın bir gelecekte ve birçok alanda LED ışık kaynaklarının geleneksel ışık kaynakları yerine tercih edileceğini belirtmiştir. Araştırmacı bunun için, lambalı ışıklıklardaki yansıtıcı etüdüne benzer bir biçimde, LED’li ışıklıklarda da gerekli etütlerin yapılmasının ön koşul olduğunun unutulmaması gerektiğini belirtmektedir.

Yurttaş vd (2011), ışık yayan diyotların ışık yayma modunda verici olduğu, fotodiyot veya güneş pili modunda alıcı olduğu bir düzenek oluşturularak, LED’lerin çeşitli ışık şiddetleri altında ürettikleri fotoakım değerleri üzerinde çeşitli ölçümler yapmışlardır. Araştırmacılar, bu fotoakım değerleri verici ve alıcı LED’leri yaydıkları ve hassas oldukları dalga boylarına ve ışık şiddetlerine göre karşılaştırmışlar ve LED’lerin düşük maliyetli spektrofotometri uygulamalarında kullanılabileceğini bildirmişlerdir.

Akbulut ve Gül (2011), geleneksel ışık kaynaklarından farklılıkları nedeniyle LED’li ışık kaynaklarının karakteristiklerini belirlemede yeni yöntemlerin geliştirilmesine ve özel ölçüm standartlarının oluşturulmasına ihtiyaç duyulduğunu belirterek, yaptıkları çalışmada LED’li ışık kaynaklarının karakteristiklerinin belirlenmesi için gereken yöntemleri ele almışlardır.

Ha (2009), çoklu kırmık LED dizileri üzerinde Sonlu Elemanlar Yöntemi'ni (*FEM: Finite Element Method*) kullanarak ısı analizler yapmış ve LED aydınlatma için kritik tasarım şartlarını araştırmıştır. Araştırma sonuçlarına göre, LED çıkış akısının en yüksek seviyeye çıkarılabilmesi için sıcaklığın en düşük seviyeye çekilmesi gerektiği, bunun içinde kavşak noktası sıcaklığının ve LED dizisindeki LED'ler arasındaki boşluğun en uygun düzeyde olacak şekilde tasarlanmaları gerektiğini bildirmiştir.

Christensen vd (2007), sayısal ısı akış modeli kullanılarak 1W üzerindeki yüksek güçlü LED dizilerinde ısı dağılımını incelemişlerdir. Analizler için ısıl direnç ağ modeli üç boyutlu sonlu elemanlar ile oluşturulmuş ve LED yapısındaki katmanların sıcaklık seviyeleri belirlenmiştir. Araştırmacılar, GaN katmanı içindeki ısıl direncin, farklı ışık dalga boyu aralıklarında LED'lerin performansını etkileyebileceğini bildirmişlerdir.

Avgan ve Özcan (2011), zamandan bağımsız (steady-state) yapılan iki analiz ile örnek bir LED üzerindeki sıcaklık dağılımını ve meydana gelen ısıl gerilmeleri sonlu elemanlar analiz (*FEA: Finite Element Analysis*) yöntemi kullanarak hesaplamışlardır. Tasarımda kullanılan alüminyum soğutma kanalının boyutlandırılmasının ve alt tabaka modelinin LED için uygun sıcaklık değerlerinin elde edilmesinde etkisinin olduğunu belirtmişlerdir. Yapısal analizler sonucunda ise, eğilme (bending) kaynaklı gerilmelerin sistemde etkili olduğu görülmüştür. Isıl genleşme değeri yüksek Au katmanının genleşmesi sonucunda kritik GaN katmanının gülen yüz şeklinde (smiley) eğildiği ve kenar hattı boyunca kritik gerilim değerlerine ulaşıldığı bildirilmektedir.

3. LED LAMBALI AYDINLATMA OTOMASYON SİSTEMİNİN TASARIMI ve UYGULANMASI

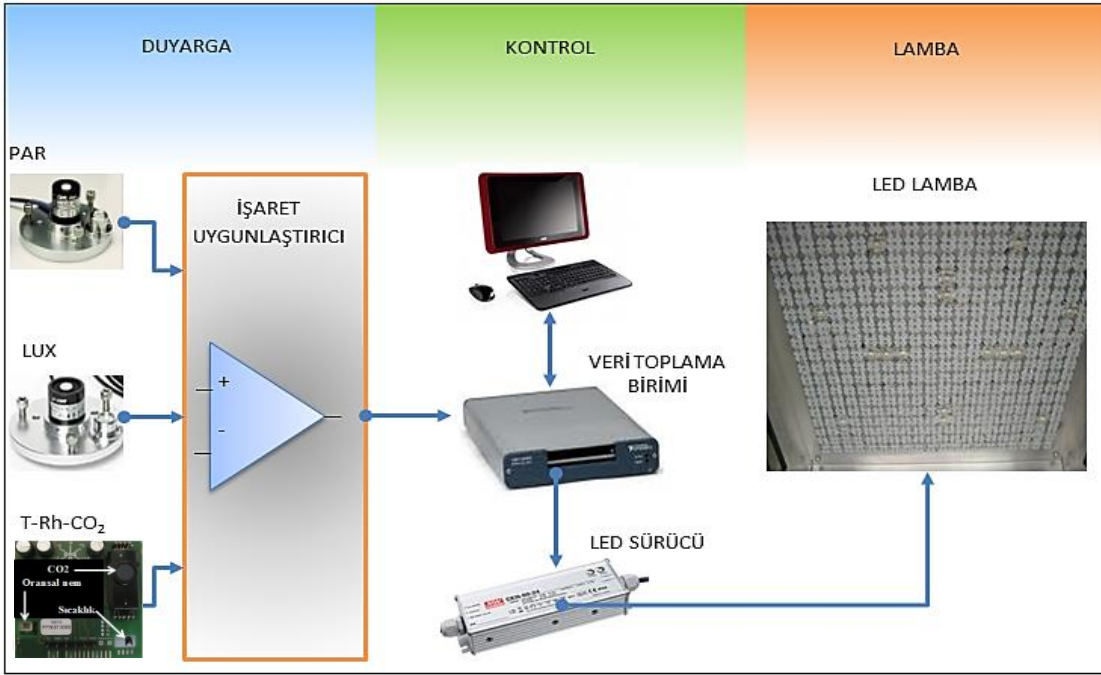
Bitkilerin yeterli fotosentez yapısı iyi bir gelişme gösterebilmeleri için, özellikle ışık faktörü, CO₂ yoğunluğu ve sıcaklık seviyesi çok önemlidir. Fotosentez işleminde kullanılacak dalga boyu 380–700 nm aralığındadır ve günlük toplam 1.2-1.7 MJ.m⁻² ışınım enerjisi almaları gerekmektedir. Seranın bulunduğu ortama ulaşan doğal ışınımın %70-80'inin sera içine girebildiği ve bunun da ancak %45'inin PAR (Photosynthetically Active Radiation) olduğu düşünülürse, kış aylarında 40° kuzey enleminden daha kuzeydeki ile bulutluluk oranı yüksek yörelerde gelen ışınımın PAR enerjisi açısından yetersiz olduğu görülmektedir (Yağcıoğlu 2005). Özellikle seralarda yapılan üretim sırasında eksik PAR enerjisinin karşılanması için yapay aydınlatma kaynaklarının kullanılması, bitkilerin gelişme sürelerini kısaltarak önemli bir zaman kazancı sağlamaktadır. Bu amaçla gerekli olan en düşük ışınım değeri aşağıdaki eşitlikten hesaplanabilir;

$$P = \frac{I}{3600.T} \quad (3.1)$$

Burada, P gerekli PAR miktarını (W.m⁻²), I gelen ışınım miktarını (MJ.m⁻².gün⁻¹) ve T ortalama gün uzunluğunu (saat.gün⁻¹) göstermektedir.

Günümüzde kullanılmakta olan geleneksel yapay aydınlatma kaynaklarının eksik PAR enerjisini karşılamak bakımından bitkisel üretime katkıları olurken, yapısal özelliklerinden kaynaklanan bazı dezavantajları da beraberinde getirmektedirler. Bu dezavantajları ortadan kaldırmak için geleneksel aydınlatma kaynakları yerine LED aydınlatma kaynaklarının kullanımı iyi bir çözüm olabilir. Özellikle aşılı fide, doku kültürü vb. gibi tam yapay aydınlatma çalışmalarının yapıldığı bitki yetiştirme ortamlarında gerekli PAR enerjisi yüksek güçlü LED (*High Power LED*) ışığı ile sağlanabilir ve geleneksel ışık kaynaklarından farklı olarak istenilen dalga boyunda ışık verilebilir.

Yapılan bu çalışma ile sera ve tam yapay bitki yetiştirme ortamlarında eksik PAR enerjisinin karşılanabilmesini sağlayan LED lambalı aydınlatma otomasyon sisteminin tasarlanması ve gerçekleştirilmesi olanakları araştırılmış ve elde edilen sonuçlar tartışılmıştır. Sistemin odağında bulunan ve farklı dalga boylu ışık verebilen LED lambasının aydınlatma özellikleri geliştirilen özel bir yazılım ile kontrol edilebilmektedir. LED lamba, kırmızı (620-630 nm), mavi (465-485 nm), morötesi (UV-A bölgesi, 390- 410 nm) ve soğuk beyaz (6500 K) ışık veren yüksek ışık akıllı LED'lerin uygun şekilde dizilmeleriyle oluşturulmuştur. Aydınlatma Otomasyon Sistemi'ne ait blok şema Şekil 3.1'de görülmektedir.



Şekil 3.1. Aydınlatma Otomasyon Sistemi blok şeması

Çalışmada öncelikle LED lambanın tasarımı gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla LED lamba içine yerleştirilecek LED'lerin dizilimi gerçekleştirilmiş elde edilen LED lamba için optik ve ısıl analizler yapılmıştır. Isıl analizler için bilgisayar ortamında Sonlu Elemanlar Yöntemi kullanılmış, optik analizlerde ise aydınlık şiddeti ve PAR ölçümlerinden yararlanılmıştır. Elde edilen sonuçlara uygun olarak da yapısal ve elektronik tasarım ile bunu kontrol edecek yazılım çözümleri araştırılmıştır. Laboratuvar ortamında yapılan bu çalışmalar sonucu tüm sistem elemanlarının güvenli çalışma şartlarının sağlandığı görüldükten sonra bitkisel üretim ortamlarındaki denemelere geçilmiştir. Bitkisel üretim ortamı olarak istenen iklim şartlarının ayarlanabilmesine olanak sağlayan bir bitki yetiştirme kabini kullanılmış ve LED lamba kabin içerisine yerleştirilerek bitki fideleri üzerinde uygulamalar yapılmıştır.

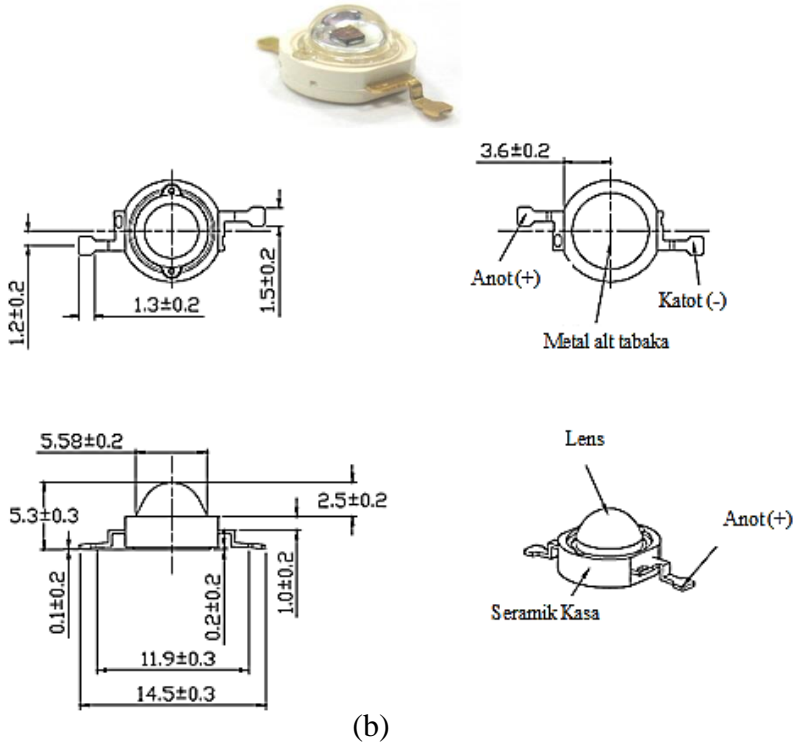
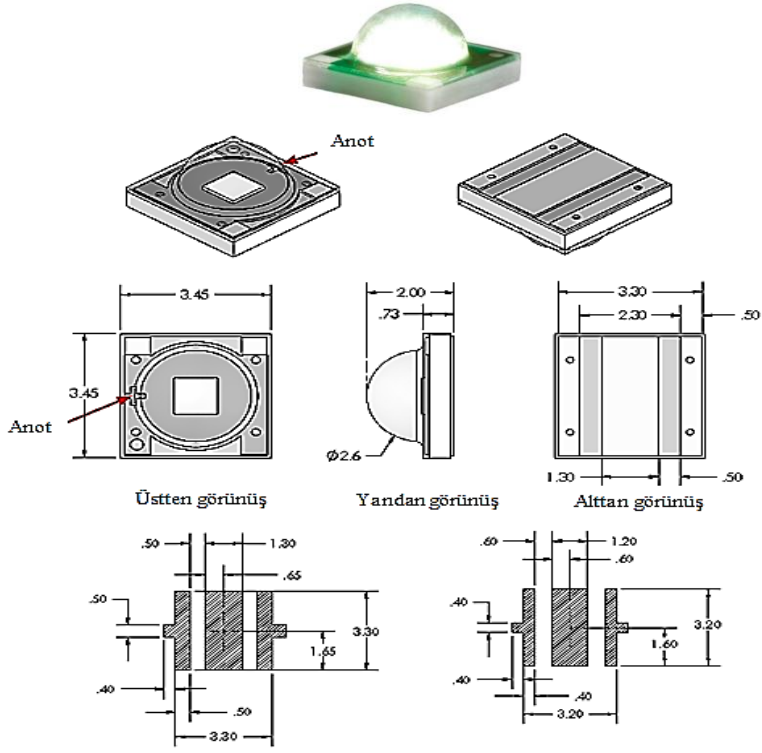
3.1. Optik Tasarım

3.1.1. LED seçimi

LED lamba, soğuk beyaz, mavi, kırmızı ve morötesi (UV-A bölgesi) güç LED (Power LED) lerden oluşmaktadır. Soğuk beyaz LED'ler ile mavi ve kırmızı dalga boylu LED'ler, CREE firmasına ait XLamp XP-C yüksek akıllı güç LED'lerinden, morötesi ise EDISON Opto firması tarafından üretilen Edixeon S serisi güç LED'lerinden seçilmiştir. Kullanılan LED'lerin teknik özellikleri Çizelge 3.1'de, ölçüleri Şekil 3.2'de verilmiştir.

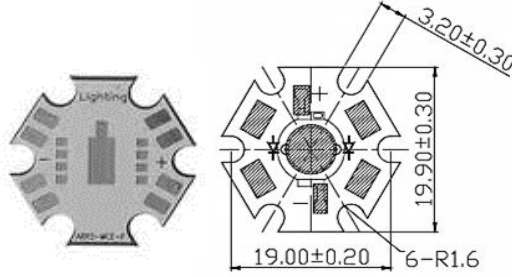
Çizelge 3.1. Çalışmada kullanılan LED'lere ait teknik özellikler (Cree, Edison Opto Inc. 2012)

Teknik özellik	Çalışmada kullanılan LED'ler			
	Cree XLamp XP-C			Edison Opto Edixeon S
	Soğuk beyaz	Kırmızı	Mavi	Morötesi (UV-A)
Renk sıcaklığı (K)	6500	-	-	-
Dalga boyu (nm)	400-700	620-630	465-485	390-410
Işık akısı	100 lm	45.7 lm	23.5 lm	528 mW
Renk dönüşüm dizini (CRI)	70	-	-	-
Çalışma akımı (mA)	350	350	350	700
Çalışma gerilimi (V)	3.2- 3.9	2.2-2.5	3.3-3.9	3.4
Çektiği güç (W)	1	1	1	3
En yüksek kavşak noktası sıcaklığı (°C)	150	150	150	125
Isıl direnç (°C W ⁻¹)	12	10	12	15
Işık yayım açısı (°)	115	125	125	120
Gerilimin sıcaklık katsayısı (mV. °C ⁻¹)	- 4	- 2	- 4	- 2
Paket yapısı	Yüzey montaj (SMD: Surface Mount Device)			



Şekil 3.2. a) Soğuk beyaz, kırmızı, mavi (XLamp XP-C, Cree Inc.) ve b) morötesi (Edixeon S, Edison Opto Inc.) LED ölçüleri

Tüm LED'ler yüzey montaj (*PCB: Printed Circuit Board*) teknolojisiyle üretilmiş olup, yıldız tip soğutucular üzerine yerleştirilmiştir. Kullanılan yıldız tip alüminyum soğutucunun görünüş ve ölçüleri Şekil 3.3'de verilmiştir.



Şekil 3.3. LED'ler için kullanılan yıldız tip alüminyum soğutucu görünüş ve ölçüleri

3.1.2. LED lamba tasarımı

Yüksek aydınlık şiddeti verebilen geleneksel ışık kaynaklarının yaydığı ışınımın aydınlık şiddetine eş miktarda ışınımın aydınlık şiddeti elde edebilmek için pek çok LED bir araya getirilerek LED dizilerinin oluşturulması gerekmektedir. Yakın alan (fresnel bölgesi) uygulamaları için lamba ile bitki arası düşey düzlemdeki uzaklığı, LED dizisinin boyutundan beş kez daha azdır. Bu durum, LED noktasal bir kaynak gibi düşünülecek olursa, ters kare yasası ile açıklanabilir (Şekil 3.4).



Şekil 3.4. Ters kare yasası (O'Nolan 2012)

Ters kare yasasına göre, aydınlatılan nesne üzerindeki aydınlık ışınım şiddeti, ışık kaynağı ile aydınlatılan nesne arasındaki mesafenin karesi ile ters orantılıdır. Örneğin, kaynaktan iki kat uzaklığa gidilecek olursa aydınlanma 1/4'ine düşmektedir. Bu durum aşağıdaki eşitlik ile açıklanabilir:

$$E = \frac{1}{r^2} \quad (3.2)$$

Burada, E aydınlatılan nesne üzerindeki aydınlık ışınım şiddeti, r ışık kaynağından olan uzaklıktır. Parlaklık seviyesi yüksek LED'ler için, ışığın boşluktaki dağılım şiddeti aşağıdaki eşitlik ile bulunur;

$$I_e(\alpha) = I_{e0} \cos \alpha \quad (3.3)$$

Burada, $I_e(\alpha)$ dikey düzlem ile α açısı yapan LED'in açısal ışımaya şiddeti, I_{eo} yatay düzleme dik doğrultuda gelen ışımaya şiddetidir. Yatay düzlem üzerinde, bir LED'den “ d ” kadar uzaklıktaki bir noktadaki açısal parlaklık;

$$E_e(\alpha) = \frac{I_{eo}}{d^2} \cos \alpha \quad (3.4)$$

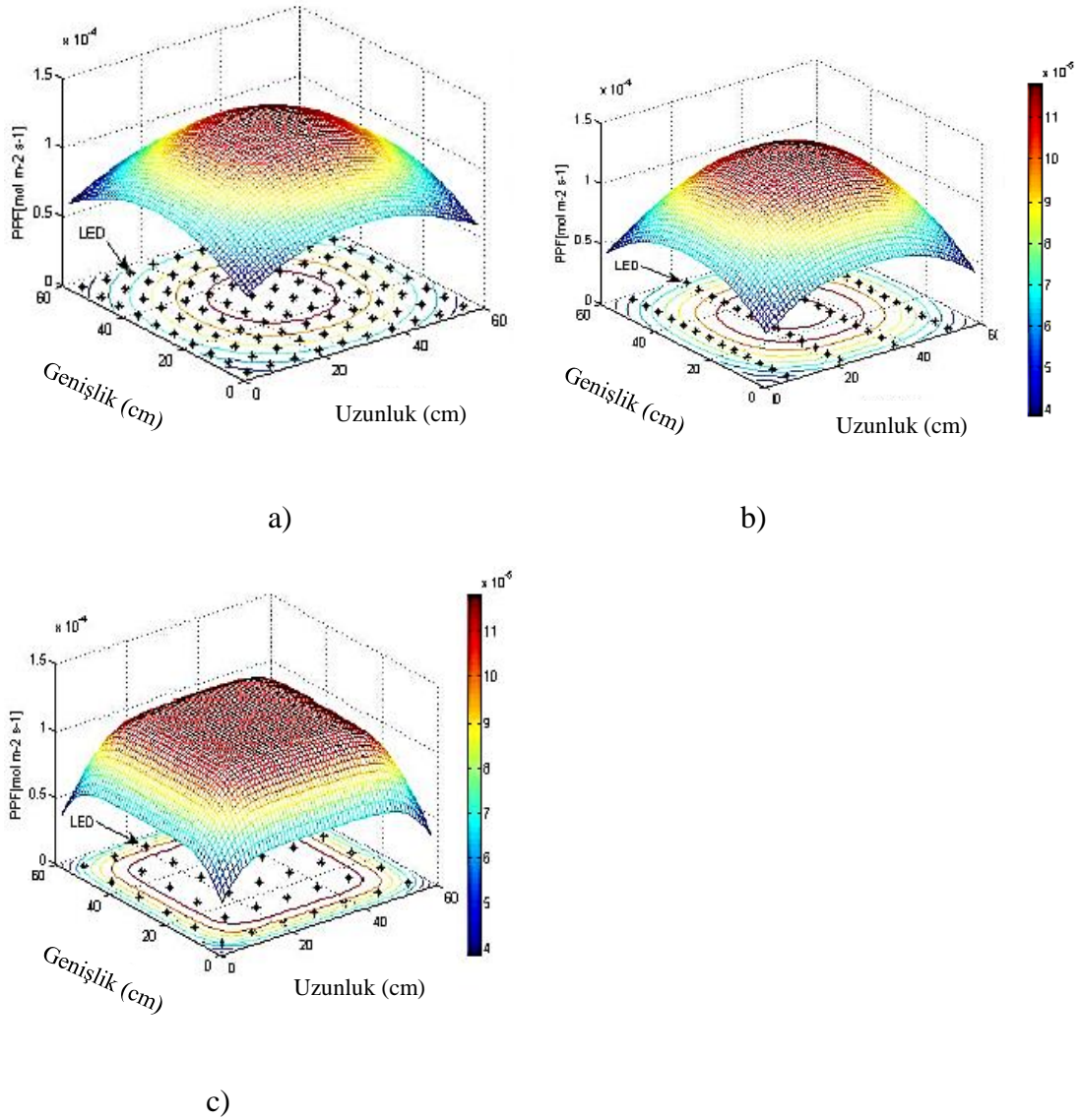
eşitliği ile bulunur. Bulunan parlaklık değeri foton akışı değerine ($\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) aşağıdaki eşitlik yardımıyla çevrilebilir;

$$E_p(\alpha) = \frac{\lambda_{\text{peak}} \times I_{eo}}{N_A \times h \times c \times d^2} \times \cos \alpha \quad (3.5)$$

Burada, N_A Avogadro sayısı (6.022×10^{23}), h Planck sabiti (6.626×10^{-34} J.s), c ışığın boşluktaki hızı (2.998×10^8 m.s⁻¹) ve λ_{peak} LED ışığının dalga boyu tepe noktası (m) dir.

LED'ler ışığı belli bir yönde yayan (yarı izotropik) uzaysal yayıma sahiptirler. Buna rağmen, LED'den çıkan fotonların bazıları tanımlanmış olan yönün yanında ve daha büyük bir görüş açısı yapacak şekilde yayılırlar. Bu nedenle, ışığın yayılımında ve doğru alanı aydınlatmasında montaj yüksekliğinin büyük önemi vardır. LED'in kendi merceği dışında ikinci bir mercek (Yön verici mercek) kullanılarak daha büyük oranlarda ışık akısı aydınlatılmak istenilen alana doğru yönlendirilebilir. Böylece aydınlatma verimi ve aydınlık şiddeti artırılabilir. Öte yandan, yön verici merceklerin %80-90 oranında ışığı odaklayıcı yüksek optik etkinliği sayesinde istenilen PPF değeri daha az sayıda LED kullanımıyla sağlanabilir. Şekil 3.5.a'da, yatay düzlemde 30 cm yükseklikte asılı 60x60 LED dizisinin yön verici mercek kullanılmadığı ve Şekil 3.5.b ve c'de ise yön verici mercekler kullanıldığı durumdaki PPF dağılımları görülmektedir.

Pinho (2008) LED'lerle yaptığı araştırmada, daha az LED ile birlikte yön verici mercekler kullanılırsa, yaklaşık aynı PPF değerinin elde edilebileceğini, fakat bu durumda mercek olmadan ve daha çok LED'in kullanıldığı ışığa göre homojen ışık dağılımının bir miktar bozulacağını bildirmiştir (Şekil 3.5.b ve c). Araştırmaya göre, ikinci bir mercek kullanılmadan 90 LED ile $100 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ PPF değeri elde edilirken, aynı miktar 30° yön verici mercek kullanıldığı takdirde sadece 42 adet LED yeterli olmaktadır. Bu durumda homojen PPF değeri, asgari/ortalama düzey oranı tarafından %60'dan %38'e düşürülmüş olacaktır. Öte yandan, Şekil 3.5.a ve b'de görülen PPF miktarının ortalama $100 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ (sarı hat) ile karşılaştırıldığında daha yüksek düzeyde olduğu, dolayısıyla merceklerin ışık akısını arttırdığını göstermektedir. Araştırmacı ayrıca, yön verici merceklerin kullanılmasıyla LED sayısı değiştirilmeden ışık kaynağının montaj yüksekliğinin artırılması halinde bile kabul edilebilir ortalama PPF değerinin korunabileceğini bildirmektedir.



Şekil 3.5. a) Yön verici mercek kullanılmadan, b) 60° mercek kullanıldığında ve c) 30° mercek kullanıldığında ışığın PPF dağılımı (Pinho 2008)

LED tabanlı aydınlatma sistemlerinin tavana yerleştirilen geleneksel ışık kaynaklarına göre önemli bir avantajı da ışık akısının ve dalga boyunun kontrolünün sağlanabilmesidir. Fotosentez açısından en uygun dalga boylu ışık seçilerek bitkideki morfolojik özellikler optimize edilebilir. Işık dalga boyunun kontrolü fotosentezin en uygun düzeye getirilmesini sağladığı gibi ürünün yetişmesinin de kontrol altına alınmasına olanak verecektir.

LED'ler, 10000 K ile 2500 K arası değişim gösteren renk ilişkili sıcaklıklarında (CCT) sunulmaktadır. CCT aralığı LED'lerin çok değişik uygulamalarda kullanılmasına olanak vermekte ve yeni lamba tasarımları yapılabilmektedir (Moisio vd 2004). CCT'yi kontrol etmek için kullanılan pek çok teknik bitki yetiştirme lambalarının farklı dalga boylarını verebilmeleri için de uygulanabilir ve böylece fotosentez için uygun ışık elde edilebilir. Bu tekniklerden biri de, LED'i oluşturan parçaların dizilimindeki bağlantı

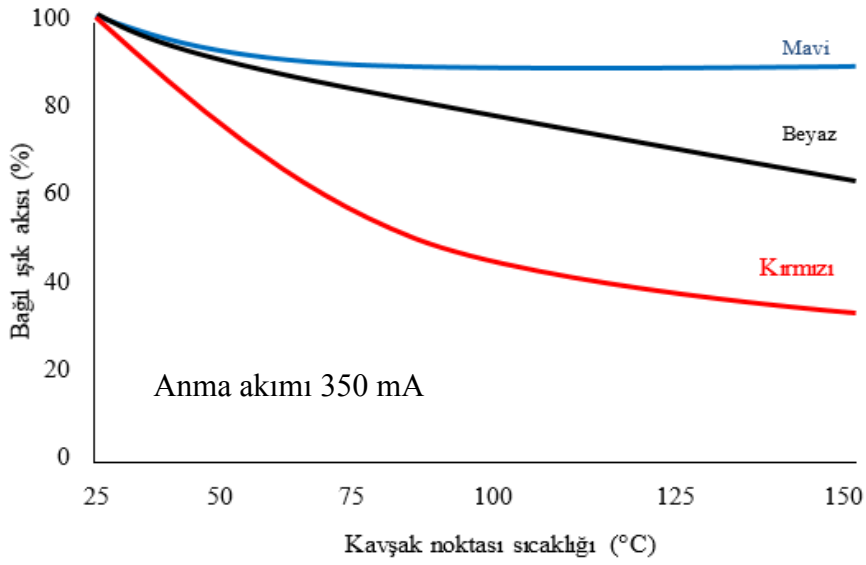
noktası sıcaklığının dolaylı yolla ölçümü esasına dayanmaktadır. LED ışığının çıkışı ve spektral dağılım özellikleri, LED'in bağlantı sıcaklığına bağlı olarak değişmektedir. Bundan dolayı, LED değişken ortam sıcaklıklarında çalışırken ışık tayf değişimlerini azaltmak için bağlantı noktası sıcaklıklarının belirlenmesi ve mümkün olduğu kadar sabit tutulması gerekmektedir (Moisio vd 2005).

Mikroişlemcilerle bütünleşik programlanabilir katı hal ışık kaynakları, LED dizileri ve sürücüsü ile kompakt ve montajı pratik özelliğinden ötürü pazar payı giderek artmaktadır. Dijital olarak dalga boyu kontrol edilebilen LED lambaları, tarımsal aydınlatmada güneş ışığına benzer gerçekçi ışığı verebilmektedir. LED ışığının dalga boyunun kontrol edilebilmesi, yapay aydınlatma ile bitki yetiştirme uygulamalarında ışığın bitki üzerindeki etkilerini görmek açısından önemli faydalar sağlayacaktır. Bu nedenle LED'lerin verdiği ışıktan daha fazla yararlanabilmek için fotobiyoloji ve bitki fiziolojisi üzerine daha çok bilgiye ve araştırmaya ihtiyaç vardır.

3.2. Isıl Tasarım

LED yapısındaki yarı iletken malzemenin aktif bölgesinde oluşan fotonların hepsi dışarı verilmeyip, LED'in yapısal biçiminin bir sonucu olarak iç kısımda kısmen emilmekte ve ısı enerjisine dönüşerek kaybolmaktadır. Öte yandan, teknolojik yetersizlikler ve yarı iletkenin katmanları arasındaki temas yüzeylerinden kaynaklı kayıplar da buna eklenebilir. Eğer tüm bu kayıplar sonucu oluşan ısı LED paketinden uzaklaştırılmazsa, LED kısa zamanda zarar görecektir. Bu yüzden, LED'in optik ve elektriksel performansı üzerinde sıcaklığın kötü etkisini ortadan kaldıracak pasif veya aktif soğutma çözümlerinin kullanılması zorunludur. LED'lerdeki ışık çıkışı sabit de olsa, hızlıca artırılrsa da, Haitz (Haitz vd 1999) kuralına göre hareket eder ve enerji verimi daha düşük adım hızı tarafından belirlenir. Bununla beraber, yaygın olarak kullanılan ve beyaz ışık veren yüksek güçlü LED'lerin ışık etkinliği akkor telli lambalardan dört kez daha yüksektir ve flüorışıl lambaların enerji performansını da neredeyse yakalamış durumdadır. Günümüzde kullanılan bu LED'lerin ışık verimi neredeyse %100'e yakın olmasına rağmen (Steigerwald vd 2002), fotonların LED dışına yayılımı ve ışık etkinliği konusunda geliştirilen teknikler henüz uygun düzeye ulaşmamıştır.

Yüksek güçlü LED'lerin ısıl performansı armatür tasarımının daha ilk aşamalarında dikkate alınmalı ve tasarım parametreleri buna göre şekillenmelidir. LED'lerin ısıl yönetiminde ısının uzaklaştırılması iletimle ve doğal konveksiyon ile sağlanabilir. Bu nedenle, güvenli çalışma ve performans açısından eklem noktasından dışarıya doğru olan ısı yolunun termal direnci mümkün olduğunca azaltılmalıdır. Üretici tarafından belirlenmiş en yüksek kavşak noktası sıcaklığının (junction temperature) aşılmasını önlemek için genellikle harici soğutma sistemleri kullanılmaktadır. Kavşak noktası sıcaklığı artarken LED'in ışık çıkışı azalır fakat LED soğuk kalır. Şekil 3.6'da çalışmada kullanılan soğuk beyaz, mavi ve kırmızı ışık veren LED'lerin kavşak noktası sıcaklığına karşı bağlı ışık akısı görülmektedir. Şekillerden de görüleceği gibi %100 ışık çıkışı 25°C kavşak noktası sıcaklığında gerçekleşmektedir.

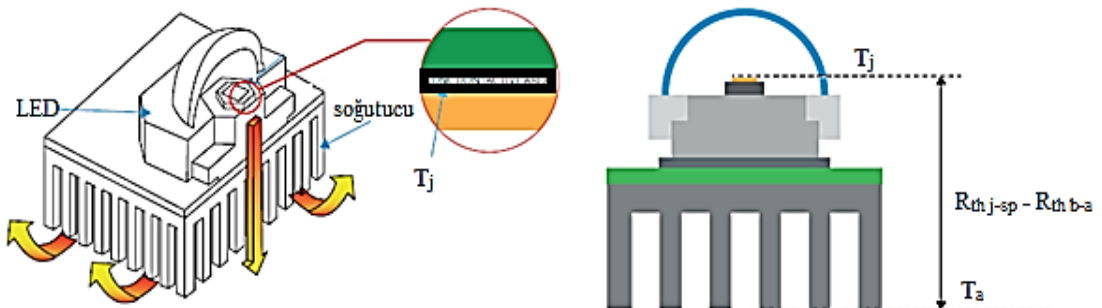


Şekil 3.6. Kavşak noktası sıcaklığı ile bağıl ışık akısı ilişkileri (Cree Inc. 2012)

LED lambadaki ısının uzaklaştırılması için birinci seçenek olarak, piyasada bulunan hazır standart soğutucular kullanılabilir. Diğer seçenek ise, lambaya özel tasarlanacak bir soğutucu kullanmaktır. Bu seçenek diğerine göre en uygunu olmakla birlikte, daha masraflı ve üzerinde çalışılması gereken bir çözümdür. Özellikle çevre sıcaklığının yüksek olduğu ve soğutma ihtiyacının oldukça önem kazandığı yerlerdeki en etkin çözüm lambaya özel soğutucu sistemidir. İlk seçenek diğerine göre daha ucuz bir çözüm olmakla birlikte, çevre sıcaklığının etkisinin çok önemli olmadığı yerlerde kullanımı daha uygundur (Şekil 3.7). Uygun soğutucu seçimi ve tasarımında dikkat edilmesi gereken en yüksek çevre sıcaklık değeri aşağıdaki eşitlik kullanılarak hesaplanabilir (Cree Inc. 2012);

$$T_j = T_a + (R_{th\ b-a} \times P_{total}) + (R_{th\ j-sp} \times P_{LED}) \quad (3.6)$$

Burada, T_j LED kavşak noktası sıcaklığı (°C), T_a çevre sıcaklığı, (°C), $R_{th\ b-a}$ soğutucu ısıl direnci (°C.W⁻¹), P_{LED} tek LED için güç tüketimi ($I \cdot V_f$), (W), P_{total} toplam güç tüketimi (W) ve $R_{th\ j-sp}$ LED paketi ısıl direnci (°C.W⁻¹) dir.



Şekil 3.7. LED soğutucusu

Örneğin, $T = 80^{\circ}\text{C}$, $R_{th\ b-a} = 0.47\ ^{\circ}\text{C}\ \text{W}^{-1}$, $I_f = 350\ \text{mA}$, $V_f = 3.3\ \text{V}$ ve $R_{th\ j-sp} = 8^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1}$ olan ve içerisinde 16 adet LED bulunan bir lamba için çevre sıcaklığı (T_a);

$$T_a = T_j - (R_{th\ b-a} \times P_{total}) - (R_{th\ j-sp} \times P_{LED})$$

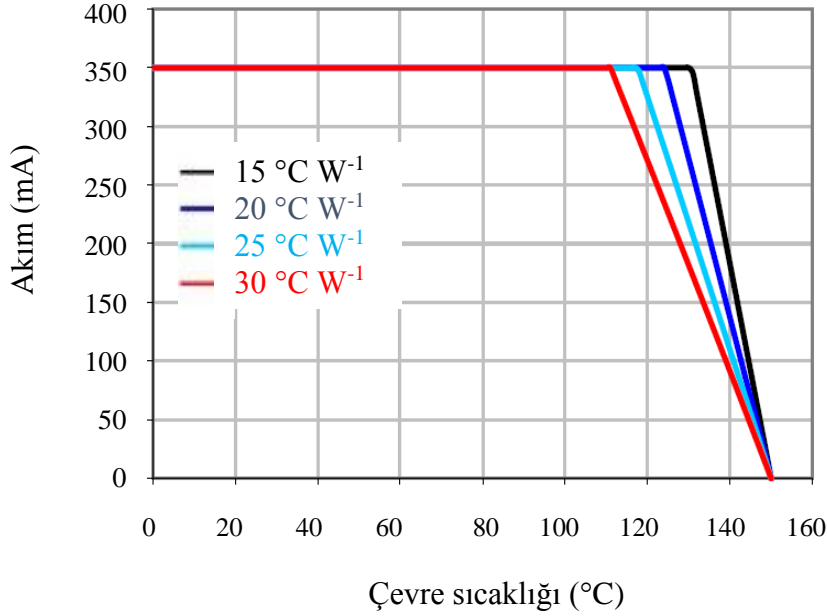
$$P_{LED} = 0.35\ \text{A} \times 3.3\ \text{V} = 1.155\ \text{W}$$

$$P_{total} = 16 \times 1.155\ \text{W} = 18.48\ \text{W}$$

$$T_a = 80^{\circ}\text{C} - (0.47^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1} \times 18.48\ \text{W}) - (8^{\circ}\text{C}\cdot\text{W}^{-1} \times 1.155\ \text{W})$$

$$T_a = 62^{\circ}\text{C}\ \text{olacaktır.}$$

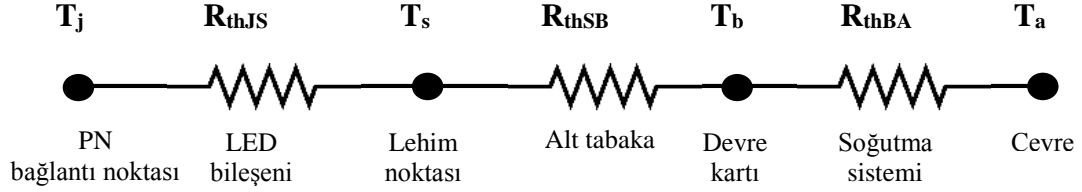
Bu sonuca göre, LED lambanın bulunduğu yerdeki çevre sıcaklığı $T_a=62^{\circ}\text{C}$ 'yi geçmemelidir. Daha yüksek çevre sıcaklığında çalışabilmesi için ya kavşak noktası sıcaklığının artırılması (bu durum LED'in ömrünü olumsuz yönde etkileyebilir) ya da daha iyi bir soğutucu sistemin LED üzerine yerleştirilmesi gerekmektedir. Şekil 3.8'de lamba için kullanılan LED'lerin çevre sıcaklığı ile çektikleri akım arasındaki ilişki verilmiştir. Görüldüğü gibi 110°C sıcaklığa kadar LED'ler anma akımında çalışırken, bu sıcaklıktan sonra akım düşmeye başlamaktadır.



Şekil 3.8. LED'lerin çevre sıcaklığı ile çektikleri akım arası ilişki (Cree Inc. 2012)

Bu çalışmada, her LED önce alüminyumdan imal edilmiş yıldız tip soğutucu üzerine yerleştirilmiş, fakat yapılan ısıl analizler sonucu bu soğutucuların yeterli olmadığı görülmüştür. Bu nedenle, lambanın bütünü için harici daha büyük boyutlu ve kanallı bir soğutucu kullanılmıştır. Konuyla ilgili detaylı ısıl analiz değerlendirilmesi, Bölüm 3.2.1'de verilmiştir. LED üreticileri, LED'e ait teknik bilgileri verirken 25°C kavşak noktası sıcaklığındaki çalışma şartlarını dikkate almaktadırlar. Fakat günlük yaşamda kullandığımız LED lambalardaki LED'ler çoğunlukla bu sıcaklığın çok daha üzerinde çalışmaktadırlar ve bu nedenle de ışık seviyesi ve kalitesinde ciddi azalmalar görülmektedir. Bu durum LED lambalarda ısıl tasarımın ne denli önemli olduğunu göstermektedir. Bu yüzden, LED ya da LED dizisinin çalışması süresince umulan en yüksek çevre sıcaklığı belirlenmeli ve uygun harici soğutma sistemine ait ısıl direncin

toplam değeri hesaplanmalıdır. Şekil 3.9 bir LED üzerine yerleştirilmiş ısı iletken tabaka ile soğutucu sistemin eşdeğer devresini göstermektedir (Pinho vd 2005).



Şekil 3.9. LED tabakaları arası ısı iletimi eşdeğer devresi

Isı iletimi eşdeğer devresinin (Şekil 3.9) ısı direnci (R_{thJA});

$$R_{thJA} = \frac{T_j - T_a}{P_D} \quad (3.7)$$

Burada; T_j , P ve N yarı iletken materyalleri arasındaki bağlantı (kavşak) noktasının sıcaklığını, T_a çevre sıcaklığını ve P_D LED'in toplam güç kaybını göstermektedir. Soğutucu sistemi için en yüksek ısı direnç değeri (R_{thBA});

$$R_{thBA} = R_{thJA} - (R_{thJS} + R_{thSB}) \quad (3.8)$$

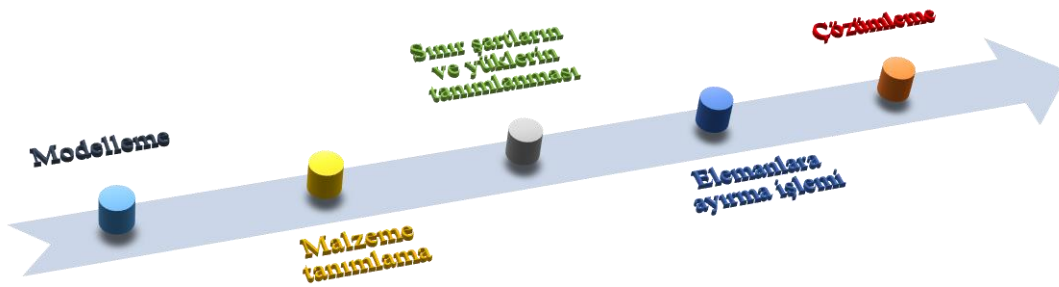
Burada; R_{thJS} , kavşak ve lehimleme noktası arasındaki termal direnç, R_{thSB} alt tabaka ısı direncidir.

3.2.1. LED lamba için gerçekleştirilen ısı analizler ve soğutucu seçimi

LED modül ve LED'li aydınlatma armatürlerinin performanslarının ölçülmesi konusunda teknik bir rapor olan CIE 127:2007, sadece tekil LED kırmıklarının 25°C ortam sıcaklığındaki performans ölçümleri için düzenlenmiştir. Fakat LED'lerin gerçek uygulamalardaki çalışma sıcaklıkları 25°C'den çok daha yüksek olarak gerçekleşmektedir. Dolayısıyla mevcut olan bu rapor LED'lerin gerçek çalışma sıcaklıklarında geçerli olabilecek bir ölçüm yöntemi önermemektedir. Sıcaklığın artışı, LED'lerin ışık akılarını, renksel özelliklerini ve ömürlerini negatif yönde etkilemektedir. Aynı şekilde üreticiler de beyan ettikleri katalog verilerinde, 25°C ortam sıcaklığını temel aldıkları için, doğrudan bu veriler ile yapılan armatür tasarımları, teorik olarak istenilen aydınlatma ölçütlerini sağlasalar da, pratikte hedeflenen değerlere ulaşamamaktadır. Bu nedenlerden ötürü LED ışık kaynaklarının mutlaka ısı analizleri yapılarak uygun soğutucularla birlikte tasarlanmaları gerekmektedir.

Çalışma kapsamında geliştirilen LED lamba için soğutucu grubuna karar vermeden önce, bilgisayar ortamında sayısal yöntemler kullanılarak ısı analizler yapılmıştır. Sayısal yöntemler matematikte ayrık ya da süreksizlik yöntemleri (Discretization / discrete methods) olarak da isimlendirilen, yapıyı sonlu sayıda nokta ile tanımlayan ve bu şekilde tanımlanmış mühendislik problemlerine yaklaşık çözümler sunan yöntemlerdir. Özellikle doğrusal (Linear) ve doğrusal olmayan (Non-linear) mühendislik uygulamalarında en güçlü çözümü sonlu elemanlar yöntemi sunmaktadır.

Yöntemin esasları üzerinde yapılan çalışmalar ve farklı disiplinlerdeki problemlere uygulanabilirliği ile bugün neredeyse yapısal, ısı transferi, elektromanyetik, akışkanlar dinamiği vb. konularla ilgili tüm mühendislik problemlerinin çözümünde kullanılmaktadır. Sürekli gelişen bilgi teknolojisi bu metodun yaygınlaşmasını sağlamıştır. Bugün Sonlu Elemanlar Yöntemi (*FEM: Finite Element Method*) ile gerçekleştirilen mühendislik analizleri Sonlu Elemanlar Analizi (*FEA: Finite Element Analysis*) olarak da anılmaktadır (Liu 1998, Nath 1974). Şekil 3.10 Sonlu Elemanlar Yöntemi'nde yapılan analizlerde takip edilen adımları göstermektedir.



Şekil 3.10. Sonlu elemanlar yönteminde takip edilen adımlar

Çalışmada katı modellerin oluşturulmasında Solidworks (SW) parametrik katı modelleme yazılımı, ısı analizler için ticari bir sonlu elemanlar yöntemi yazılımı olan Solidworks Simulation kullanılmıştır. FEA'de kullanılan tüm katı modeller orijinal geometrilerine uygun olarak SW katı modelleme yazılımı kullanılarak hazırlanmıştır ve montaj modülünde bir araya getirilmiştir. Katı model montajında kullanılan malzemelerin fiziksel özellikleri Çizelge 3.2'de verilmiştir.

Çizelge 3.2. Modellemede kullanılan malzemeler ve fiziksel özellikleri

Parça	Malzeme	Et kalınlığı (mm)	Isıl genişleme katsayısı (ppm.°C ⁻¹)	Isı iletim katsayısı (Wm ⁻¹ °C ⁻¹)	Young Modülü (MPa)	Poission oranı
Gövde	FR4	0.6	23.4	4	70 000	0.300
Soğutma kanatçıkları	Al	0.4	23.0	137	710 000	0.330
DIE plakaları	Cu	0.0508	17.0	401	110 000	0.340
	AIN	0.15	4.5	381	330 000	0.240
TIM	TIM	0.02	10.0	3	344 000	0.290
	GaN	0.0016	5.6	130	200 000	0.400
Kırmık katmanları	Au	0.004	14.0	301	790 000	0.440
	Si	0.15	2.6	127	130 000	0.064
	Au-20Sn	0.02	16.0	57	790 000	0.440
Silikon			220.0	0.22	1 000	0.499

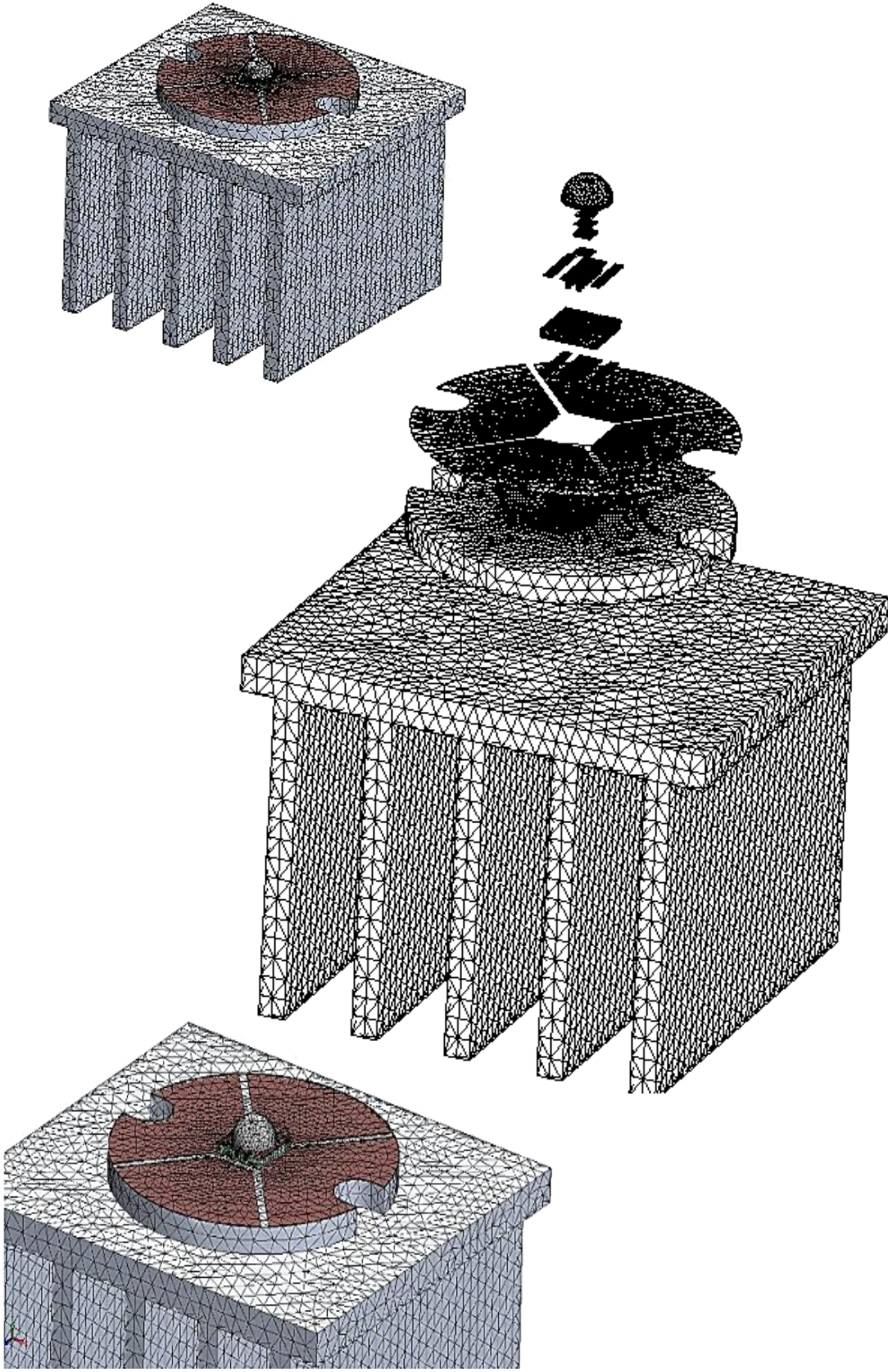
Tüm ısı analizler zamandan bağımsız olarak kurulmuş ve lineer isotropik malzeme modeli kabulleri yapılarak gerçekleştirilmiştir. Çalışmada ısı kaynağı olarak 1 W gücünde LED tanımlanmış olup, FEA işleminde 20°C sıcaklıktaki gerçek çalışma koşulları referans alınmıştır. Analizlerde birbiriyle fiziksel temasta olan parçalar arasında

ısı iletimi tanımlanırken, hava ile temasta olan model yüzeyleri için ısı taşınımı ile ısı geçişi tanımlanmıştır. Işınım ile olan ısı geçişinin etkisi önemsiz derecede düşük olduğundan ihmal edilmiştir. FEA’lerde tanımlanan sınır koşullarına ait değerler Çizelge 3.3’de verilmiştir.

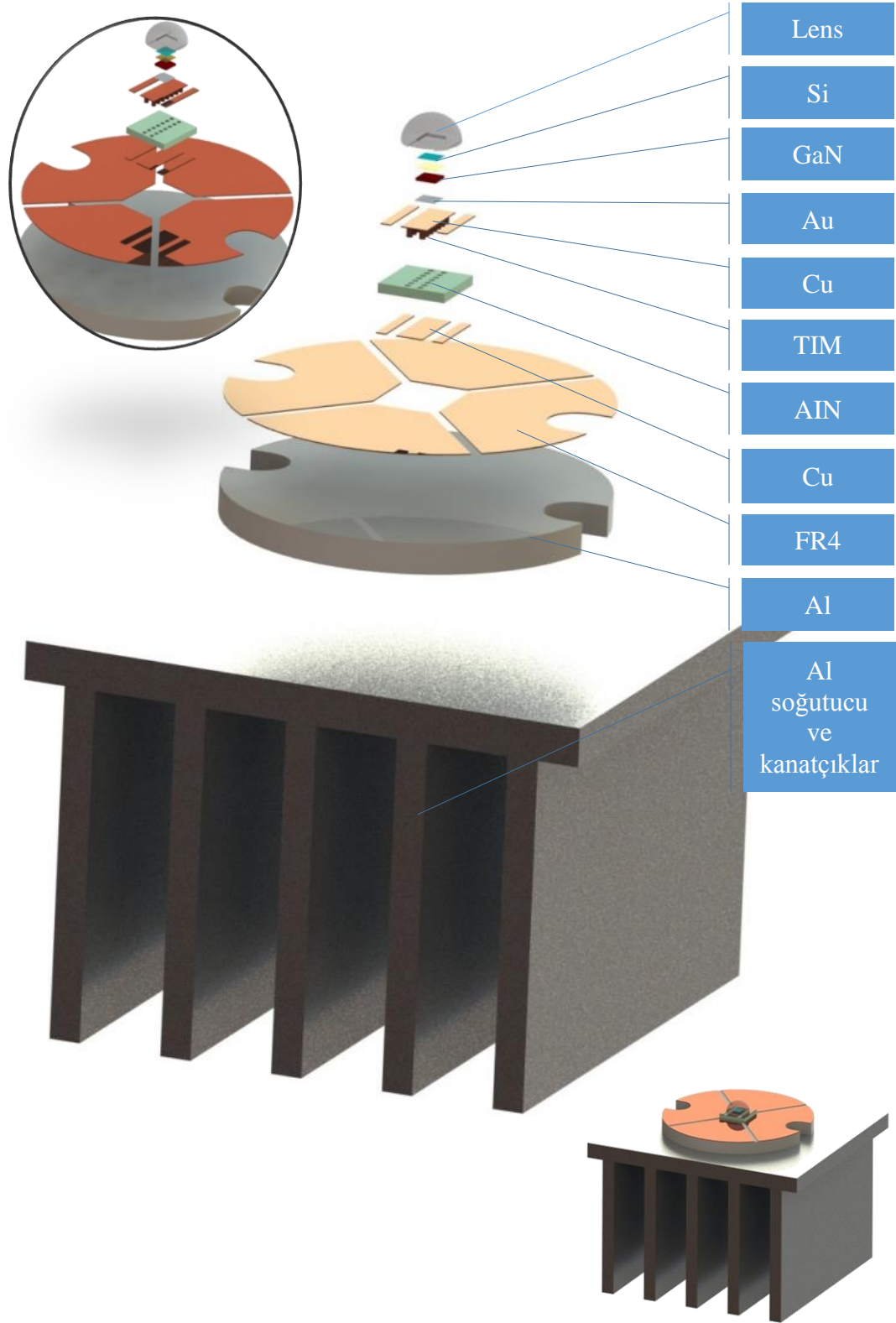
Çizelge 3.3. Isıl analiz için kullanılan sınır koşul değerleri

Sınır koşulu	Fiziksel özellik	Değer
Isı üretimi	Isı üretimi	1 W
Isı taşınımı	Isı taşınım katsayısı	5 W.°C ⁻¹ .m ⁻¹
Ortam sıcaklığı	Sıcaklık	20°C

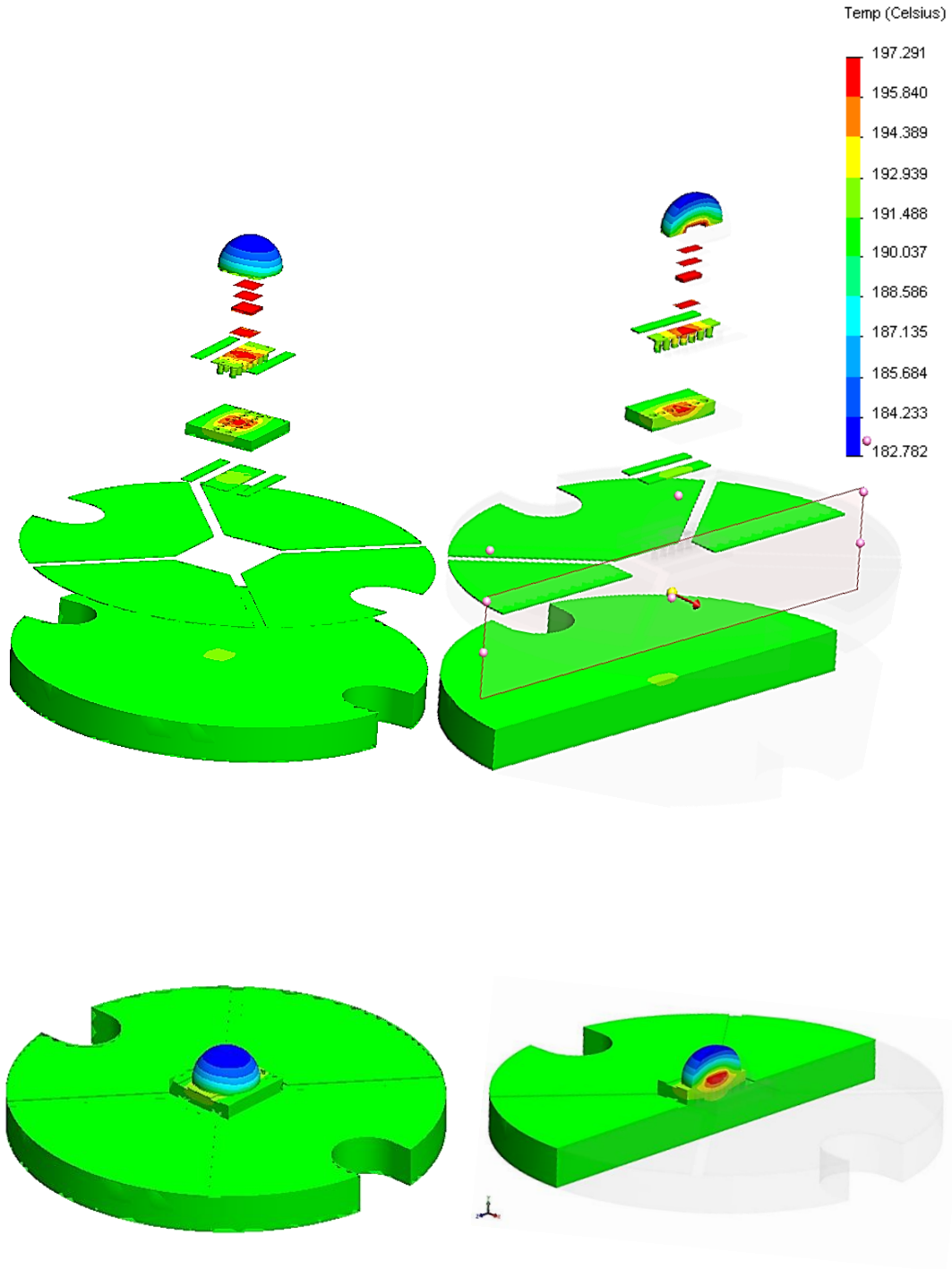
Bilgisayar ortamında gerçekleştirilen ısıl analizlerdeki sonlu eleman (*FE: Finite Element*) modelleri, benzetim (SW-Simulation) ve elemanlara ayırma (Meshing) fonksiyonları kullanılarak oluşturulmuştur. Kurulan FEA için eğrilik tabanlı elemanlara ayırma yaklaşımı tanımlanmıştır. Elemanlara ayırma işleminde, 10 adet düğüm noktasına (nod) sahip, ikinci dereceden (Yüksek derece kalite) parabolik katı tetrahedral eleman tipi kullanılmıştır (Şekil 3.11) Minimum eleman boyutu 0.2 mm olarak atanmıştır. İşlem sonrasında tüm modelde 126 062 adet düğüm noktası ve 79 635 adet eleman sayısı elde edilmiştir. Elemanlara ayırma işleminin ardından çözüm işlemi gerçekleştirilmiş ve tanımlanan çalışma koşullarında tüm model üzerinde ortaya çıkan sıcaklık dağılımları elde edilmiştir. Buna göre hazırlanan katı model Şekil 3.12’de görülmektedir. Şekil 3.13’te ise, harici soğutucu kullanılmadan (LED yalnız yıldız tip soğutucuya bağlı iken) ve Şekil 3.14 yıldız tip soğutucu ile birlikte harici soğutucu da bağlıyken elde edilen analiz sonuçları gösterilmektedir. Tüm analizlerde CREE firmasına ait 1 W XLamp XP- C LED esas alınmıştır.



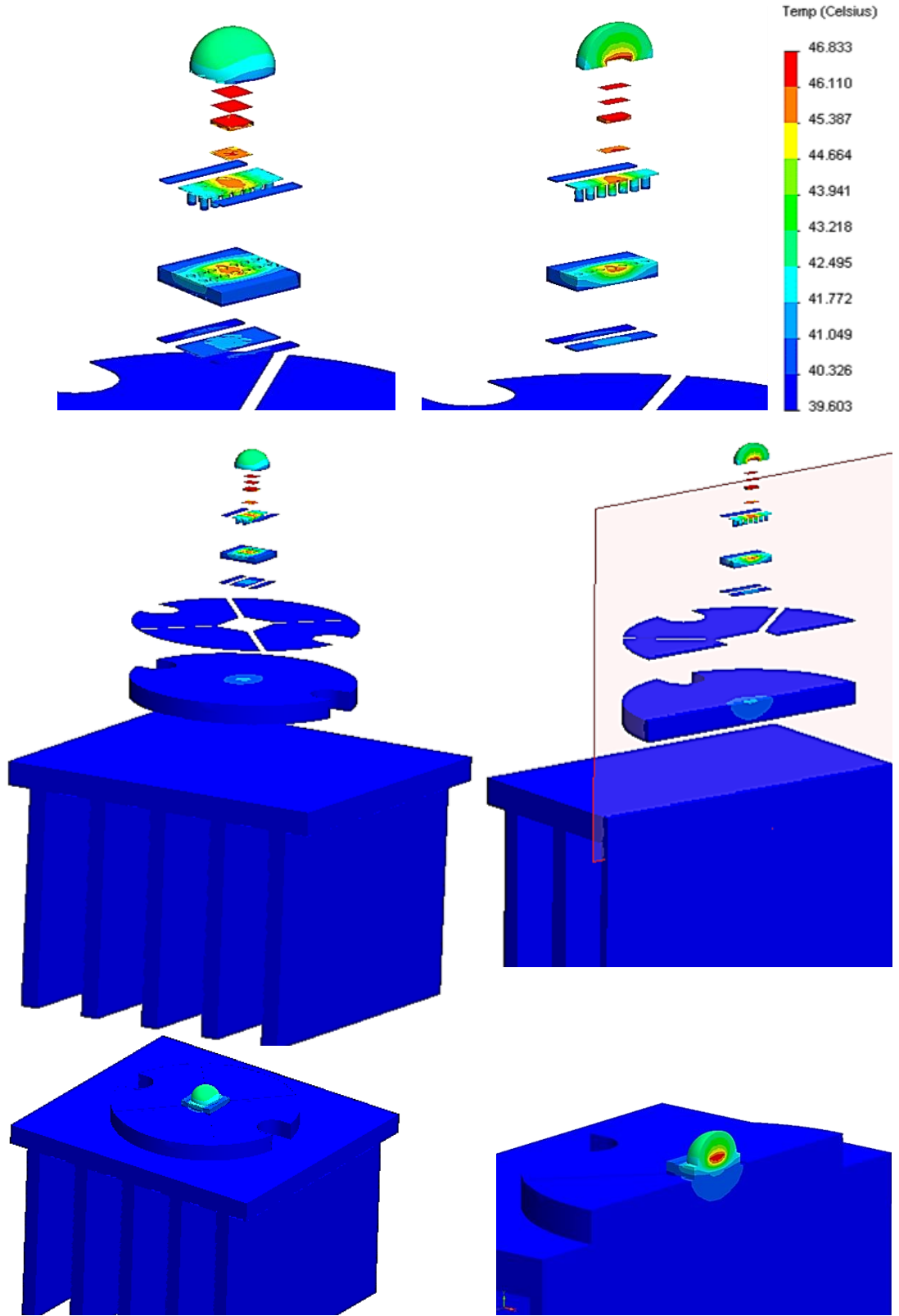
Şekil 3.11. Kurulan FEA için eğrilik tabanlı elemanlara ayırma (meshing) yaklaşımı



Şekil 3.12. Isıl analiz için hazırlanan LED ve harici soğutucu katı modeli



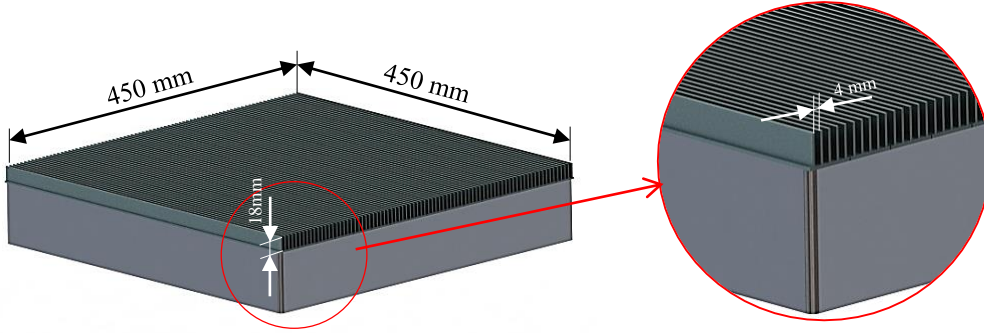
Şekil 3.13. Harici soğutucu kullanılmadan yapılan ısı analizler



Şekil 3.14. Soğutucu kullanılarak yapılan ısıl analizler

Şekil 3.14’de verilen şekillere göre, ısının büyük bölümü AlN tabakası ve alüminyum soğutma kanalı yönünde atılmaktadır. Tanımlanan analiz şartlarına göre model LED ve soğutucu üzerindeki ısı dağılımı ile ısı akışının, homojen bir yapıyla dağılım gösterdiği ve kırmıktan alüminyum soğutma kanalına doğru yöneldiği görülmüştür. Analizde görülen AlN tabakası ile alüminyum kanatçıklar arasındaki sıcaklık farkı, TIM katmanının ısı iletim katsayısının düşük olmasından kaynaklanmaktadır.

Çalışmada kullanılan tüm LED’ler üretici firma tarafından yıldız tipi soğutucuya montajlı şekilde imal edilmiştir. Dahili olan bu soğutucu ile yapılan bilgisayar analizleri sonucunda LED yongası üzerindeki sıcaklık değerinin 197°C’nin üzerine çıktığı görülmüştür. En düşük sıcaklık ise yaklaşık 183°C olarak bulunmuştur. Bu durum, dahili yıldız tipi soğutucunun yeterli olmayacağını gösterdiğinden bu sıcaklığın güvenli çalışma değerlerine düşürülmesi için ilave olarak harici bir soğutucunun kullanılması gerekliliğini ortaya koymuştur. Şekil 3.15 LED lamba için kullanılan harici soğutucu ve lamba üzerindeki yerleşimini göstermektedir.



Şekil 3.15. Harici soğutucu ve LED lamba üzerindeki yerleşimi

Analiz sonuçlarına göre, LED harici soğutucu üzerine yerleştirildiğinde en yüksek sıcaklık yaklaşık 47°C’ye, en düşük sıcaklık ise 39.6°C’ye düşmüştür. Bu sıcaklık değerleri genelde üreticiler tarafından önerilen 30 000 saat ömür için 85°C değerinin çok altındadır. Tasarımda kullanılan alüminyum soğutucu kanallarının boyutlandırılmasının ve yapısal şeklinin bu değerlerin elde edilmesinde etkisi görülmektedir.

3.3. Elektronik Tasarım

3.3.1. LED dizilerinin oluşturulması

LED lamba, farklı dalga boylarında ışık veren dört adet LED grubundan oluşmaktadır. Bu LED grupları şunlardır:

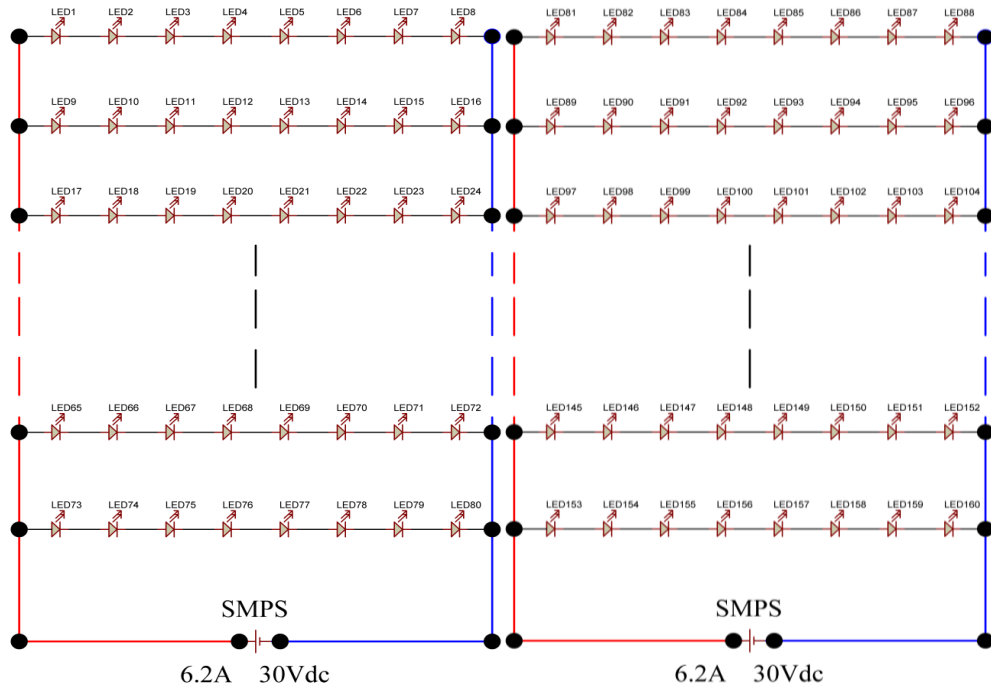
- 400–700 nm, 6500 K (soğuk beyaz),
- 620–630 nm (kırmızı),
- 465–485 nm (mavi),
- 390–410 nm (morötesi, UV-A bölgesi)

Her LED grubu seri ve paralel bağlı LED dizilerinden oluşturulmuş ve her grup için güç, gerilim ve akım ihtiyaçları hesaplanarak uygun güç kaynakları (LED sürücüsü)

belirlenmiştir. LED sürücüsü olarak 185 W, 30 V_{dc} ve 6.2 A anahtarlamalı ve sabit akım çıkışlı Mean Well HLG-185-30 güç kaynağı tercih edilmiştir. LED gruplarının elektronik devre çizimleri bilgisayar ortamında PROTEUS 7.1 devre çizim ve benzetim yazılımında hazırlanmıştır.

3.3.1.1. Soğuk beyaz (400-700 nm, 6500 K) LED grubu

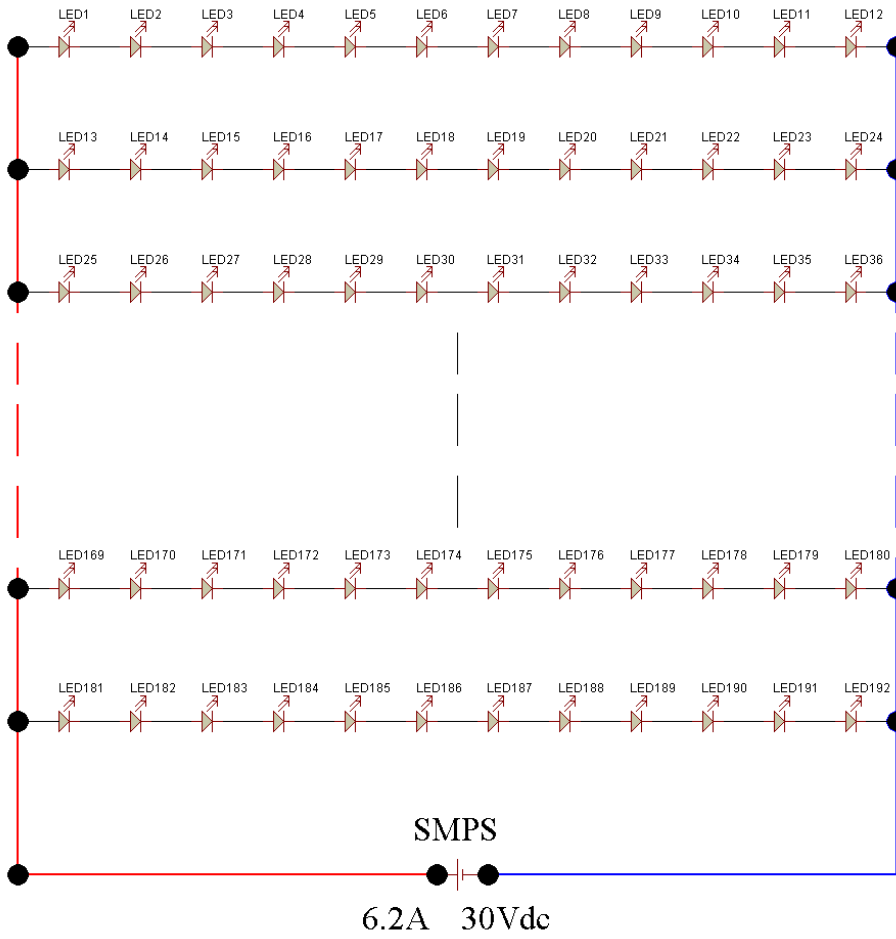
Lamba içerisindeki soğuk beyaz LED sayısı toplam 160 adettir. LED sayısı, mevcut sürücü için fazla olduğundan iki sürücü kullanılmıştır. Bu nedenle her birinde 80 adet LED bulunan iki LED grubu hazırlanmıştır. Bir grupta 10 paralel kol ve bir paralel kolda seri bağlı toplam 8 LED bulunmaktadır. LED başına düşen besleme gerilimi 3.4 V_{dc}, çekilen akım 350 mA ve güç 1 W olmak üzere iki grup için toplam besleme gerilimi 54.4 V_{dc} ve çekilen akım 7 A'dır. LED devre şeması Şekil 3.16'da verilmiştir.



Şekil 3.16. Soğuk beyaz (400-700nm, 6500 K) LED grubu bağlantı şeması

3.3.1.2. Kırmızı (620-630 nm) LED grubu

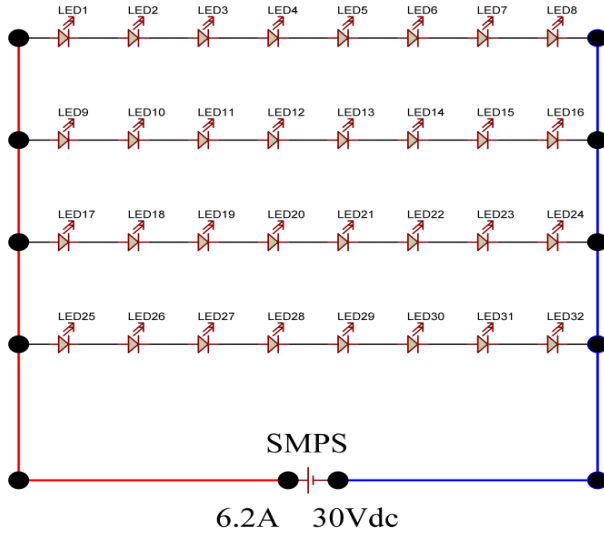
Lamba içerisinde kullanılan kırmızı dalga boylu (620–630 nm) LED sayısı toplam 192 adettir. LED grubunda 16 paralel kol ve bir paralel kolda seri bağlı toplam 12 LED bulunmaktadır (Şekil 3.17). LED başına düşen besleme gerilimi 2.2 V_{dc}, çekilen akım 350 mA ve güç 1 W olmak üzere toplam besleme gerilimi 26.4 V_{dc} ve çekilen akım 5.6 A'dır. LED devre şeması Şekil 3.17'de verilmiştir.



Şekil 3.17. Kırmızı (620-630 nm) LED grubu bağlantı şeması

3.3.1.3. Mavi (465-485 nm) LED grubu

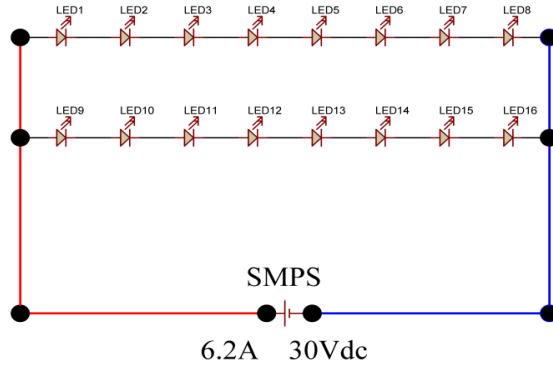
Lamba içerisinde kullanılan mavi dalga boylu (465-485 nm) LED sayısı toplam 32 adettir. LED grubunda 4 paralel kol ve bir paralel kolda seri bağlı toplam 8 LED bulunmaktadır (Şekil 3.18). LED başına düşen besleme gerilimi $3.4 V_{dc}$, çekilen akım 350 mA ve güç 1 W olmak üzere toplam besleme gerilimi $27.2 V_{dc}$ ve çekilen akım 1.4 A'dır. LED devre şeması Şekil 3.18'de verilmiştir.



Şekil 3.18. Mavi (465-485 nm) LED grubu bağlantı şeması

3.3.1.4. Morötesi, UV-A (390–410 nm) LED grubu

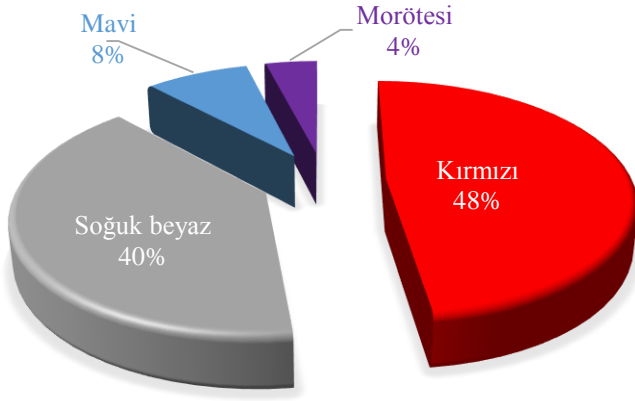
Lamba içerisinde kullanılan UV-A dalga boylu (390–410 nm) LED sayısı toplam 16 adettir. LED grubunda 2 paralel kol ve bir paralel kolda seri bağlı toplam 8 LED bulunmaktadır (Şekil 3.19). LED başına düşen besleme gerilimi 4 V_{dc}, çekilen akım 700 mA ve güç 3 W olmak üzere toplam besleme gerilimi 8 V_{dc} ve çekilen akım 5,6 A'dır. LED devre şeması Şekil 3.19'de verilmiştir.



Şekil 3.19. Morötesi (UV-A bölgesi, 390–410 nm) LED grubu bağlantı şeması

3.3.1.5. LED gruplarının lamba içerisindeki yerleşim düzeni

Lamba içerisinde gün ışığı, kırmızı, mavi ve UV-A dalga boylarında ışık veren toplam 400 adet (20x20) LED birarada bulunmakta ve LED gruplarının kontrolü birbirinden bağımsız olarak yapılabilmektedir. Lambada kullanılan LED'lerin sayıca oranları Şekil 3.20'de ve yerleşim düzeni (K: kırmızı, M: mavi, B: soğuk beyaz, U: morötesi) Şekil 3.21'de verilmiştir.

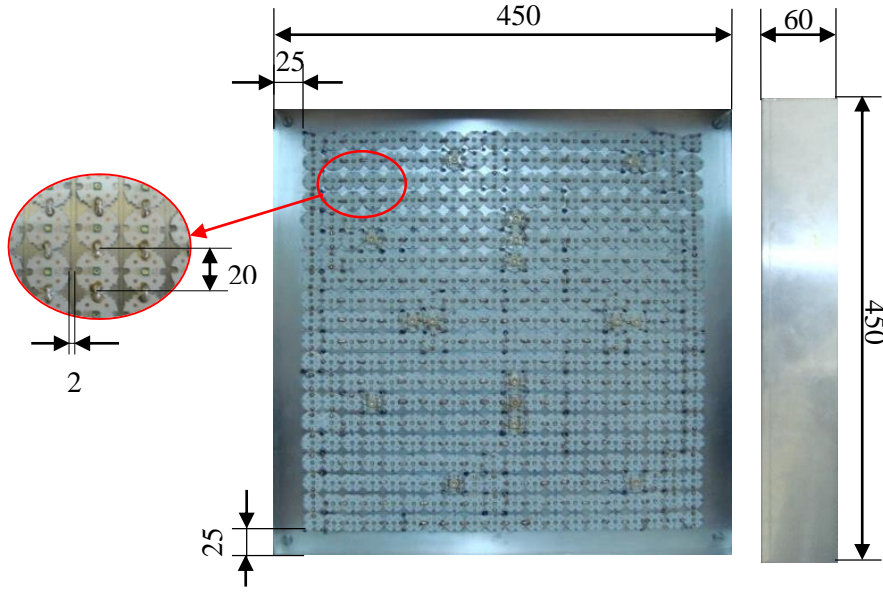


Şekil 3.20. Lambada kullanılan LED'lerin sayıca yüzdelik oranları

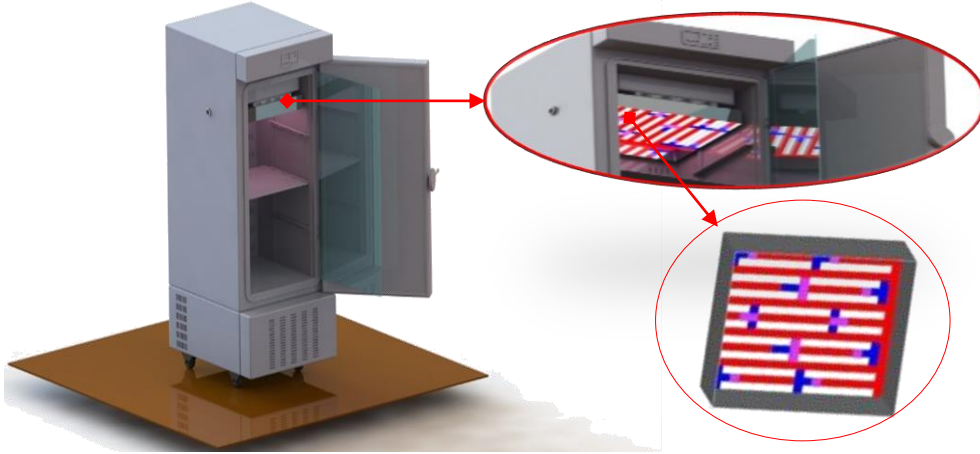
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
1	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K
2	K	B	K	B	K	M	M	M	K	B	K	B	K	M	M	M	K	B	K	B
3	K	B	K	B	K	B	M	B	K	B	K	B	K	B	M	B	K	B	K	B
4	K	B	K	B	K	B	U	B	K	B	K	B	K	B	U	B	K	B	K	B
5	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B
6	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	U	B	K	B	K	B	K	B	K	B
7	K	B	K	B	K	B	K	B	K	M	U	M	K	B	K	B	K	B	K	B
8	K	B	U	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	U	B
9	K	B	M	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	M	B
10	K	M	M	M	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	M	M	M
11	K	B	K	B	K	U	U	U	K	B	K	B	K	U	U	U	K	B	K	B
12	K	B	K	B	K	B	M	B	K	B	K	B	K	B	M	B	K	B	K	B
13	K	B	K	B	K	B	M	B	K	B	K	B	K	B	M	B	K	B	K	B
14	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B
15	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B
16	K	B	K	B	K	B	K	B	K	M	U	M	K	B	K	B	K	B	K	B
17	K	B	U	B	K	B	K	B	K	B	U	B	K	B	K	B	K	B	U	B
18	K	B	M	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	M	B
19	K	M	M	M	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	B	K	M	M	M
20	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K	K

Şekil 3.21. LED yerleşim düzeni

LED lambadan elde edilen ışığın bitki üzerindeki dağılımının homojen olmasına özen gösterilmiştir. Bu amaçla Şekil 3.21'de verilen son LED düzeni belirlenmeden önce laboratuvar ortamında pek çok LED dizilimi üzerinde çalışılmış ve yatay düzlem üzerindeki ışık dağılımları incelenmiştir. Karar verilen LED düzeni belirlendikten sonra LED'ler 450x450 mm² boyutlarındaki alüminyumdan üretilmiş özel bir kasa içerisine yerleştirilmiş ve elektriksel bağlantılar yapılarak LED lamba oluşturulmuştur (Şekil 3.22). Oluşturulan LED lamba denemeler için bitki yetiştirme kabini içerisine yerleştirilmiştir (Şekil 3.23).



Şekil 3.22. LED lamba ve ölçüleri

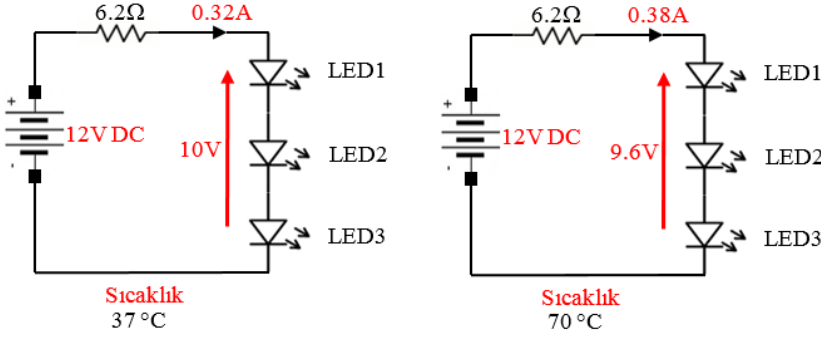


Şekil 3.23. Bitki yetiştirme kabini ve LED lambanın yerleşimi

3.3.2. LED gruplarının sürülmesi ve PWM yöntemi

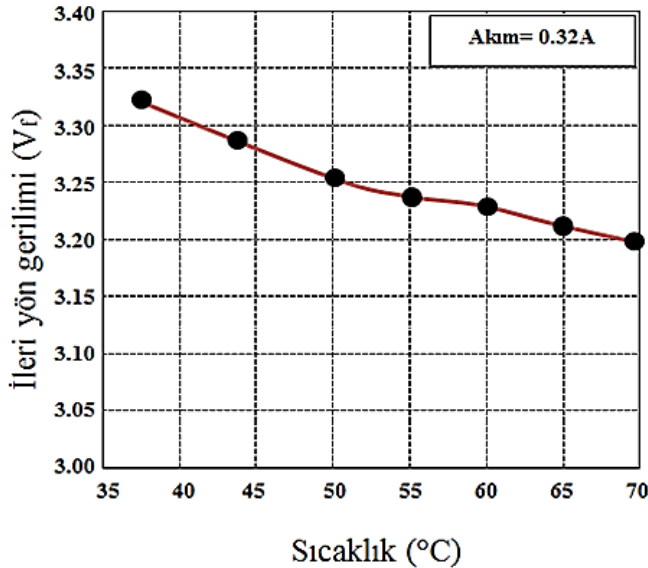
LED'lerin beslemesinde, sabit gerilimli (*CV: Constant Voltage*) ve sabit akımlı (*CC: Constant Current*) LED sürücüler (LED driver) olmak üzere temelde iki farklı tip güç kaynağı kullanılmaktadır. Düşük güçlü ve standart olarak bilinen 3 ve 5 mm çaplı LED'ler genelde 20 mA gibi düşük akımla çalıştılarından, bu LED'lerin beslemesinde uygun diyot ve dirençler bağlanarak sabit gerilimli güç kaynakları kullanılabilir. Fakat yüksek güçlü LED'lerin (High Power LED) beslemesi için sabit gerilimli güç kaynakları uygun değildir. Bu tür LED'ler için sabit akımlı özel üretilmiş güç kaynakları kullanılmalıdır. Öte yandan yüksek güçlü LED'lerin çalışma akımı, düşük güçlü LED'lere göre daha yüksek olduğundan önemli ölçüde ısınırlar. Isının yükselmesiyle LED üzerinde oluşan yüksek sıcaklık eğer belli aralıklarda tutulamazsa LED'ler sağlıklı

çalışamaz ve hatta zarar görmeleri kaçınılmaz olabilir. Sıcaklığın olumsuz etkisi, özellikle iyi tasarlanmamış devrelerde kendini hemen gösterir. Şekil 3.24’de görülen basit test devresiyle bu durum özetlenmiştir. 12 V’luk sabit bir gerilim kaynağı ile beslenen devrede, ileri yön gerilimi 3.32 V olan 1 W gücünde seri bağlı üç adet LED ve akımı sınırlamak için de 6.2 Ω direnç bulunmaktadır.



Şekil 3.24. Sabit gerilim beslemeli LED’lerde sıcaklık-akım ilişkisi

Devreye ilk enerji verildiğinde LED’lerden 0.32 A akım geçmektedir. LED’ler ışık yaymaya başladığında gövde sıcaklıkları 37°C olarak ölçülmüştür. Fakat zaman geçtikçe LED’lerin sıcaklığının arttığı ve ileri yön gerilimlerinin düştüğü gözlenmiştir. Bu durumda Ohm Yasası gereğince devreden geçen akım da artmaktadır. Bu devrede, sıcaklık 70°C’ye ulaştığında LED akımı 0.38 A düzeyine çıkmış ve ileri yön gerilimi 3.2 V seviyesine düşmüştür. Akımın bu şekilde artmaya devam etmesi, LED’in daha çok ısınmasına ve önlem alınmazsa LED’in zarar görmesine neden olacaktır (Erol 2008). Test sırasında belirli aralıklarla gövde sıcaklığı ve LED’in uçları arasındaki gerilim değerleri Şekil 3.25’deki grafikte verilmiştir.

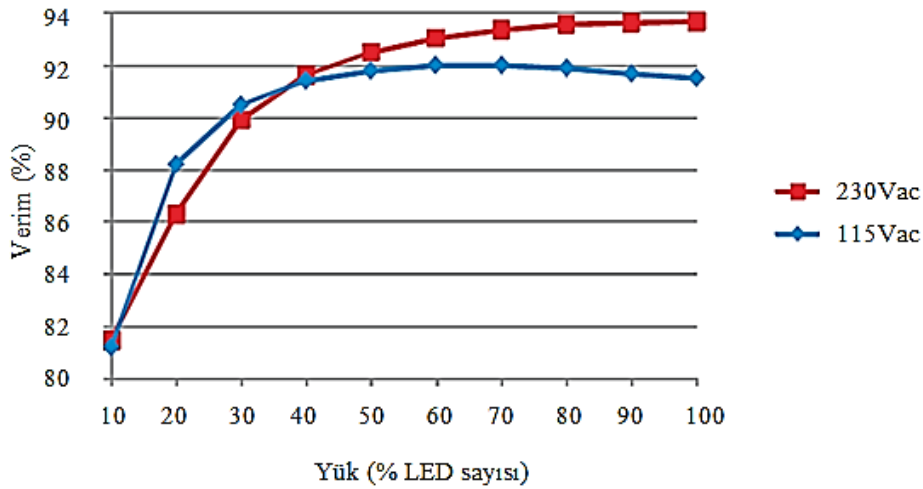


Şekil 3.25. Gövde sıcaklığının LED besleme uçları arasındaki gerilime etkisi

Yüksek güçlü LED'lerin sürülmesi sırasında bu tip sorunlarla karşılaşmamak için en güvenli ve verimli çözüm yolu, anahtarlamalı ve sabit akımlı sürücüler (*SMPS: Switch Mode Power Supply*) kullanmaktır. Bu tür LED sürücüler, sabit akım verme özelliği sayesinde giriş gerilimi değişse de çekilen akım değişmediği için LED'de sabit bir parlaklık elde edilir. Ayrıca bu durum LED'in daha uzun ömürlü olmasını da sağlar.

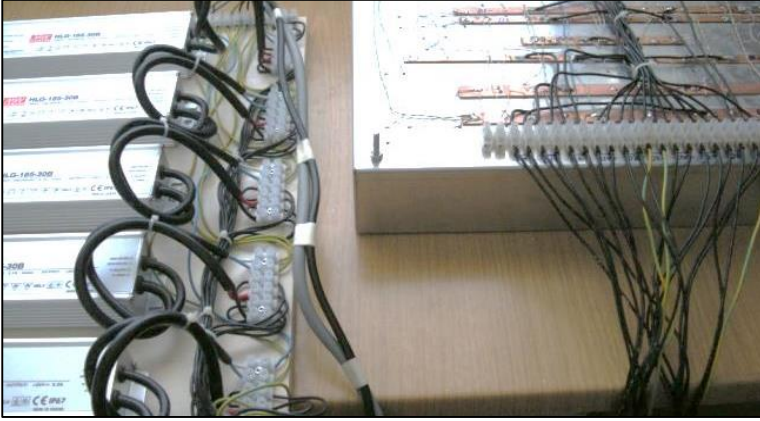
Akım sınırlamalı LED sürücülerini tasarım kolaylığı sağlamak için 350, 700, 1050, 1400 ve 1750 mA gibi çeşitli akımlarda üretilmektedirler. Genellikle, 1 W gücündeki LED'ler için 350 mA sürücüler kullanılırken, 3 W'lık LED'ler için 700 mA sürücüler kullanılmaktadır. LED'lerin birbiriyle seri ve paralel bağlantı durumlarına göre kurulan LED devresini beslemek için akım ve gerilim hesaplaması yapılarak daha yüksek akım verebilen uygun sürücüler bağlanabilir.

Günümüzde üretilen sabit akımlı SMPS LED sürücülerinin verimi, çıkış güçlerine ve elektronik devre tasarımlarındaki kaliteye bağlı olarak %70-95 arasında değişmektedir. Bir SMPS LED sürücüsünden yüksek verim alınabilmesi için sürücü çalışma noktası, sürücünün vermesi gereken (nominal) güç değerine yakın olmalıdır. Şekil 3.26'da, 230 ve 115 V_{ac} giriş gerilimlerinde kullanılan sürücünün tipik yük-verim grafiği görülmektedir. Grafiğe göre, 230 V_{ac} giriş geriliminde sürücünün en yüksek elektriksel verim değeri %94'tür. Bu verim değerinin etkin şekilde sürdürülebilmesi için üretici firma tarafından sürücüdenden tam yükte çekilen akım ve gerilimin sınır değerinin $\pm\%10$ toleransını (27-33 V_{dc}) aşmaması önerilmektedir.



Şekil 3.26. LED sürücüsüne (Mean Well HLG-185-30) ait yük-verim eğrisi (Mean Well Inc. 2012)

Şekil 3.27, çalışma kapsamında kullanılan ve 6.2 A sabit akım verebilen, 186 W gücündeki anahtarlamalı güç kaynaklarını ve bağlantılarını göstermektedir. Sürücülere ait teknik özellikler Çizelge 3.4'de verilmiştir.



Şekil 3.27. Sürücüler ve LED grupları arasındaki bağlantılar

Çizelge 3.4. LED sürücüsüne (Mean Well HLG-185-30) ait teknik özellikler (Mean Well Inc. 2012)

	Teknik özellik	Değer
Çıkış özellikleri	Gerilim	30 V _{dc}
	Anma akımı	6.2 A
	Anma gücü	186 W
	Elektriksel dalgalanma	200 mV _{p-p}
	Gerilim ayar aralığı	27 ~ 33 V _{dc}
	Akım ayar aralığı	3.1 ~ 6.2 A
Giriş özellikleri	Çalışma gerilim aralığı	90 ~ 264 V _{ac} ve 127 ~ 370 V _{dc}
	Çalışma frekans aralığı	47 ~ 63 Hz
	Güç faktörü (tam yükte)	PF>0.98/115V _{ac} , PF>0.95/230 V _{ac}
	Verim	%94 (230 V _{ac})
	Alternatif akım	0.8 A / 230 V _{ac}
	Kaçak akım	<0.75 mA / 240 V _{ac}
Koruma özellikleri	Aşırı akım	%95 ~ 108
	Aşırı gerilim	34 ~ 38 V _{dc}
	Aşırı sıcaklık	100°C ± 10°C
Çevresel özellikler	Çalışma sıcaklığı ve nemi	40 ~ 70 °C ve % 20 ~ 95

Grubu oluşturan seri-paralel bağlı LED dizilerinin ileri yön toplam gerilim (V_f) ve akım (I_f) değerleri dikkate alınarak, her LED grubu için ayrı olmak üzere 186 W gücünde 30 V_{dc}, 6.2 A verebilen SMPS sürücüler kullanılmıştır. LED gruplarının besleme istekleri hesaplanırken, teknik verilerde bildirilen sürücü çıkış geriliminin ortalama $\pm\%10$ aralığının (27-33 V_{dc}) aşılmamasına dikkat edilmiştir.

LED elektronik devre bağlantıları PROTEUS v7.1 devre çizim ve benzetim yazılımı ile hazırlanmış ve devre kurulmadan önce paralel kollardaki akım ve gerilim değerleri benzetim yoluyla gözlenmiştir. Akım ve gerilim değerlerinin istenilen düzeyin üstünde olduğu kollarda düzenlemeye gidilmiştir. Oluşturulan her LED grubu için, LED sayısına, seri ve paralel bağlantı düzenlerine göre grubun ileri yön toplam besleme

gerilimi (V_f) ve akımı (I_f) gereksinimleri aşağıda verilen eşitlikler kullanılarak belirlenmiştir.

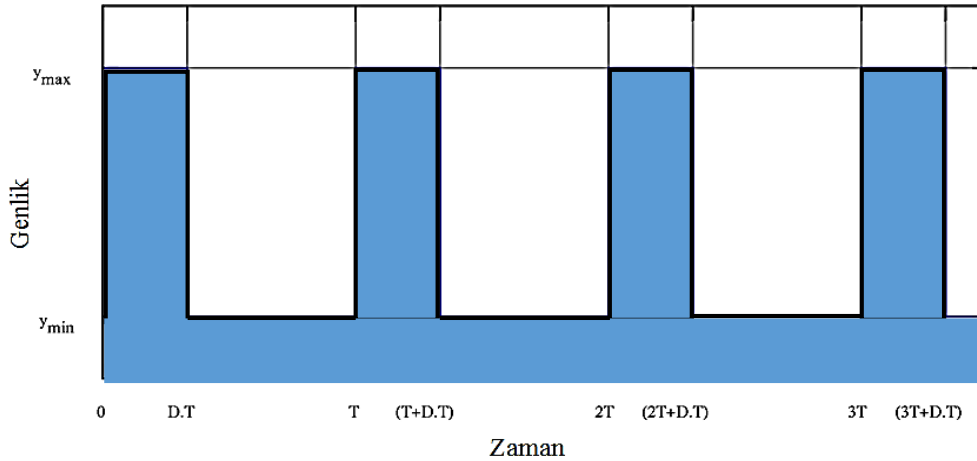
$$V_f = V_{LED} \cdot L_s \quad (3.9)$$

$$I_f = I_{LED} \cdot L_p \quad (3.10)$$

Eşitliklerde, V_{LED} bir LED için gerekli doğru yön besleme gerilimini, I_{LED} bir LED için gerekli doğru yön besleme akımını, L_s bir LED dizisindeki seri bağlı LED sayısını ve L_p gruptaki paralel bağlı seri LED dizilerinin sayısını göstermektedir.

SMPS'lerin en önemli özelliklerinden biri de darbe genişlik modülasyon (*PWM: Pulse Width Modulation*) gerilim çıkışına sahip olmalarıdır. PWM, üretilecek olan darbelerin genişliklerini kontrol ederek, çıkışta üretmek istenen örneksel değerin veya işaretin elde edilmesi tekniğidir. PWM yöntemi kullanılarak çalışan SMPS'ler yüksek akım ve düşük gerilimli güç elde etmek için transformatörlerden çok daha etkin çalışmakta, transformatörlü sistemlere göre çok daha az yer kaplamaktadırlar.

PWM'de üretilen kare dalga darbe işaretlerinin genişliklerinin ortalaması, çıkışta üretilecek olan örneksel değerin elde edilmesinin yanısıra, LED'lerin aydınlık şiddeti seviyelerinin %0-100 arasında ve çok kısa kademelerde güvenle ve kolaylıkla ayarlanabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu işlem bilgisayar tarafından SMPS'e sayısal işaretler gönderilerek hassas şekilde ve ışıpta titremeler olmadan yapılabilmektedir. Bu nedenle PWM yöntemi LED'lerin ışık seviyesinin ayarlanabilmesi için kullanılan en etkin ve kullanışlı yöntemdir. Şekil 3.28'de PWM yönteminin kullanıldığı bir SMPS çıkış geriliminin dalga şekli görülmektedir.



Şekil 3.28. PWM yönteminin kullanıldığı bir SMPS çıkış geriliminin dalga şekli

Kare dalganın frekası $f(t)$, en düşük genlik değeri y_{min} , en yüksek genlik değeri y_{max} ve iş çevrim oranı (duty cycle) D iken, ortalama işaret;

$$\bar{y} = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (3.11)$$

$f(t)$ kare dalga olduğundan, $f(t)$, y_{max} için $0 < t < D.T$ ve y_{min} için $D.T < t < T$ değerlerini alabilir. Buradan şu eşitlikler elde edilir;

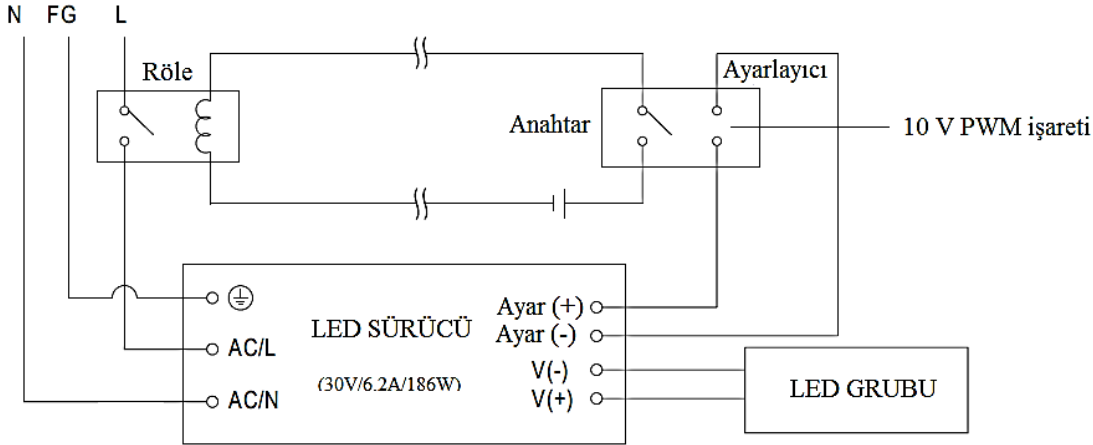
$$\bar{y} = \frac{1}{T} \left(\int_0^{DT} y_{max} dt + \int_{DT}^T y_{min} dt \right) \quad (3.12)$$

$$\bar{y} = \frac{D.T.y_{max} + (1-D)y_{min}}{D.y_{max} + (1-D)y_{min}} \quad (3.13)$$

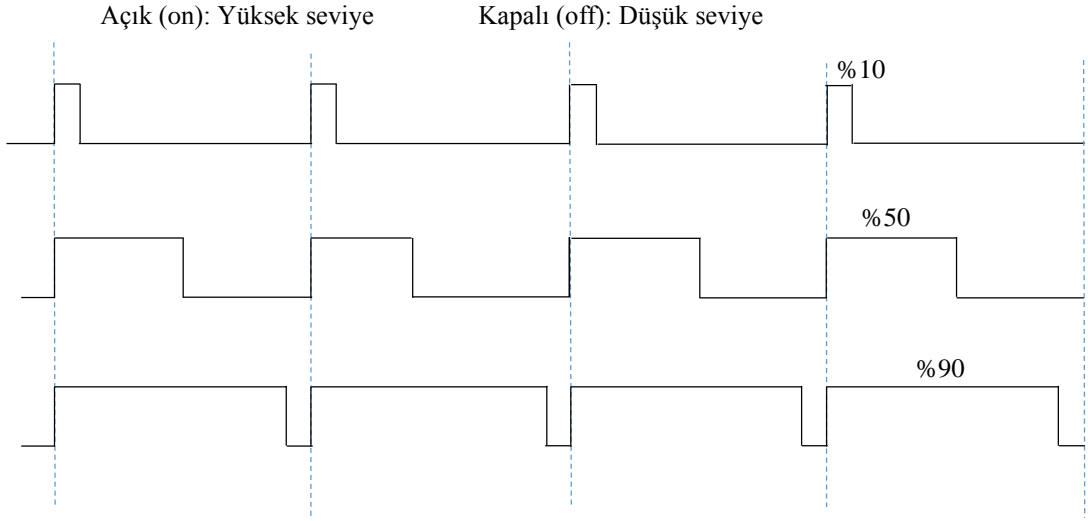
$$\bar{y} = D.y_{max} + (1-D)y_{min} \quad (3.14)$$

Verilen eşitlik genellikle $y_{min} = 0$ iken $\bar{y} = D.y_{max}$ olarak kullanılır. Görüldüğü gibi elde edilecek ortalama değer, doğrudan iş çevrim oranına bağlıdır (Huang vd 2011).

Aydınlatma otomasyon sistemindeki LED grupları, yazılım ile oluşturulan PWM sıklık ve işaret oranı ile ışık seviyesinin değiştirilmesi sağlanmıştır. Şekil 3.29'da bir LED grubunun ışık seviye ayarı kontrol blok şeması ve Şekil 3.30'da üretilen kare dalga şekli görülmektedir. Blok şemada görülen anahtar, PWM işaretine göre belirli oranlarla açılıp kapanarak kare dalgalar oluşturmaktadır. Bu kare dalgaların yüksek (on) ve düşük (off) seviyesindeki durumlarına göre çalışma süreleri ve ışık seviyesi değişmektedir.



Şekil 3.29. Işık seviyesi kontrol şeması (Mean Well Inc. 2012)



Şekil 3.30. Işık seviyesini belirleyen PWM oranları (Mean Well Inc. 2012)

Modellemede kullanılan anahtar görevini SMPS içerisindeki elektronik devre yerine getirmektedir. Bu devrenin kontrolü ise bilgisayar tarafından ve geliştirilen özel yazılım aracılığıyla sağlanmaktadır. Anahtarın açılma (on) ve kapanma (off) konumlarındaki durumu gösteren grafiklerden en üstte verilen, iş çevrim oranı %10, ortadaki %50, alttaki ise %90 için çizilmiştir. Bu oranlarla üretilen örnek ışık değerleri, %10 için 0.9 V, %50 için 4.5 V ve %90 için 8.1 V olacaktır. PWM iş çevrimine (duty cycle) göre anma akım oranları Çizelge 3.5’de verilmiştir. Buradaki anma akım oranları aynı zamanda ışık seviyesini vermektedir.

Çizelge 3.5. PWM iş çevrimine göre anma akım oranları ve ışık seviyeleri (Mean Well Inc. 2012)

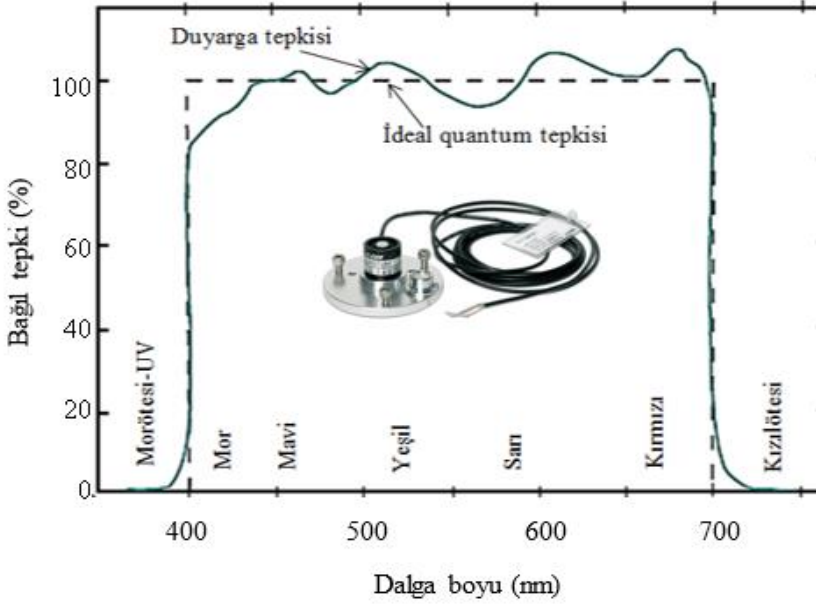
	İş çevrimi (duty cycle) (%)									
	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Anma akım oranları (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
Işık seviyesi (%)	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100

Yazılım tarafından üretilen PWM işaretinin sıklığı, lambadaki ışık seviyesinin titreşimsiz ve istenilen seviyede sabit kalabilmesi açısından önemlidir. Çok düşük bir sıklık ile üretilen darbe sinyalleri ve bunlarla kontrol edilen bir lambada, lambanın yanma ve sönme zamanları hissedilebilecektir. Bu durum ışığın şiddetinin değişikliğinden öte, titreme şeklinde görünecektir. Bunu engellemek için anahtarlama frekansı yüksek tutulmalıdır. Uygulamada, 100 Hz-3 kHz frekans aralığında çalışılmıştır.

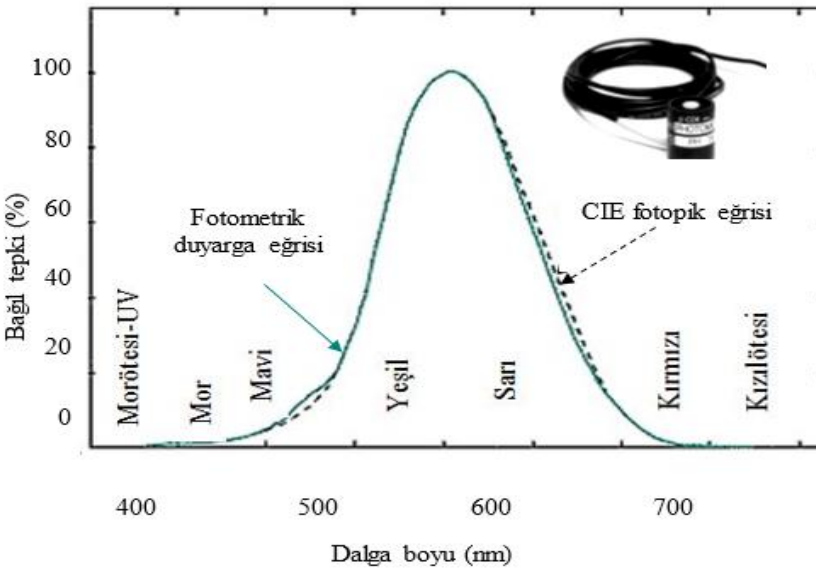
3.3.3. Sistem duyargaları

3.3.3.1. PAR ve fotometrik duyargalar

Sistemde LI-COR firması tarafından geliştirilen LI-190 PAR quantum ve LI- 210SA aydınlık şiddeti (fotometrik) ölçüm duyargaları kullanılmıştır. Duyargaların görünür bölgedeki tepki eğrileri Şekil 3.31 ve 3.32’de, teknik özellikleri ise Çizelge 3.6 ve 3.7’de verilmiştir.



Şekil 3.31. PAR quantum ölçüm duyargası ve görünür bölgedeki tepkisi (Licor Inc. 2012)



Şekil 3.32. Aydınlık şiddeti ölçüm duyargası ve görünür bölgedeki tepkisi (Licor Inc. 2012)

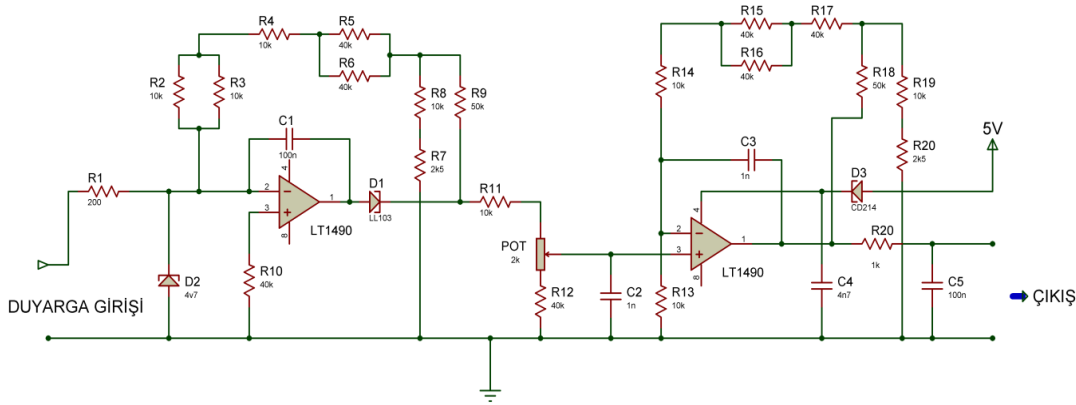
Çizelge 3.6. PAR quantum ölçüm duyargasına ait teknik özellikler (Licor Inc. 2012)

Özellik	Değer
Duyarga	Yüksek duyarlıklı silikon fotodiyot
Duyarlılık	5-10 $\mu\text{A} / 1000 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$
Kalibrasyon	$\pm\%5$, Amerikan Standart ve Teknoloji Kurumu (NIST)
Doğrusallık	Sapma 10 000 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ye kadar en fazla %1
Kararlılık	Değişim 1 yıldan daha uzun zaman için $\pm\%2$ 'den az
Tepki Süresi	10 μs
Sıcaklığa Bağlı Değişim	En fazla $\pm\%0.15 / ^\circ\text{C}$
Tayf Tepkisi	400-700nm
Kosinüs Düzeltmesi	80° geliş açısına kadar
Ölçüm Sınırları	0-2000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$
Çalışma Sıcaklık Aralığı	-40 – 65 $^\circ\text{C}$
Koruma Sınıfı	IP65
Boyut, Ağırlık	238 mm çap x 254 mm yükseklik, 28 g.

Çizelge 3.7. Aydınlık şiddeti ölçüm duyargasına ait teknik özellikler (Licor Inc. 2012)

Özellik	Değer
Duyarga	Yüksek duyarlıklı silikon fotovoltaik
Duyarlılık	30 $\mu\text{A} / 100 \text{klx}$
Kalibrasyon	$\pm\%5$, Amerikan Standart ve Teknoloji Kurumu (NIST)
Doğrusallık	Sapma 100 klx'e kadar en fazla %1
Kararlılık	Değişim 1 yıldan daha uzun zaman için $\pm\%2$ 'den az
Tepki Süresi	10 μs
Sıcaklığa Bağlı Değişim	En fazla $\pm\%0.15 / ^\circ\text{C}$
Tayf Tepkisi	400-700nm
Azimut Açısı Hatası	$< \pm\%1$
Kosinüs Düzeltmesi	80° geliş açısına kadar
Ölçüm Sınırları	0-100 klx
Duyarga Yuvası	Paslanmaz çelik gövde, akrilik yayıcı
Koruma Sınıfı	IP65
Boyut ve Ağırlık	238 mm çap x 254 mm yükseklik, 28 g.

Fakat duyargaların doğrudan veri toplama birimine bağlanması çıkış işaret seviyelerinin çok düşük olmasından dolayı mümkün değildir. Bu nedenle duyargalar uygun yükselteç düzeneklerine bağlanarak çıkış akım ve gerilim değerlerinin yükseltilmesi gerekmektedir. Bunun için işlemsel yükselteç (*op-amp: operational amplifier*) devreleri kullanılmaktadır. Bu amaçla gerçekleştirilen devre Şekil 3.33'de verilmiştir.



Şekil 3.33. PAR ve aydınlık şiddeti duyargaları için tasarlanan yükselteç devresi

Çalışma kapsamında geliştirilen elektronik devre, yüksek kazançlı işlemsel yükselteçlerden kurulu bir yükselteç devresi olup, PAR ve fotometrik duyargalarının her biri için iki ayrı devre kurulmuş ve kullanılmıştır. Gerçekleştirilen devrelerde, özellikle ışık ölçümlerinde kullanılan duyargalar için geliştirilmiş Rail-to-Rail hassas giriş ve çıkış özellikli, 20 mA yüksek çıkış akımı ve en fazla 500 mV offset değerine sahip LT1490 işlemsel yükselteci tercih edilmiştir.

Devre PROTEUS v7.1 elektronik devre çizim ve benzetim yazılımı kullanılarak bilgisayar ortamında çizilmiş, benzetim yöntemiyle devrenin çalışması incelenmiştir. Devre bir devre kurucu üzerinde denenmiş, elde edilen verilerin doğruluğunun sağlanması amacıyla da duyarga üreticisinin teknik verileri ve bazı eşitlikler yardımıyla devrenin kalibrasyonu yapılmıştır. Kalibrasyon, hem tasarlanan devre üzerinden hem de bilgisayar yazılımı içerisindeki yordamlar yardımıyla gerçekleştirilmiştir. Ayrıca güvenilir bir PAR ölçü cihazı ile de karşılaştırmalar yapılmıştır. Güvenli çalışma şartlarının sağlandığı görüldükten sonra elektronik devre elemanları önceden hazırlanan bakır yüzü plaka (*PCB: printed circuit board*) üzerine dizilerek lehimlenmiş ve devre son halini almıştır.

Kullanılan LI-190 PAR duyargası, $2000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ışık altında iken $14 \mu\text{A}$ çıkış vermektedir. Bu değer gerçekleştirilen işaret uygunlaştırıcı ve yükseltici devresi yardımıyla 1 V tam ölçekle eşdeğer duruma getirilmiştir. Başka bir ifadeyle, ışık kaynağından gelen $2000 \mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ PAR değeri, yükselteç devresi çıkışından 1 V olarak okunmaktadır. Duyarga için lambadan gelen PAR değerinin hesaplanmasında aşağıdaki eşitlik kullanılmıştır;

$$I_{\text{par}} = \frac{V_o S_d}{\mu} \quad (3.15)$$

Burada, I_{par} PAR değeri ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$), V_o yükselteç devresi çıkış gerilimi (V), S_d duyarga için üretici firma tarafından bildirilen kalibrasyon çarpanı ($\mu\text{mol} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1} \mu\text{A}^{-1}$) ve μ kazanç faktörü ($\text{V} \mu\text{A}^{-1}$) dür. Kazanç faktörü, her duyarga için ve yükselteç devresi çıkış gerilimine göre farklı olmaktadır. Çizelge 3.8'de üretici firmanın vermiş olduğu kazanç faktörü ($\text{V} \cdot \mu\text{A}^{-1}$) değerleri görülmektedir.

Çizelge 3.8. PAR ve fotometrik duyargalara ait tam ölçekteki kazanç faktörü (Licor Inc. 2012)

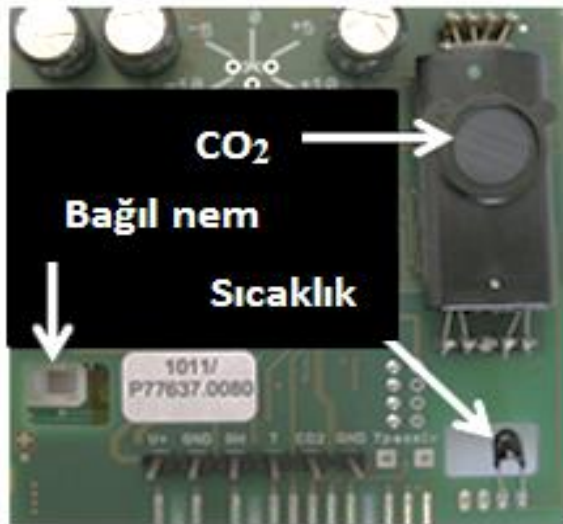
Duyarga	Tam ölçekte kazanç değerleri (μ), ($V \cdot \mu A^{-1}$)			
	1V	2V	5V	10V
LI-190 PAR Quantum	0.06	0.12	0.3	0.6
LI-210SA Fotometrik	0.02	0.04	0.1	0.2

PAR duyargası çıkış gerilim değeri tam ölçekte (0-1 V) ve yükseltici devreden alınan çıkış, $V_o = 0.836V$, kazanç faktörü $\mu = 0.06 V \cdot \mu A^{-1}$ (1 V tam ölçekte duyargadan $16.67 \mu A$ alınmaktadır) ve kalibrasyon çarpanı $S_d = 148.50 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1} \cdot \mu A^{-1}$ olduğu durumda PAR değeri (I_{par}) $2069.1 \mu mol \cdot m^{-2} \cdot s^{-1}$ olmaktadır.

3.3.3.2. Sıcaklık-bağıl nem-CO₂ ölçüm duyargaları

Sistemde sıcaklık, bağıl nem ve CO₂ verilerini almak için üç duyarganın bir PCB üzerinde bir araya getirilerek oluşturulmuş E+E Elektronik GmbH ait EE80 duyarga ve dönüştürücüsü (transmitter) kullanılmıştır. Duyargalardan alınan düşük seviyeli işaretlerin yükseltilmesi ve sayısal dönüşümü PCB kartı üzerinde bulunan bir gömülü sistem (embedded system) tarafından gerçekleştirilmektedir. Sistemde bu dönüştürücünün kullanılmasının nedenleri arasında ekonomik olması, çevresel üç ölçümün aynı anda yapılabilmesi ve elde edilen verilerin sorunsuz şekilde sayısal ortama aktarılmasını sağlaması sayılabilir.

Dönüştürücü 0-5 V, 0-10 V örneksel çıkışlar veya 4-20 mA akım döngüsü çıkışı sağlayabilmektedir. Gerçekleştirilen sistemde 0-10 V örneksel çıkışı kullanılmıştır. Dönüştürücü üzerinde bulunan duyargalar Şekil 3.34'de görülmektedir. Dönüştürücü teknik özellikleri ise Çizelge 3.9'da verilmiştir.



Şekil 3.34. Sıcaklık-bağıl nem-CO₂ duyargaları ve dönüştürücüsü (EE80) (E+E Elektronik GmbH 2012)

Çizelge 3.9. Sıcaklık-bağılı nem-CO₂ duyurga ve dönüştürücülerinin (EE80) teknik özellikleri (E+E Elektronik GmbH 2012)

Duyurga	Özellik	Değer
CO ₂	Ölçme ilkesi	Kızılötesi
	Çalışma aralığı	0-2000 / 5000ppm
	Doğruluk (25°C ve 1013 mbar'da)	0-2000 ppm: < ± (50 ppm +%2) 0-5000 ppm: < ± (50 ppm +%3)
	Tepki zamanı	< 195 s
	Sıcaklığa bağlı değişim	2 ppm CO ₂ .°C ⁻¹
	Kararlılık	20 ppm.yıl ⁻¹
Sıcaklık	Duyurga elemanı	Pt 100
	Çalışma aralığı	-20-60°C
	Doğruluk (20°C'de)	4-20 mA: ±0.7°C
Oransal nem	Ölçme ilkesi	Kapasitif
	Duyurga elemanı	HC103
	Çalışma aralığı	%10 – 90
	Doğruluk (20°C'de)	±%3 RH (%30-70 RH),
Çıkış Değerleri		
CO ₂	0-2000 / 5000ppm	0-5V / -1mA < IL < 1mA
Sıcaklık	0-50°C	0-10V / -1mA < IL < 1mA
Oransal Nem	0-%100 RH	4-20mA / RL < 500 Ω
Besleme Gerilimi		15-35V _{dc}

3.3.4. Veri toplama birimi

Ortamdaki duyargalardan gelen örneksel ve sayısal verilerin toplanması, bilgisayara gönderilmesi, bilgisayardan gelen komutlara göre de LED lambadaki LED gruplarının ışık kontrolünün sağlanması bir veri toplama birimi (*DAQ: Data Acquisition*) tarafından sağlanmaktadır. Sistemde kullanılan veri toplama birimi, National Instruments firmasına ait NI USB-6363 modülüdür (Şekil 3.35). Birime ait teknik özellikler Çizelge 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.35. Veri toplama birimi (NI USB-6363) (National Instruments Inc. 2012)

Çizelge 3.10. Veri toplama birimine (NI USB-6363) ait teknik özellikler (National Instruments Inc. 2012)

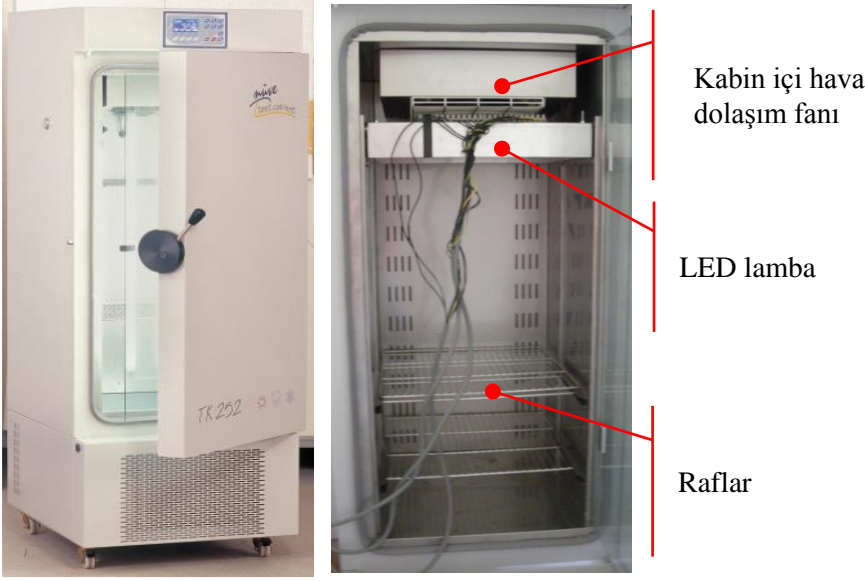
Özellik	Değer	
Örneksel Girişler	Kanal sayısı	32 adet
	Çözünürlük	16 bit
	Örnekleme hızı	2 MS/s (1 kanal) 1 MS/s (diğer kanallar)
	Giriş (DC)	$\pm 10, \pm 5, \pm 2, \pm 1, \pm 0.5, \pm 0.2, \pm 0.1$ V
Örneksel Çıktılar	Kanal sayısı	4 adet
	Çözünürlük	16 bit
	Tazeleme hızı	2.86 MS/s
	Çıkış (DC)	$\pm 10, \pm 5$ V
Sayısal Giriş ve Çıktılar	Kanallar	48 adet iki yönlü kanal
	Saat oranı (en yüksek)	10 MHz
	Seviye	TTL
	En yüksek giriş	0-5 V
	En yüksek çıkış	0-5 V
Sayıcılar/Zamanlayıcılar	Sayıcı sayısı	4 adet
	En yüksek	0-5 V
	En yüksek kaynak sıklığı	100 MHz
	Çözünürlük	32 bit (PWM için)
Bilgisayar Bağlantısı	USB 2.0	
Besleme Gerilimi ve Güç	30 V _{dc} , 30 W	

3.3.5. Bitki yetiştirme kabini

Çalışma kapsamında tam yapay iklim koşullarının elde edilebilmesi için Nüve firmasına ait TK252 model bitki yetiştirme kabini kullanılmıştır. Kabin, sıcaklık ve nem kontrolü yapabilme özelliğine sahiptir. Geliştirilen LED lamba, kabin içerisinde tavan bölümüne yerleştirilmiştir (Şekil 3.36). Bitki yetiştirme kabini ile ilgili teknik özellikler Çizelge 3.11’de verilmiştir.

Çizelge 3.11. Bitki yetiştirme kabinine (Nüve TK252) ait teknik özellikler (Nüve 2012)

Özellik	Değer
Kullanılır hacim	120 L
Sıcaklık çalışma aralığı	$(-10^{\circ}\text{C}) - 60^{\circ}\text{C} \pm 0.1$
Nem çalışma aralığı	$\%20 - 95 \pm \%1$
İç yüzey yapısı	Paslanmaz çelik
İç ölçüler (ExDxY)	475x540x985 mm
Hava dolaşımı	Fanlı kabin içi hava dolaşımı
Emniyet	Isıtma için ayarlanabilir emniyet termostadı
Güç ve besleme gerilimi	2000 W, 220 V _{ac} , 50 Hz



Şekil 3.36. Bitki yetiştirme kabini (Nüve TK252) ve kabin içine yerleştirilmiş LED lamba

3.4. Yazılım

3.4.1. LabVIEW programlama dili

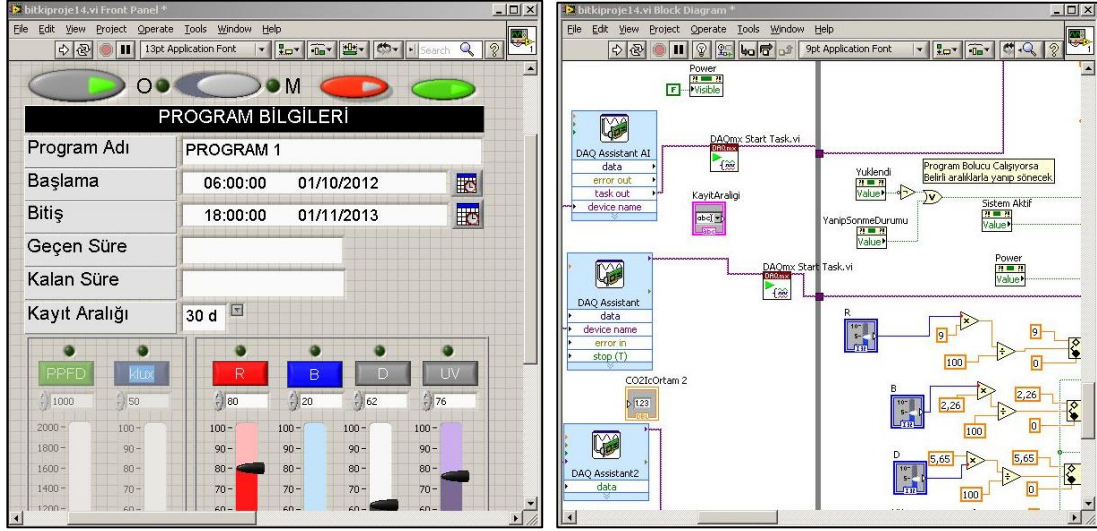
LabVIEW (*Laboratory Virtual Instrument Engineering Workbench*); 1977'den beri geliştirilmeye başlanmış yüksek performanslı bilimsel ve mühendislik uygulamalarında, ölçme ve otomasyon için tasarlanan G programlama dili tabanlı bir grafiksel program geliştirme ortamıdır. LabVIEW, test, ölçüm, cihaz kontrolü, veri işleme ve veri analizi süreçlerini gerçek zamanlı veya benzetim modelli olarak yapılmaya olanağı sunabilmektedir. LabVIEW programının temel yapıtaşı olan sanal araçlar (*VI: Virtual Instruments*) kullanılarak aktif kontrolün sağlandığı ön panel ve sistem için gerekli blok diyagramlar istenilen biçimde oluşturulabilmektedir.

LabVIEW ile performanstan ödün vermeden, karmaşıklığından ve zorluktan uzak güçlü bir programlama dilinin esnekliğini de sağlayarak, sanal ölçme araçlarını daha hızlı programlamak mümkündür. Bu sayede, test ve ölçümde, veri toplama ve kontrolünde, bilimsel araştırmalarda, işlem takibinde, otomasyona dayalı sistemlerde diğer grafiksel ortamlardan daha hızlı çözüm üretilebilmekte ve harcanan zaman kısalmaktadır. Bu durum, bilgisayar ve çevresel donanıma yapılan parasal yatırımın korunmasını sağladığı gibi, karmaşık geliştirme araçlarına gerek kalmadan geliştirme işlemlerinin daha kolay şekilde gerçekleştirilebilmesine olanak sağlamaktadır (National Instruments inc. 2012).

3.4.2. LabVIEW esasları

LabVIEW ile metin tabanlı programlama dillerinde olduğu gibi satırlar halinde kod yazmak yerine sanal araçlar oluşturulmakta ve bunlar belirli kurallara göre birbirleriyle ilişkilendirilmektedir. Böylece kullanıcının aktif kontrolünü sağladığı kullanıcı ön paneli kolaylıkla oluşturulabilmektedir. Ön paneldeki düğmelerin işlevlerini yerine getiren blok diyagramlar ise çözüme göre istenilen şekilde kolayca oluşturulabilmektedir.

Sanal araçlar (VI) için ön panele kontrol paletinden seçilen sayısal göstergeleri, ölçekleri, termometreleri, LED'leri, çizelgeleri, grafikleri yerleştirmek mümkündür. Hepsi tamamlandığında çalışan VI, bir anahtarı tıklayarak, bir sürgüyü oynatarak veya klavyeden bir değer girerek, ön panelden kontrol edilebilmektedir. LabVIEW programındaki ön panel ve blok diyagrama ait ekran görüntüleri Şekil 3.37.a ve b'de görülmektedir.



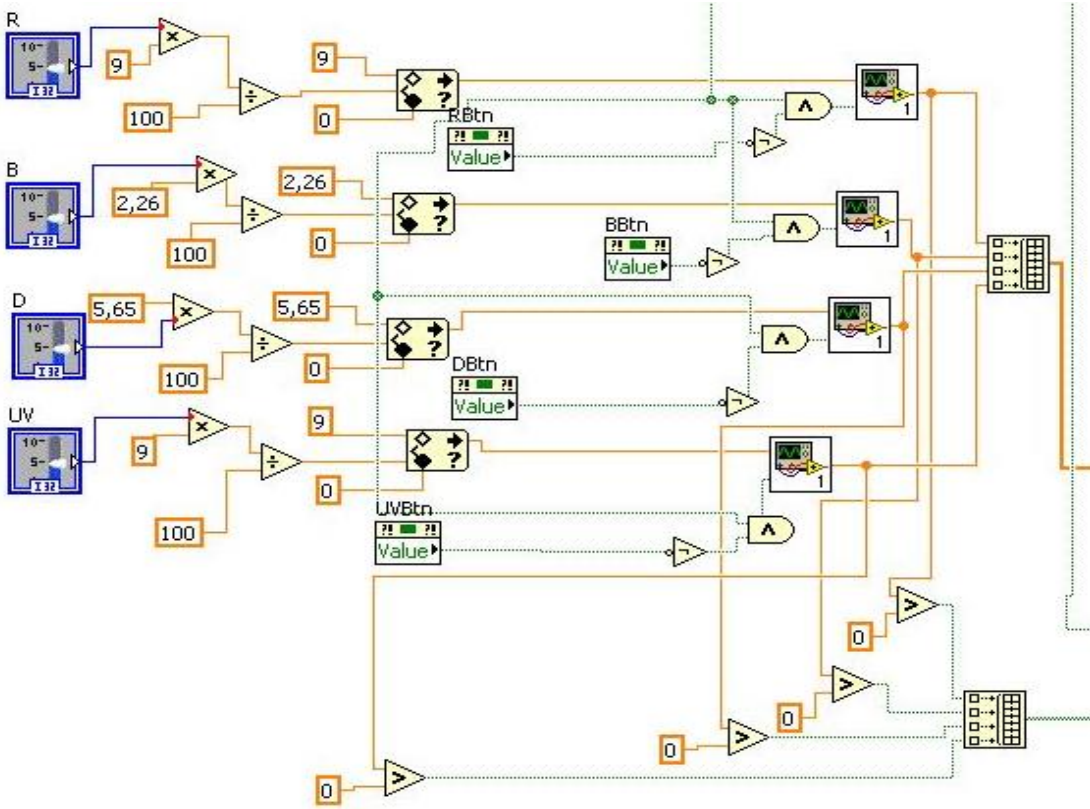
(a)

(b)

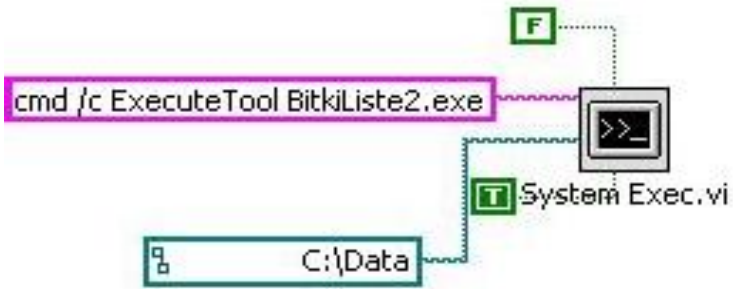
Şekil 3.37. a) Ön panel ve b) blok diyagram ekran görüntüleri

LabVIEW dilinde VI programlanırken nesnelere, fonksiyonlar (Functions) paletinden seçilip bir bloktan diğerine hat çekilerek birbirlerine bağlanmaktadır. Bu blokların içeriği basit aritmetik fonksiyonlardan, ileri veri toplama ve analiz işlemlerine, network ve dosya I/O işlemlerine kadar çeşitlilik göstermektedir. LabVIEW'de oluşturulan VI'ler modülerdir ve bu sayede kendi başlarına çalışabilir veya başka bir VI'in parçası olarak kullanılabilir. Kullanıcı tarafından oluşturulan VI için bir simge oluşturulabilir. Böylece değişen ihtiyaçlara göre yeniden düzenlenebilen, başka VI, birleştirilebilen veya birbirleriyle değiştirilebilen VI ve alt VI sıra düzeni oluşturulabilmektedir (National Instruments 2012).

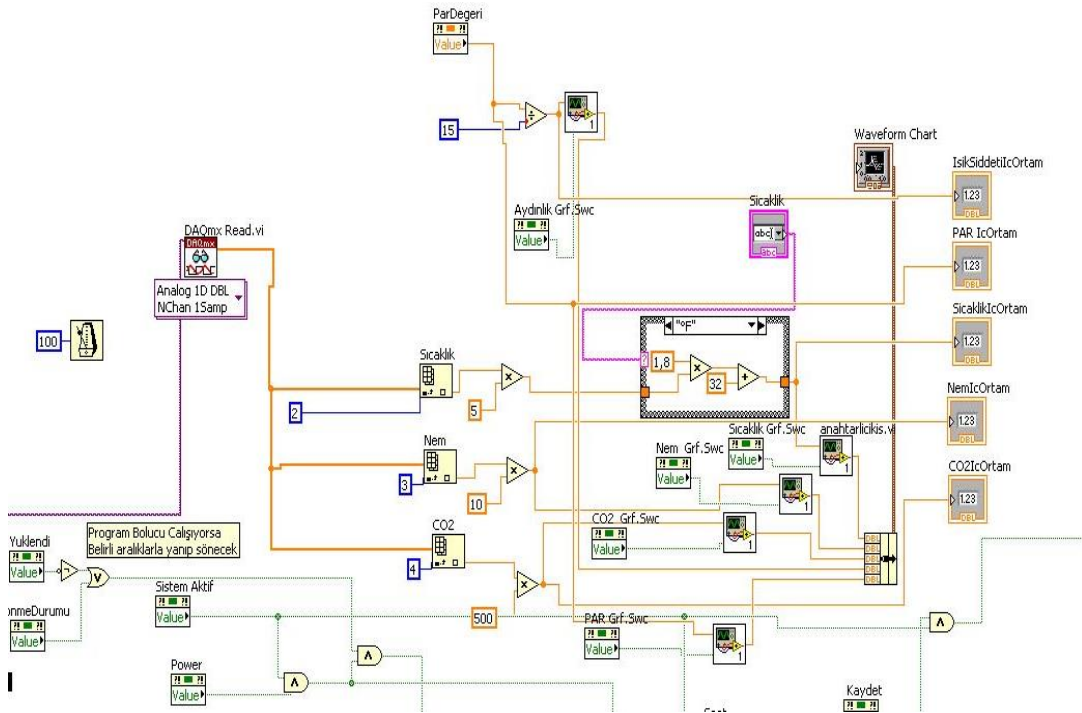
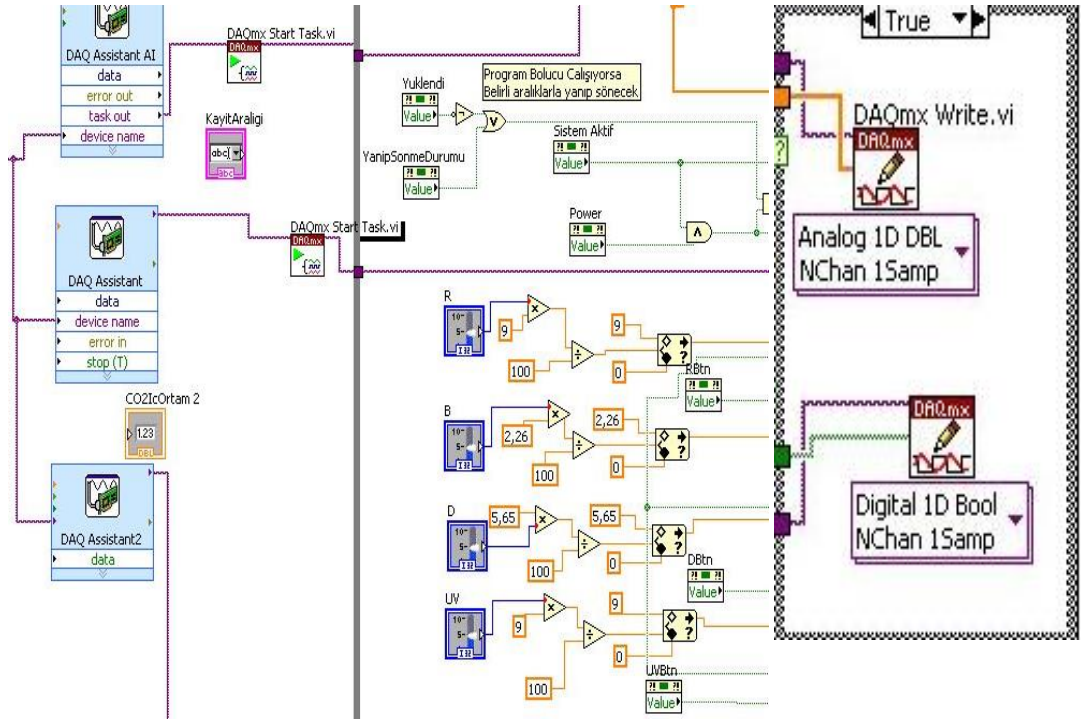
Tez çalışması kapsamında geliştirilen yazılımda ortamdan veri toplanması, örnekselden sayısala (*ADC: Analog to Digital Converter*) ve sayısaldan örneksele (*DAC: Digital to Analog Converter*) dönüştürücü işlemleri, mantıksal hesaplamalar, LED gruplarının ışık kontrolleri için blok diyagramlar oluşturulmuştur. Yazılımın genel işleyişine bağlı olarak bu blok diyagramlardan bazıları birbiriyle bağlı olarak çalışmaktadır. Yazılımda geliştirilen bazı blok diyagramlar Şekil 3.38-43'de verilmiştir.



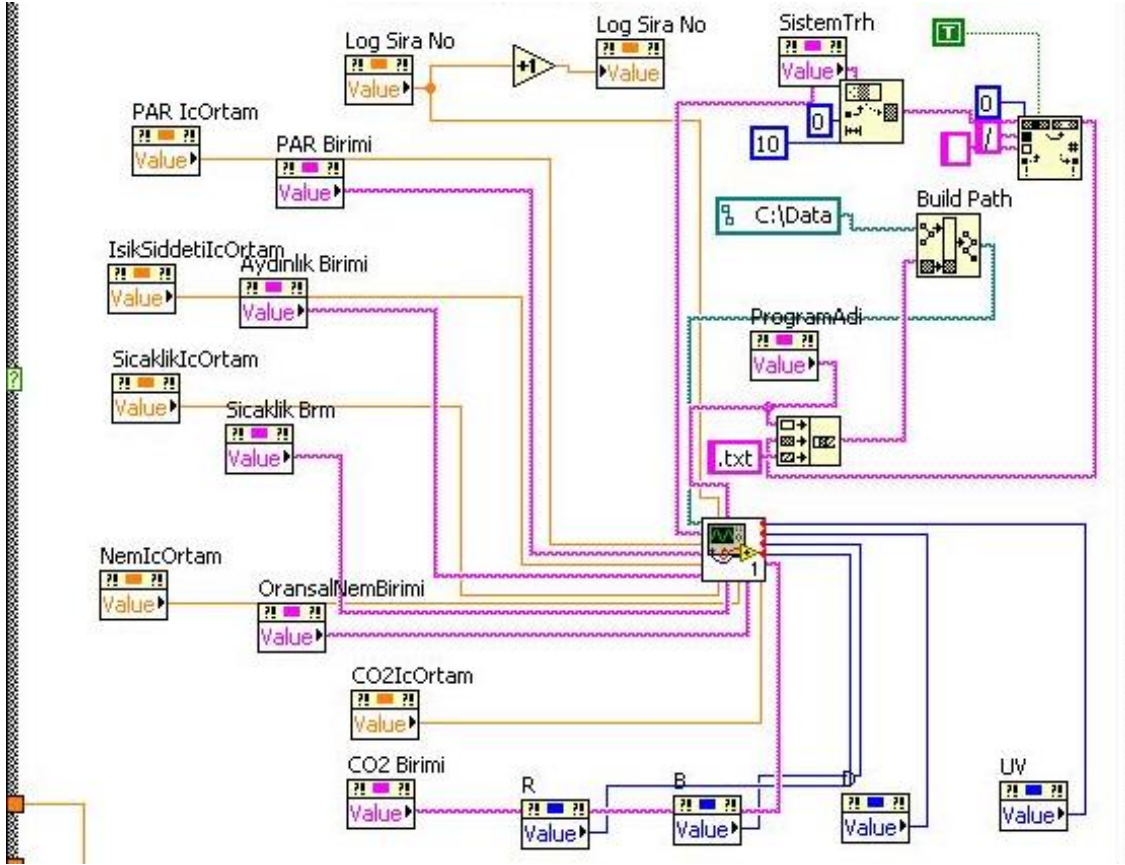
Şekil 3.38. LED gruplarında ışık seviye ayarları için geliştirilen blok diyagram



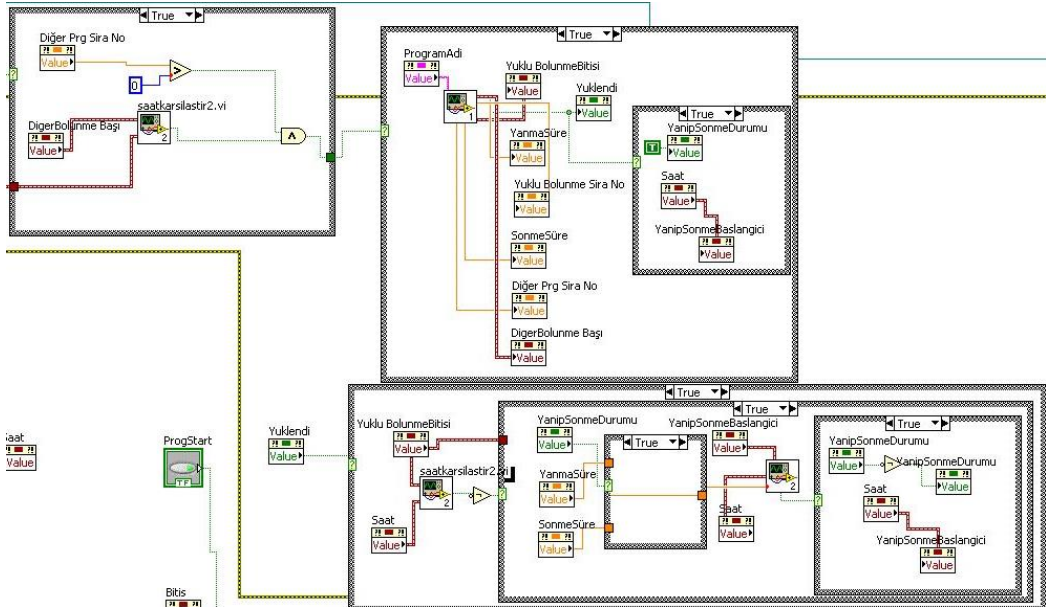
Şekil 3.39. Rapor verilerinin bilgisayar C diskine kaydedilmesi için geliştirilen blok diyagram



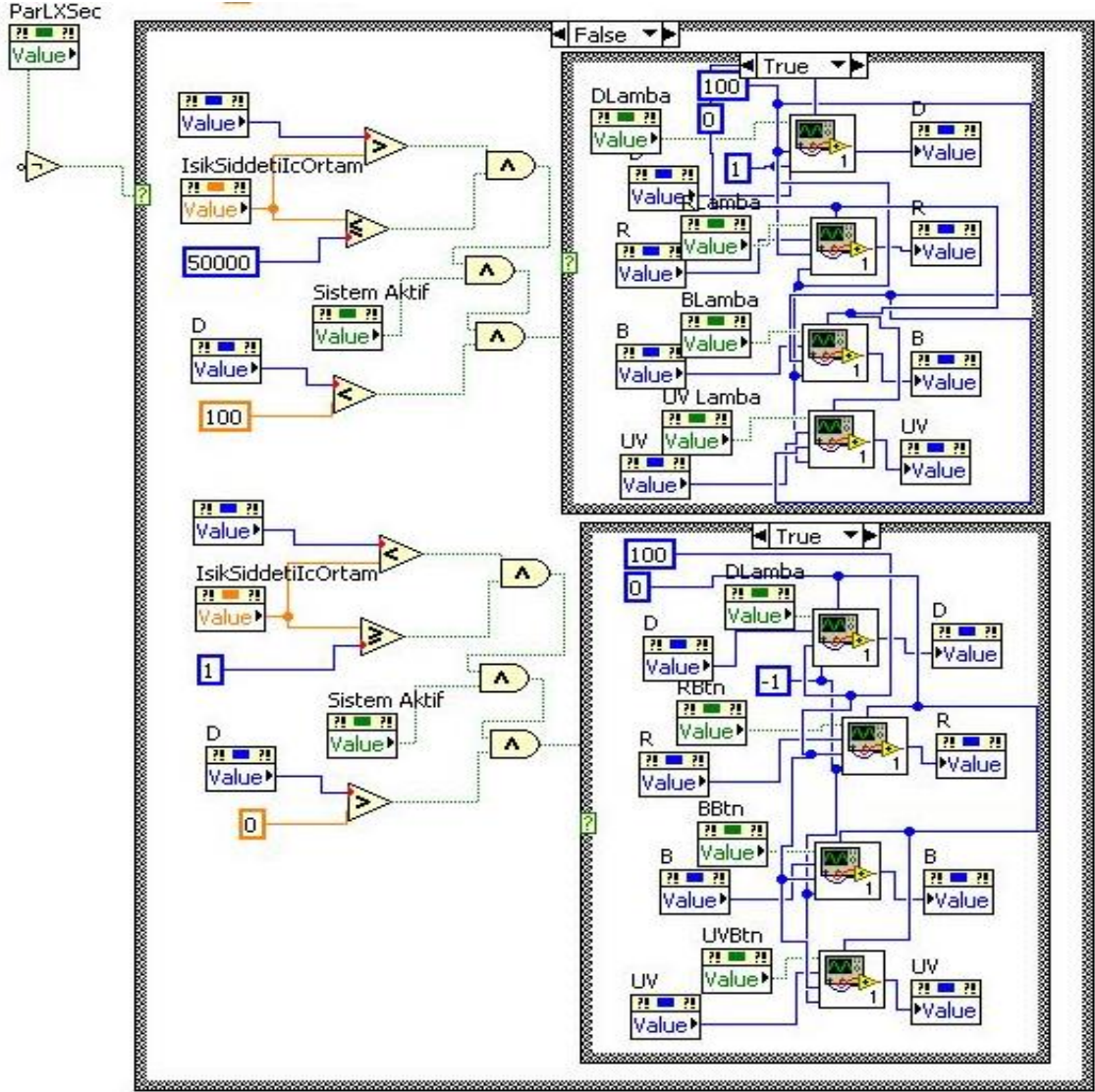
Şekil 3.40. Duyargalar aracılığıyla veri toplanmasını sağlayan blok diyagramlar



Şekil 3.41. Veri kaydının sağlanması için hazırlanan blok diyagram



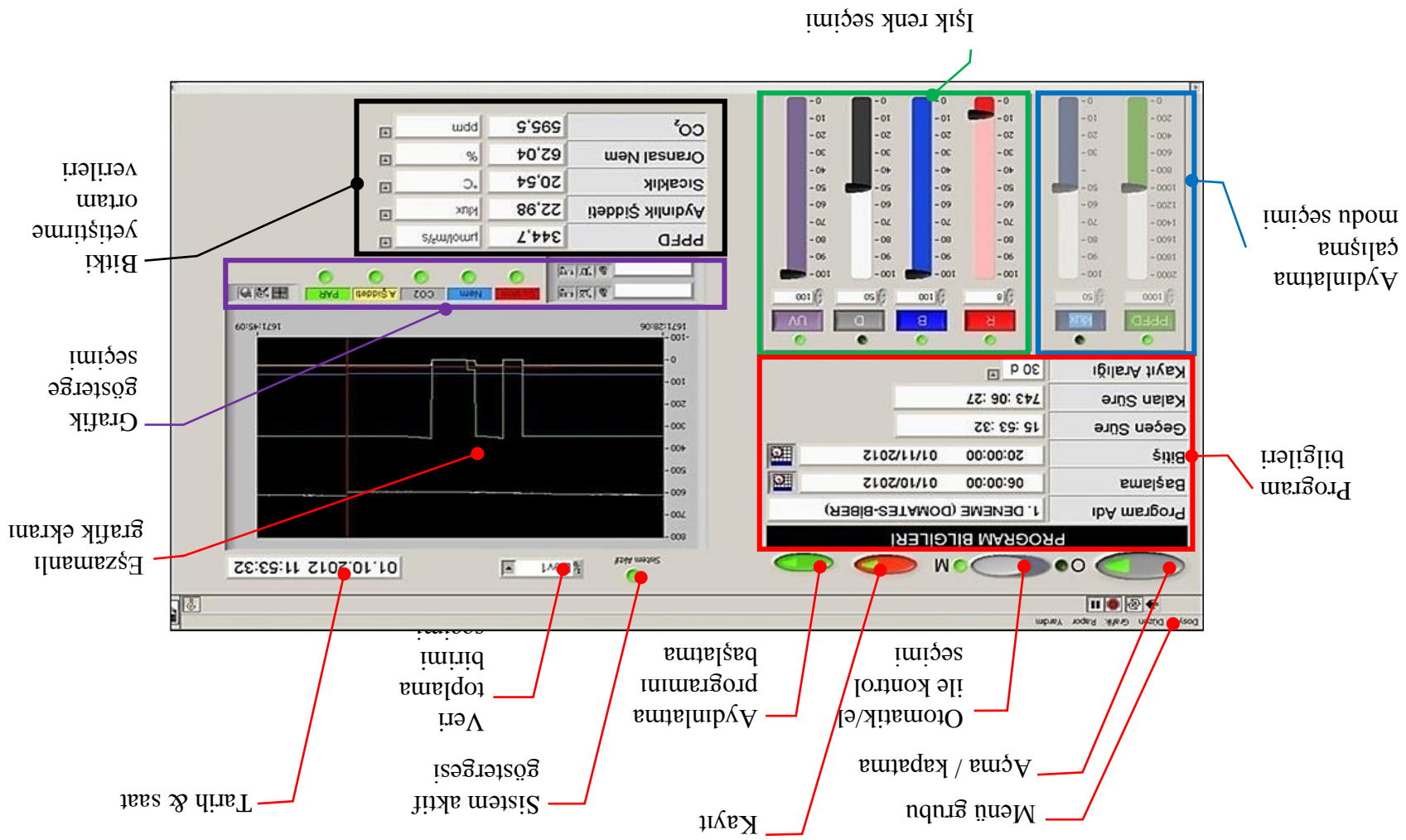
Şekil 3.42. Günü uzatma ve geceyi bölme işlemleri için hazırlanan blok diyagram



Şekil 3.43. PAR ve aydınlık şiddeti uygulamalarının otomatik çalışma diyagramı

Arka planda çalışan blok diyagramlardaki işleyiş, ana ön panel ve diğer yardımcı paneller (kayıt işlemleri, yazdırma, rapor, grafik vb) yardımıyla izlenmekte ve yönetilmektedir. Hazırlanan ana ön panel ile diğer yardımcı ön panellerin erişimi ve kullanımı kolay, kullanıcı dostu olmasına önem verilmiştir. Yazılımın ana ara yüzü ve üzerinde bulunan düğmelerin işlevleri Şekil 3.44'de görülmektedir.

Şekil 3.44. Aydınlatma otomasyon yazılımı arayüzü



Aydınlatma otomasyon yazılımının arayüzünde bulunan düğme ve göstergelerin görevleri şunlardır;

Menü grubu: Programın diğer ara yüzlerine ulaşmak, program ayarlarını yapmak, verilerin metin ve grafik sonuçlarını ve bunların dökümünü almak vb işlemlerinin yapıldığı alanlara girmek için kullanılmaktadır.

Açma/kapatma: Aydınlatma otomasyon yazılımını çalıştırmak ya da kapatmak için kullanılmaktadır

Otomatik/el ile kontrol seçimi: Seçime göre, aydınlatmanın otomatik olarak veya el ile çalıştırılmasını sağlamaktadır.

Kayıt: Sistem tarafından alınan ortam ve ışık verilerinin çalışma boyunca kaydedilmesini sağlamaktadır.

Aydınlatma programını başlatma: Program bilgilerinin ve ışık ayarlarının girildikten sonra aydınlatmanın başlatılmasını sağlamaktadır.

Sistem aktif göstergesi: Aydınlatma otomasyon sisteminin düzgün çalışmakta olduğunu göstermektedir.

Veri toplama birimi seçimi: Aydınlatılan ortama ait veri toplama biriminin etkin duruma getirilmesini sağlamaktadır.

Tarih ve saat: Günün tarihini ve saatini bildirmektedir.

Program bilgileri: İleri zamanlarda kullanmak için farklı ışık isteklerine göre aydınlatma programları hazırlanabilir ve bu programlar bir isim (Program Adı) verilerek kaydedilebilir. Böylece her defasında ışık bilgilerinin tekrar girilmesine gerek kalmaz. Bu alanda aydınlatma programının başlama ve bitiş tarih ve saatlerinin girilmesi yeterlidir. Aydınlatma izni verildiğinde geçen süre ve programın sona ermesi için kalan süre hesaplanarak ekranda görünecektir. Eğer istenirse aydınlatma programı “Kayıt Aralığı” alanından bir süre seçilerek tüm ortam verileri zamana bağlı olarak kayıt altına alınacaktır. Kayıt aralıkları 1, 5, 15, 30 ve 60 dakika olarak seçilebilmektedir.

Aydınlatma çalışma modu seçimi: Aydınlatma PAR değeri ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) ya da aydınlatma şiddeti (lx) olarak seçilebilir. Bu seçimden sonra $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ve lx değeri belirlenebilir. PAR değeri için ayarlanabilir üst sınır $2000 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ve aydınlatma şiddeti için 100 klx'tür.

Işık renk seçimi: LED lamba, üç farklı dalga boyu veren LED dizileri (R, B, UV) ile 6500K soğuk renk ışık (D) veren LED'leri içermektedir. Aydınlatma hangi grup LED'lerle yapılmak isteniyorsa önce ilgili LED grubu seçilir ve sonrasında istenen ışık miktarı doğrudan yazılarak ya da sürgü düğme kullanılarak ayarlanmaktadır.

Eşzamanlı grafik ekranı: Ortamdaki verilerin (CO₂, sıcaklık, bağıl nem, aydınlatma şiddeti, PAR) eş zamanlı olarak grafiği bu alandan izlenebilmektedir.

Grafik gösterge seçimi: Grafik eksenlerinin yerleri bu alan kullanılarak değiştirilebilir, grafik çizimi gerçek zamanlı veya mutlak zamanlı olarak seçilebilir. Ayrıca, CO₂, sıcaklık, bağıl nem, aydınlatma şiddeti ve PAR verilerinden hangilerinin görülmesi isteniyorsa bu alandan seçilmektedir.

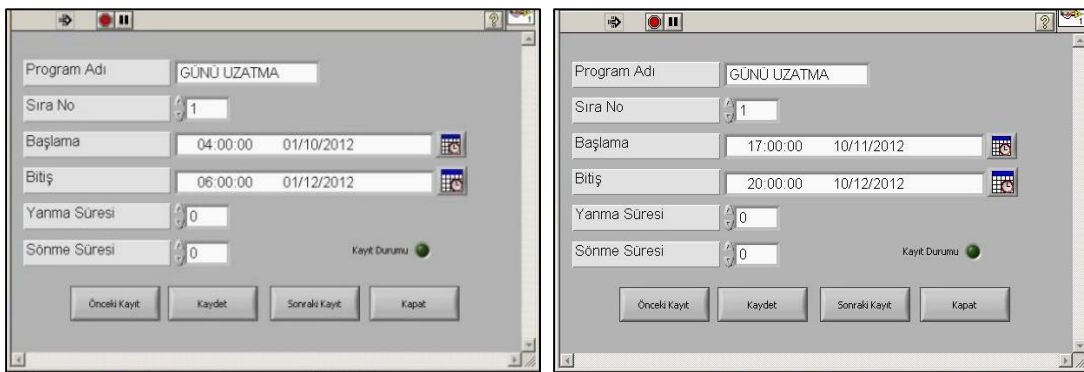
Bitki yetiştirme ortamı verileri: PAR (PPFD), aydınlık şiddeti, sıcaklık, bağıl nem, CO₂ ve sistemin toplam harcadığı elektrik enerji değerleri eş zamanlı olarak bu alandan izlenebilmektedir.

Geliştirilen yazılımda otomatik aydınlatma uygulamasının hazırlanması için izlenmesi gereken adımlar Şekil 3.45’de verilmiştir.



Şekil 3.45. Otomatik aydınlatma programı uygulama adımları

Fotoperiyodik aydınlatma amaçlı uygulamalarda Günü Uzatma (GU), Geceyi Bölme (GB) ve Geceyi Kesintili Bölme (GKB) gibi uygulamalar verim artışı açısından önem taşımaktadır. Gerçekleştirilen aydınlatma otomasyon sistemi ile bu amaca uygun ışık ve süre isteklerine göre aydınlatma programları hazırlanıp kaydedilebilmektedir. Şekil 3.46.a ve b’de günü uzatma (GU) uygulamalarına yönelik ekran görüntüleri görülmektedir.



(a)

(b)

Şekil 3.46. a) Güneşin doğuşundan önceki ve b) sonraki GU uygulamaları

Şekil 3.46.a’da güneşin doğuşundan önceki (örneğin; 04:00-06:00 arasında 2 saatlik zaman aralığında) ve Şekil 3.46.b’de ise güneş battıktan sonraki (örneğin; 17:00- 20:00 arasındaki 3 saatlik zaman aralığında) GU uygulamasına ait veriler görülmektedir. Şekillerde görülen alanlar doldurulduktan sonra program kaydedilerek saklanabilmektedir. Eğer farklı zaman aralıklarında da başka uygulamalar yapılacaksa benzer şekilde GU aydınlatma programları hazırlanıp *sıra no* verilerek kaydedilip, program kütüphanesi oluşturulabilmektedir. Böylece sık kullanılan programlar arşivden çağırılarak tekrar kullanılabilme olanağı sağlanmış olmaktadır. Programların çalışma saatleri belirlenirken başlama ve bitiş saatlerinin birbiriyle çakışmamasına dikkat edilmesi gerekmektedir. Ekranda görülen *Yanma Süresi* ve *Sönme Süresi* ise yalnızca GKB uygulamalarında kullanılmakta olup, süreler dakika olarak belirlenmektedir. Bunun dışındaki uygulamalarda ise bu alan “0” olarak bırakılmaktadır.

Programda, geceyi bölme (GB) ve geceyi kesintili bölme (GKB) uygulamaları da günü uzatma uygulamasına benzer şekilde hazırlanıp, kaydedilebilir. GB ve GKB uygulamalarına ait ekran görüntüleri Şekil 3.47.a ve b’de verilmiştir.

Figure 3.47 shows two screenshots of the GU application interface. Screenshot (a) displays the 'GECEYİ BÖLME' (Night Division) program settings. The 'Program Adı' (Program Name) is 'GECEYİ BÖLME', 'Sıra No' (Order No) is 10, 'Başlama' (Start) is 00:30:00 on 15/09/2011, 'Bitiş' (End) is 02:00:00 on 15/03/2012, 'Yanma Süresi' (Burn Time) is 0, and 'Sönme Süresi' (Off Time) is 0. Screenshot (b) displays the 'G. KESİNTİLİ BÖL.' (Night Division with Interruption) program settings. The 'Program Adı' is 'G. KESİNTİLİ BÖL.', 'Sıra No' is 1, 'Başlama' is 22:00:00 on 15/01/2012, 'Bitiş' is 02:00:00 on 15/06/2012, 'Yanma Süresi' is 10, and 'Sönme Süresi' is 20. Both screenshots show a 'Kayıt Durumu' (Recording Status) indicator and buttons for 'Önceki Kayıt' (Previous Record), 'Kaydet' (Save), 'Sonraki Kayıt' (Next Record), and 'Kapat' (Close).

(a)

(b)

Şekil 3.47. a) GB ve b) GKB uygulamaları

Daha önce kaydedilmiş geçmiş tarihli kayıtlar metin (Şekil 3.48) ve grafik verisi (Şekil 3.49) olarak elde edilebilmektedir. Kayıtlı verileri metin düzeninde elde etmek için, ana pencerede bulunan menü altındaki “Rapor” sekmesi kullanılır. Kayıtlarda PAR, aydınlık şiddeti, sıcaklık, oransal nem ve CO₂ verilerinin zamana bağlı değişimleri ile aktif LED gruplarının ışık seviyelerindeki değişimler hakkında bilgiler alınabilmektedir. Ek olarak, kaydedilen verilerin zamana, duyargaya ve veriye göre filtreleme işlemleri yapılabilmekte ve yazıcı çıktıları alınabilmektedir. Ayrıca, MS Excel’e otomatik taşıma seçeneği kullanılarak kayıtların kolaylıkla MS Office ortamında düzenlenebilmesi sağlanmıştır.

Öte yandan, kayıtlar *Grafik* sekmesi kullanılarak grafik verisi olarak da elde edilebilir. Kayıtlı verilerin son 1, 12 veya 24 saatlik ya da özel seçimle istenilen tarih ve saat aralığındaki grafikleri çizdirilebilir.

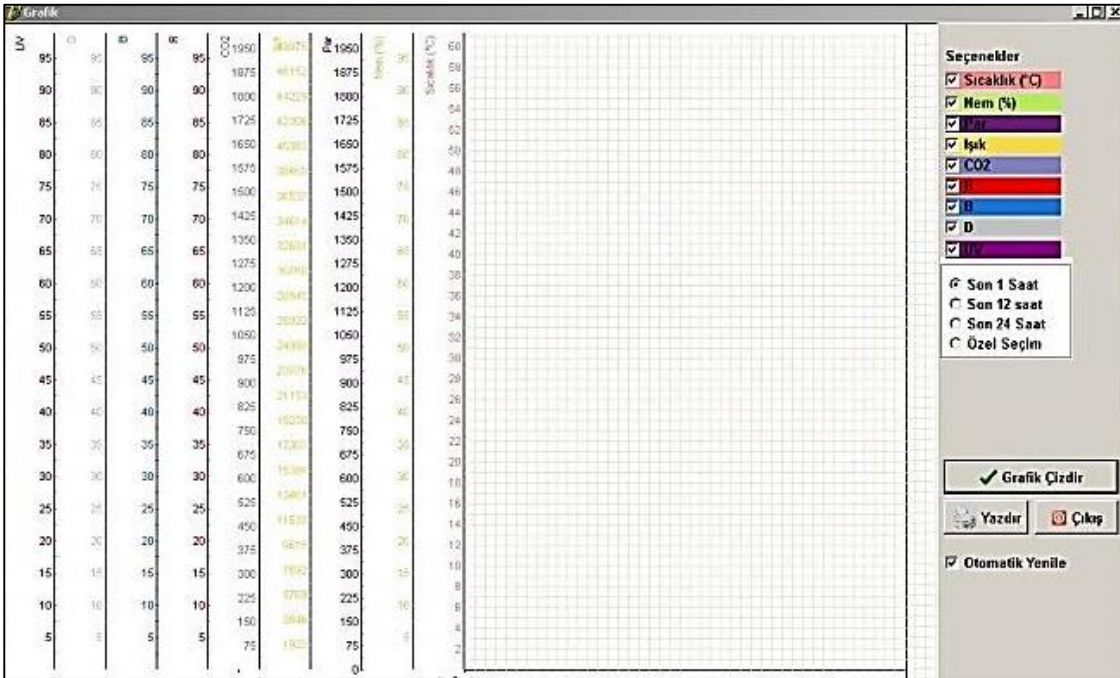
Program Adı	Tarih	Saat	Par	İşk	Sıcaklık	Nem(%)	CO2	R	B	D	UV
04.04.2012	07:28:45	4.623,0 MWh	2.104 Lx	45,0 °C	%80,0	2.124 ppm	90	90	90	90	90
04.04.2012	07:28:45	4.623,0 MWh	2.104 Lx	45,0 °C	%80,0	2.124 ppm	90	90	90	90	90
04.04.2012	06:58:09	4.736,0 MWh	2.135 Lx	46,0 °C	%80,0	2.195 ppm	90	90	90	90	90
04.04.2012	07:15:00	4.261,0 MWh	2.080 Lx	44,0 °C	%77,0	2.000 ppm	90	90	90	90	90
04.04.2012	07:16:00	637,0 MWh	332 Lx	5,0 °C	%6,0	151 ppm	90	90	90	49	90
04.04.2012	07:17:00	1.625,0 MWh	629 Lx	16,0 °C	%11,0	1.120 ppm	90	90	90	90	90
04.04.2012	07:18:00	4.927,0 MWh	2.189 Lx	49,0 °C	%80,0	2.439 ppm	90	90	90	49	90
04.04.2012	07:19:01	1.859,0 MWh	910 Lx	16,0 °C	%30,0	639 ppm	90	90	90	46	90
04.04.2012	07:20:01	490,0 MWh	152 Lx	6,0 °C	%15,0	454 ppm	90	90	90	40	90
04.04.2012	07:21:01	4.420,0 MWh	1.968 Lx	45,0 °C	%80,0	2.071 ppm	90	90	90	40	90
04.04.2012	07:22:01	3.313,0 MWh	1.560 Lx	31,0 °C	%58,0	1.340 ppm	90	90	90	47	90
04.04.2012	07:23:01	80,0 MWh	23 Lx	1,0 °C	%3,0	76 ppm	90	90	90	47	90
04.04.2012	07:24:02	3.223,0 MWh	1.330 Lx	34,0 °C	%73,0	1.900 ppm	90	90	90	47	90
04.04.2012	07:25:02	4.478,0 MWh	2.047 Lx	43,0 °C	%84,0	2.023 ppm	90	90	90	46	90
04.04.2012	07:26:02	544,0 MWh	205 Lx	4,0 °C	%7,0	121 ppm	90	90	90	45	90
04.04.2012	07:27:02	1.769,0 MWh	687 Lx	19,0 °C	%44,0	1.196 ppm	90	90	90	46	90
04.04.2012	07:28:03	4.930,0 MWh	2.190 Lx	49,0 °C	%80,0	2.420 ppm	90	90	90	45	90
04.04.2012	07:29:03	1.714,0 MWh	843 Lx	15,0 °C	%27,0	574 ppm	90	90	90	44	90
04.04.2012	07:30:03	579,0 MWh	187 Lx	7,0 °C	%18,0	513 ppm	90	90	90	44	90
04.04.2012	07:31:03	4.939,0 MWh	1.953 Lx	46,0 °C	%85,0	2.398 ppm	90	90	90	44	90
04.04.2012	07:32:03	3.186,0 MWh	1.497 Lx	29,0 °C	%65,0	1.273 ppm	90	90	90	43	90
04.04.2012	07:33:04	82,0 MWh	19 Lx	1,0 °C	%3,0	97 ppm	90	90	90	43	90
04.04.2012	22:32:00	4.899,0 MWh	2.160 Lx	49,0 °C	%80,0	2.462 ppm	90	90	90	48	90
04.04.2012	22:45:00	4.451,0 MWh	1.894 Lx	45,0 °C	%81,0	2.305 ppm	90	90	90	48	90
04.04.2012	22:50:00	3.686,0 MWh	1.721 Lx	36,0 °C	%66,0	1.551 ppm	90	90	90	90	90
04.04.2012	22:00:02	4.740,0 MWh	2.150 Lx	46,0 °C	%81,0	2.216 ppm	90	90	90	90	90
07.04.2012	22:16:33	4.457,0 MWh	1.927 Lx	45,0 °C	%84,0	2.362 ppm	90	90	90	90	90
07.04.2012	22:17:06	4.754,0 MWh	2.152 Lx	46,0 °C	%82,0	2.225 ppm	90	90	90	49	90
07.04.2012	22:18:06	960,0 MWh	409 Lx	6,0 °C	%14,0	205 ppm	90	90	90	49	90

Filtre işlemleri

MS Excel'e taşıma düğmesi

Yazdırma seçeneği

Şekil 3.48. Rapor penceresi



Şekil 3.49. Grafik bilgi penceresi

4. BULGULAR ve TARTIŞMA

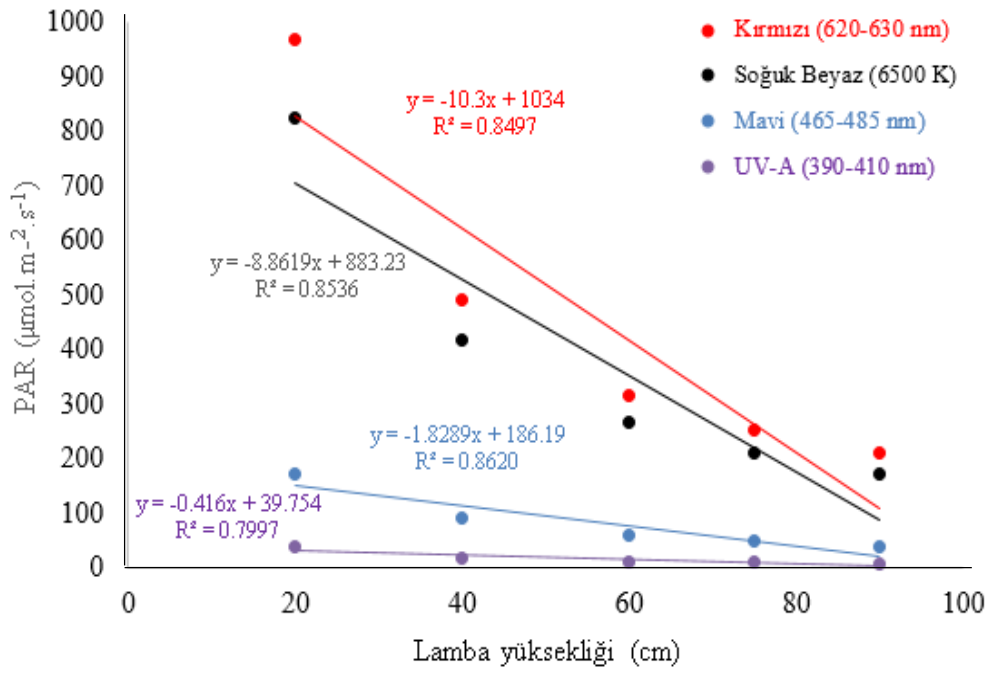
4.1. LED Lamba Performansı

Geliştirilen LED lambanın çalışma performansı hakkında bilgi elde edebilmek için lamba 20, 40, 60, 75 ve 90 cm asılma yüksekliklerinde ayarlanmış ve bitki üzerine gelen PAR ile aydınlık şiddeti değerleri ayrı ayrı ölçülmüş ve yatay düzlemdeki ışık deseni hakkında önemli bilgiler elde edilmiştir. Ölçümler lambadaki LED gruplarının ışık seviyeleri tam açık olduğu durumda, tam karanlık ve yansısız bir ortamda yapılmıştır. Ölçümde kullanılan duygalar lamba altında ve tam merkeze gelecek şekilde düz bir zeminde teraziye alınarak yerleştirilmiştir. Çizelge 4.1’de soğuk beyaz (SB), kırmızı (K), mavi (M), morötesi (UV-A) ile bunların karışımı olan; kırmızı-mavi (K+M), kırmızı-mavi-morötesi (K+M+UV) ve kırmızı-mavi-morötesi-soğuk beyaz (SB+K+M+UV) ışık değerleri verilmiştir.

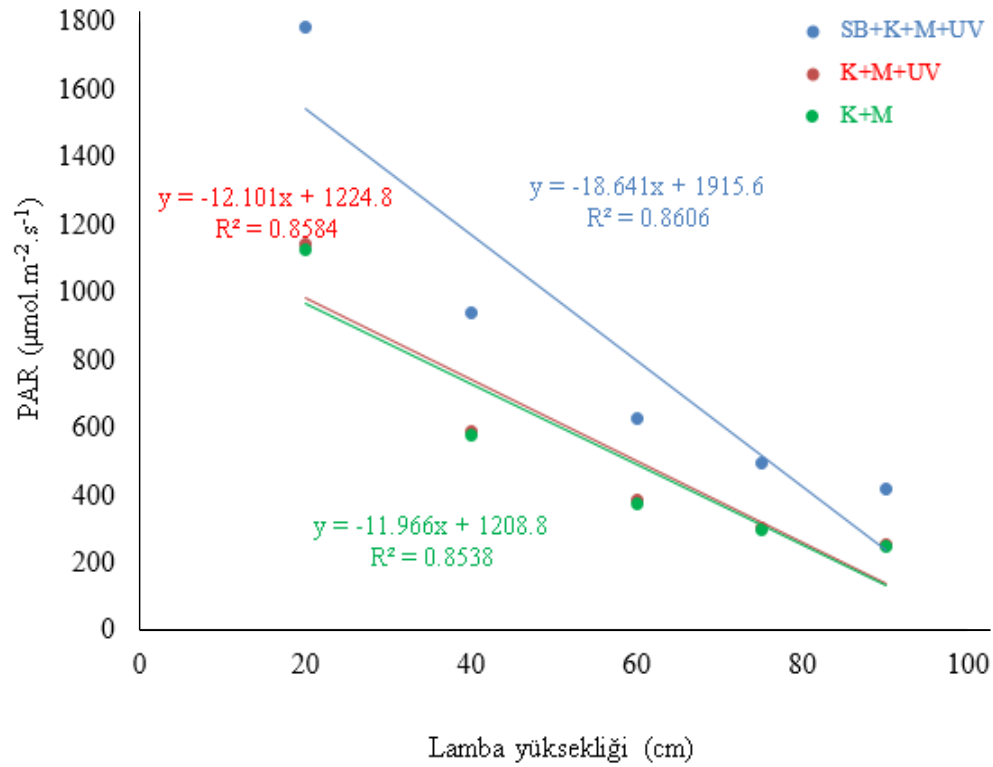
Çizelge 4.1’e göre, en yüksek aydınlık şiddeti ve PAR değerleri 20 cm mesafede ve LED’lerin ışık seviyesi en yüksek durumdayken elde edilmiştir. Buna göre, tekil renklerde en yüksek PAR değerini $967.7 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ile kırmızı LED’ler verirken, en yüksek aydınlık şiddeti 57 210 lx ile 6500 K soğuk beyaz (SB) LED’lerden alınmıştır. Lambadaki tüm ledler yakıldığında ise PAR ve aydınlık şiddeti değerleri sırasıyla, $1784.5 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ve 82 620 lx olarak elde edilmiştir. Lamba içerisindeki kırmızı, soğuk beyaz, mavi ve UV-A dalga boylu ışıkları veren LED gruplarının PAR miktarı ile lambanın asılma yüksekliği arasındaki ilişkiler belirlenmiştir. Şekil 4.1’de tekil ve Şekil 4.2’de karışık LED gruplarının verdiği aydınlık ışınım şiddetinin lambanın asılma yüksekliği arttıkça azaldığı gözlenmiştir. Elde edilen bulgulara göre, tekil LED grubunda elde edilen PAR-lamba yüksekliği arasındaki en iyi ilişki $R^2=0.8620$ ile mavi LED grubunda elde edilirken, en kötü UV-A’da ($R^2=0.7997$) görülmüştür. Farklı dalga boylu ışıkların karışımında ise en iyi ilişki $R^2=0.8606$ ile tüm renklerin karışımında, en kötü ise kırmızı ve mavi grupların birlikte yanmasıyla elde edilmiştir ($R^2=0.8538$). Elde edilen bu sonuçlara göre tekil LED gruplarında kırmızı, mavi ve soğuk beyaz dalga boylu ışıkların PAR-lamba yüksekliği arasındaki ilişkiler birbirine çok yakın, sadece UV-A farklı çıkmıştır. Karışım halindeki LED gruplarında ise önemli bir fark gözlenmemiştir.

Çizelge 4.1. LED lambanın asılma yüksekliğine göre PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$) ve aydınlık şiddeti (lx) değerleri

Lamba yüksekliği (cm)	Işık seviyesi (%)	Soğuk beyaz		Kırmızı		Mavi		Morötesi (UV)		K + M		K + M + UV		SB + K + M + UV			
		PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Aydınlık şiddeti (lx)	PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Aydınlık şiddeti (lx)	PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Aydınlık şiddeti (lx)	PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Aydınlık şiddeti (lx)	PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Aydınlık şiddeti (lx)	PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Aydınlık şiddeti (lx)	PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Aydınlık şiddeti (lx)	PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)	Aydınlık şiddeti (lx)
20	25	2597	18590	2335	7862	677	777	118	1542	3037	9047	3147	8965	5837	28380	2597	18590
	50	4781	34240	4901	15260	1069	1260	222	3002	6021	17010	6053	15790	10837	51450	4781	34240
	75	6613	47380	7357	22910	1421	1660	318	4246	8829	25220	8798	23280	1523	70450	6613	47380
	100	8245	57210	9677	29660	1733	1992	382	5193	11293	31110	11413	30300	17845	82620	8245	57210
40	25	1309	9495	1189	4005	357	4772	53	753	1533	4438	1596	4596	2957	15150	1309	9495
	50	2413	16170	2469	8252	565	724	93	1245	3013	8033	3133	9206	5621	28240	2413	16170
	75	3349	22770	3701	10860	741	938	132	1784	4421	11680	4589	12160	7851	38250	3349	22770
	100	4157	28420	4893	14530	901	941	165	2202	5781	15490	5901	15160	9411	43950	4157	28420
60	25	844	6071	772	2557	244	3186	36	473	1028	3031	1044	2995	1893	9760	844	6071
	50	154	9820	1604	5337	38	484	6	8838	2012	6129	2036	5935	3629	18350	154	9820
	75	214	14130	2396	7806	50	6182	84	1041	2924	8670	2972	8577	4973	24150	214	14130
	100	2676	17920	3164	8830	604	7323	10	1275	3781	9790	3876	9870	6269	29150	2676	17920
75	25	663	5023	606	2170	19	259	14	367	806	2520	822	2494	1493	7484	663	5023
	50	1223	9140	1262	4410	294	392	46	6808	159	5012	1614	4911	2837	14230	1223	9140
	75	1702	12850	191	6480	39	5008	7	932	2326	7180	2374	7140	4029	19700	1702	12850
	100	2102	15820	251	8250	47	592	86	1135	2982	8420	3022	8510	4934	23200	2102	15820
90	25	557	4270	509	1850	157	190	13	0	661	2080	685	2110	1213	6210	557	4270
	50	1029	7780	1061	3800	245	310	37	30	1301	4120	1341	4200	2301	11500	1029	7780
	75	1429	10770	1597	5600	325	400	53	50	1909	6000	1965	6080	3275	16030	1429	10770
	100	1725	13020	2101	7190	389	480	69	80	2501	7760	2541	7680	4197	20250	1725	13020

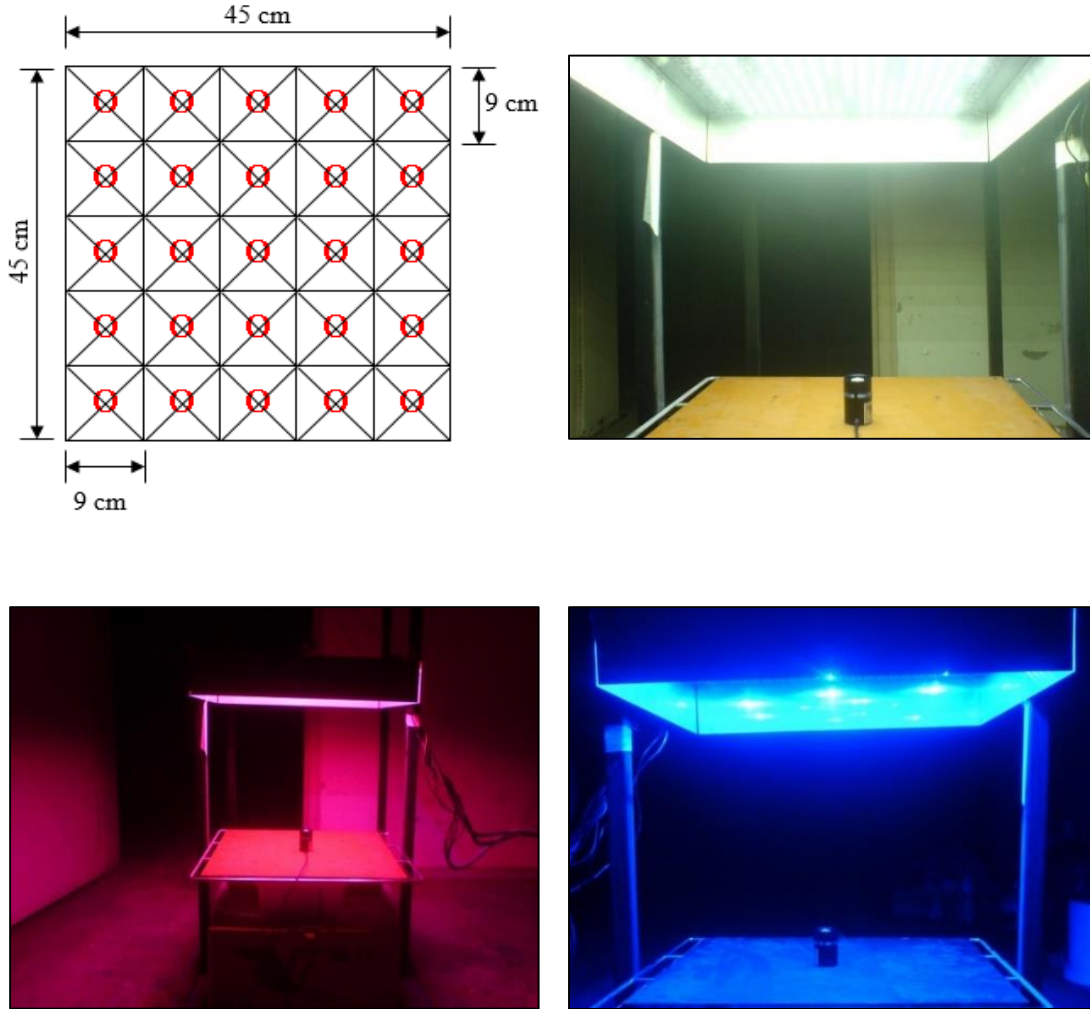


Şekil 4.1. Tekil LED gruplarında elde edilen PAR-lamba yüksekliği arasındaki ilişkiler

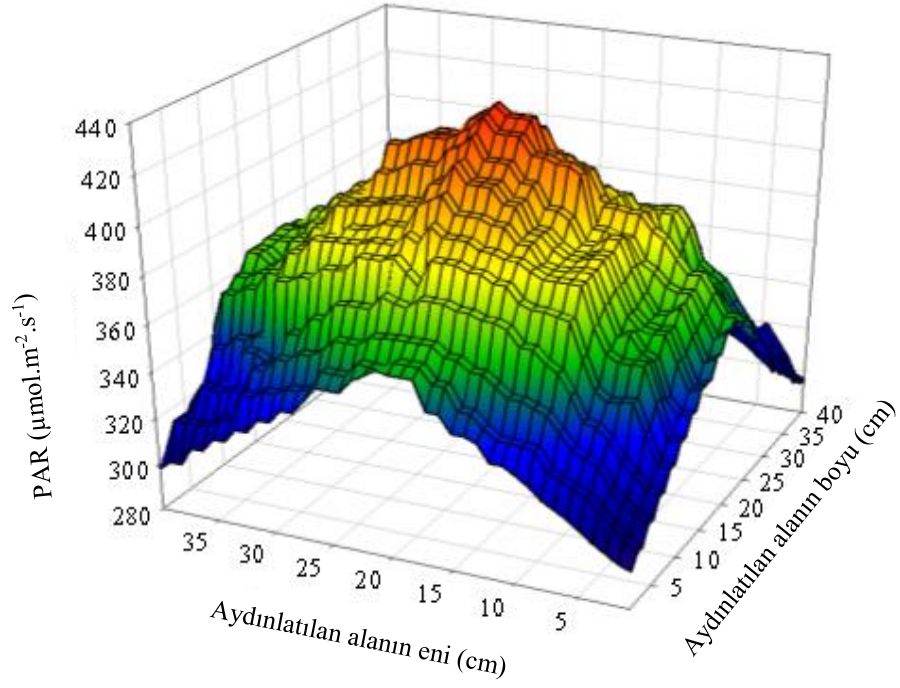
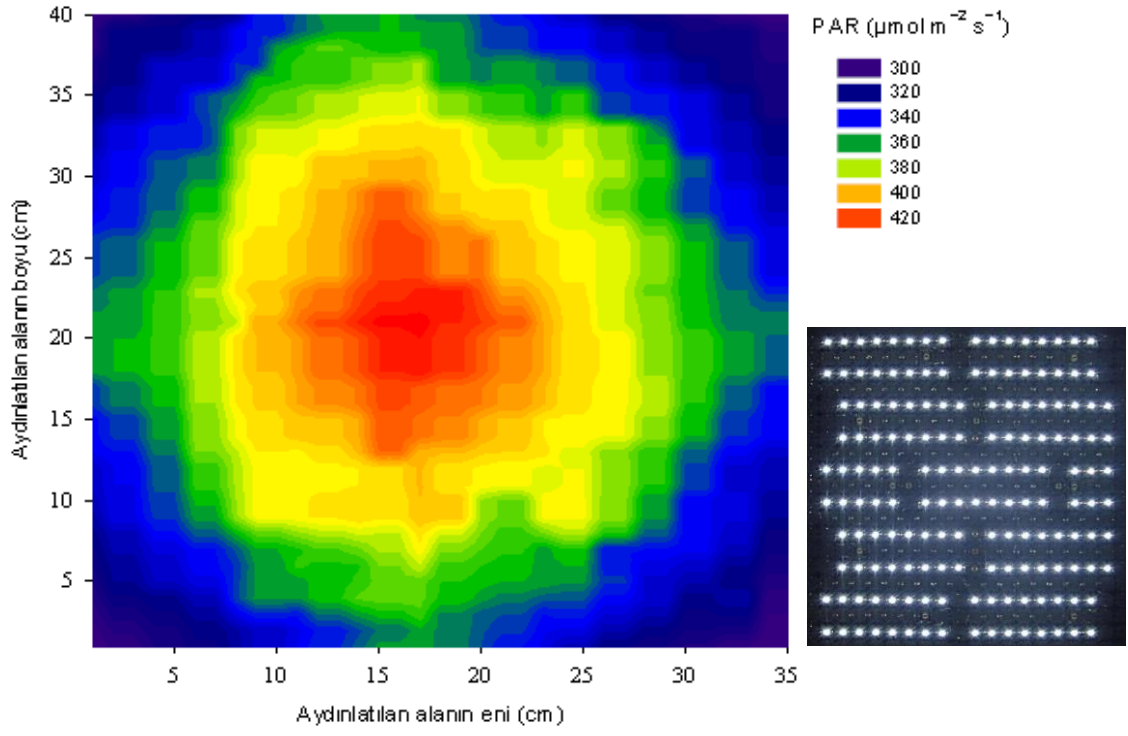


Şekil 4.2. Karışık LED gruplarında elde edilen PAR-lamba yüksekliği arasındaki ilişkiler

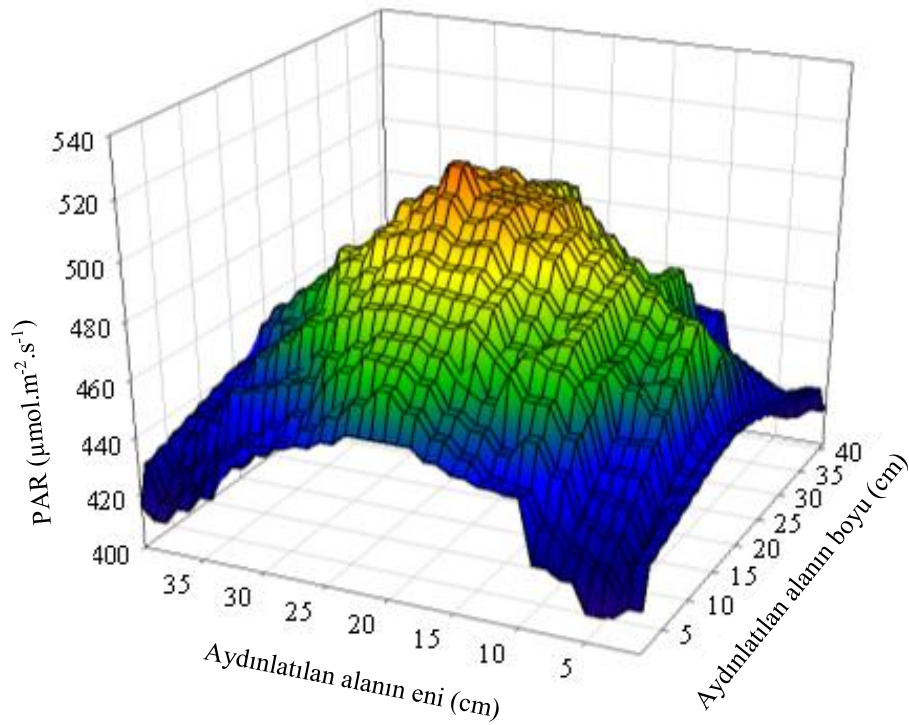
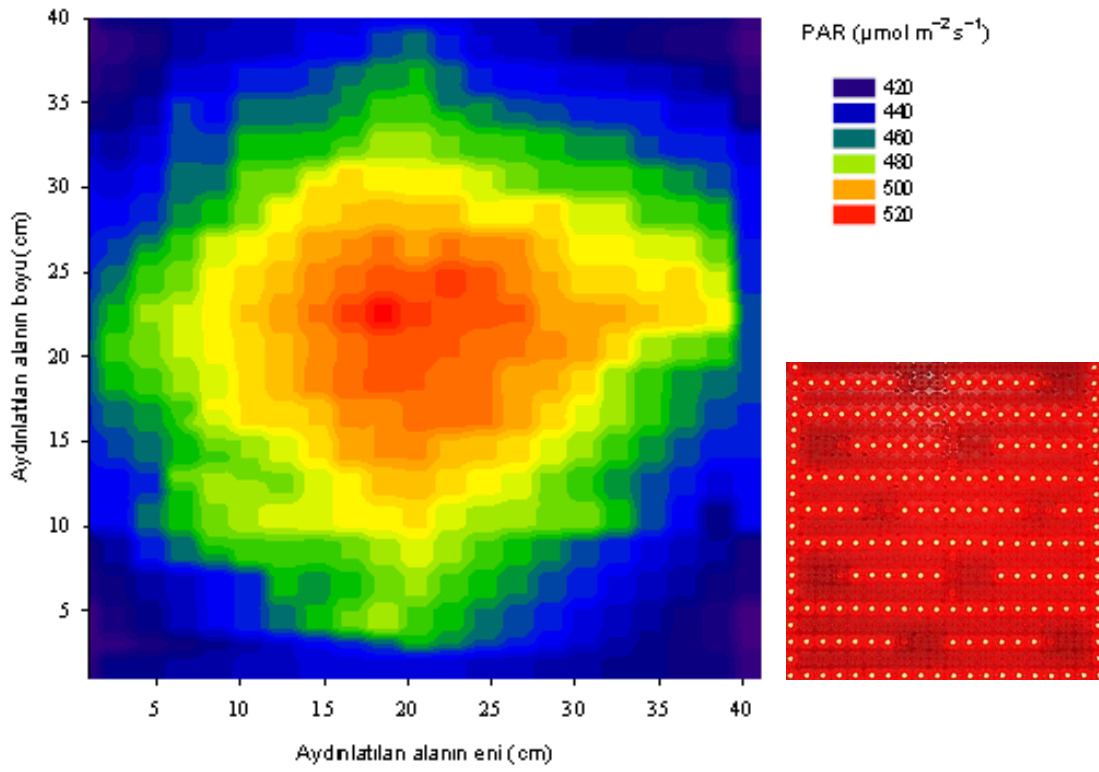
LED gruplarının yatay düzlemde oluşturdukları ışık deseninin (pattern) bilinmesi özellikle araştırma amaçlı yapılacak uygulamalar için önemlidir. Yukarıda verilen çalışmalara ilave olarak, LED gruplarının verdiği ışığın yatay düzlem üzerindeki deseni hakkında bilgi sahibi olmak için de bazı çalışmalar yapılmıştır. Bu amaçla lamba altına yerleştirilmiş $45 \times 45 \text{ cm}^2$ boyutlarında ve üzerinde işaretli 25 ölçüm noktası bulunan bir levha hazırlanmıştır (Şekil 4.3). Ölçümler aydınlık şiddeti ve PAR duygularının sırayla bu noktalar üzerinde teraziye alındıktan sonra yapılmıştır. Yapılan ön denemeler sonucunda LED lamba için yatay düzlemdeki tek düze ışık dağılımı açısından en uygun asılma yüksekliğinin yatay düzlemden 40-50 cm olduğu belirlenmiştir. Bu nedenle ölçümler, her LED grubu ayrı ayrı 45 cm lamba yüksekliğinde ve en yüksek ışınım sal aydınlık şiddetine ayarlandıktan sonra alınmıştır. Elde edilen verilere göre bilgisayar ortamında ışık dağılım grafikleri çıkarılmıştır (Şekil 4.4-4.9) Grafiklerin elde edilmesinde Sigma Plot (ver.12.3) yazılımı kullanılmıştır. Sonuçlara göre, lambanın asılma yüksekliği arttıkça PAR ve aydınlık şiddeti değerleri düşmekte, yatay düzlem üzerinde oluşan ışık deseninin renk geçişleri arasındaki belirgin çizgiler ortadan kalkmaktadır.



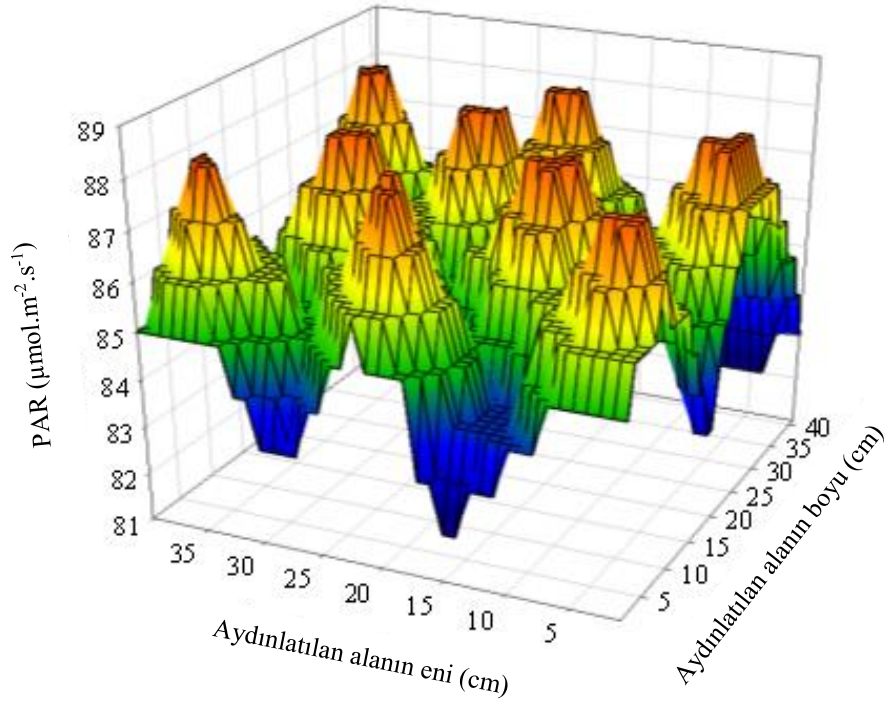
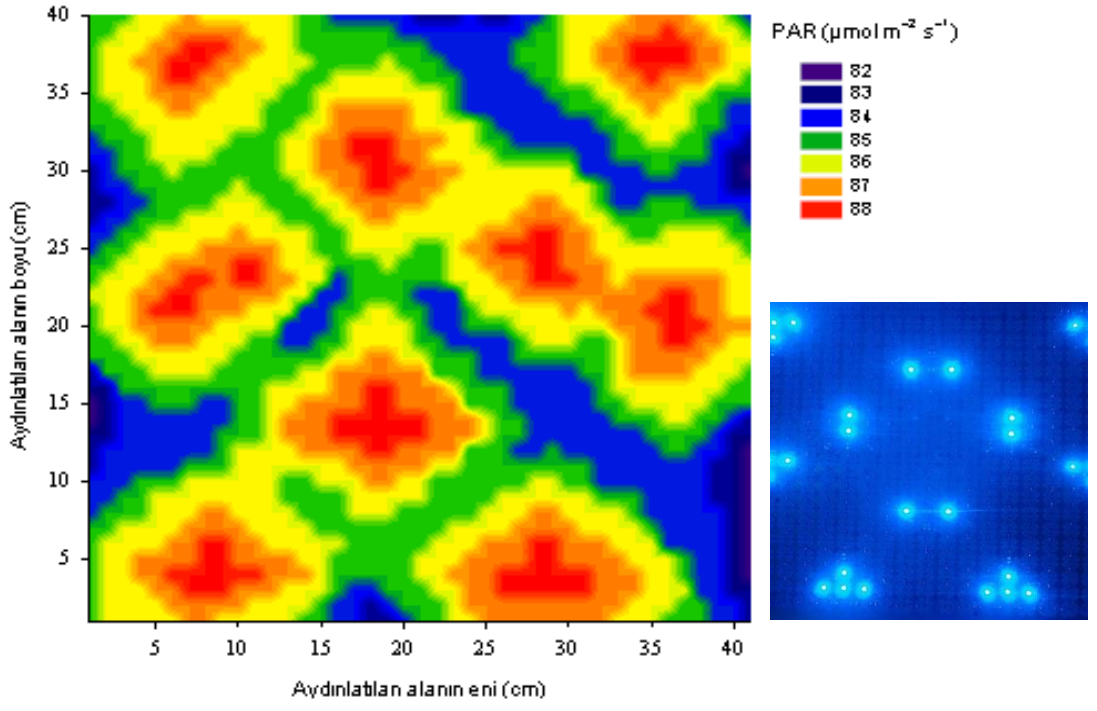
Şekil 4.3. Düz levha üzerinde hazırlanan ölçüm noktaları ve ölçüm düzenekleri



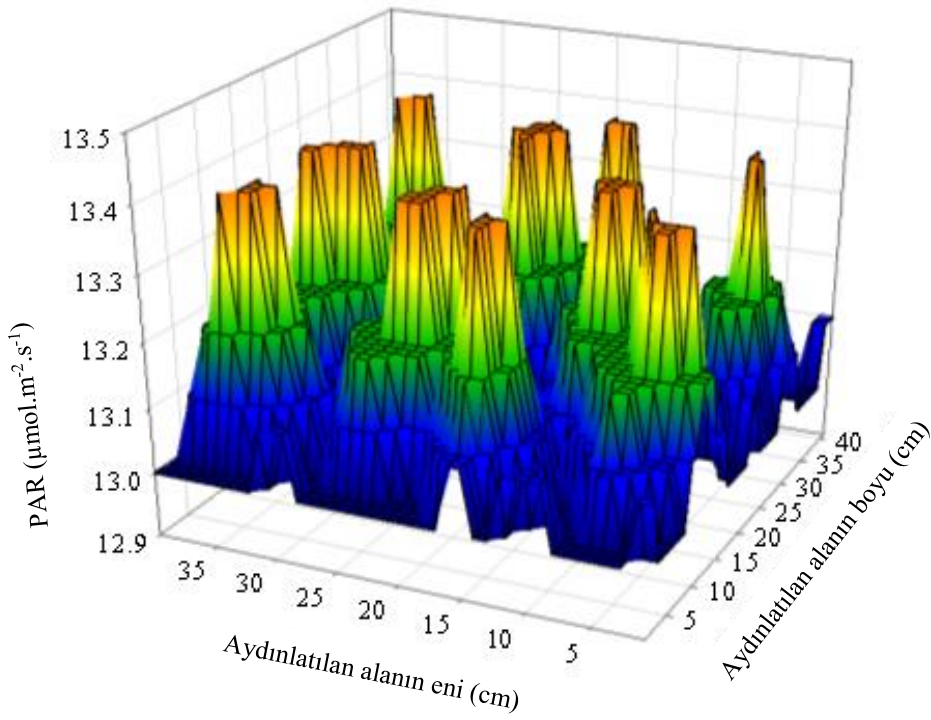
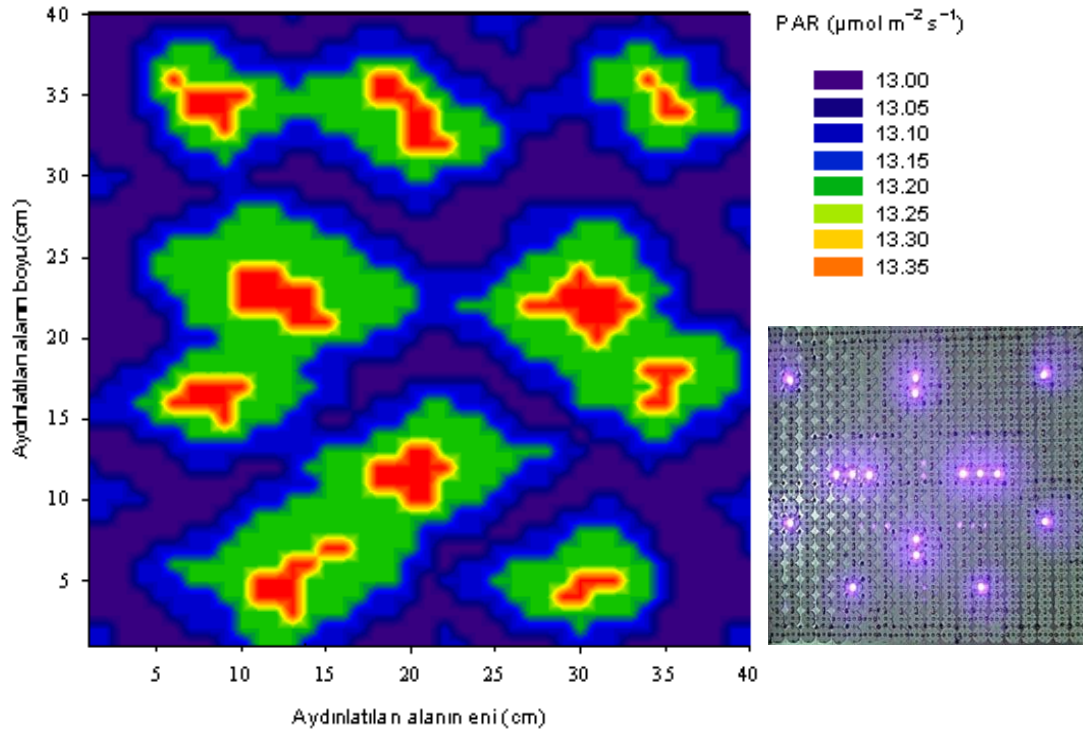
Şekil 4.4. Soğuk beyaz LED grubunun yatay düzlemdeki ışık dağılımı



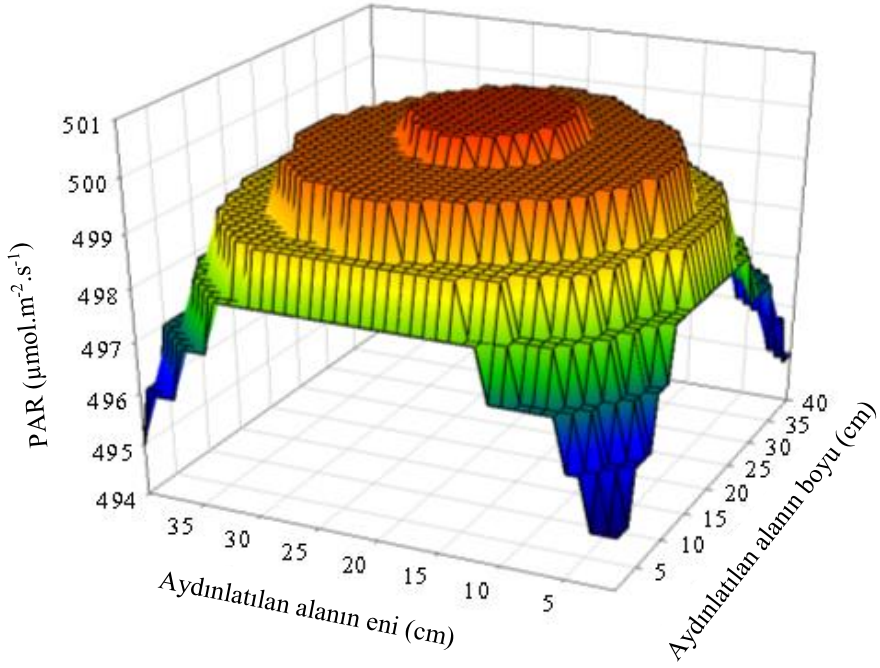
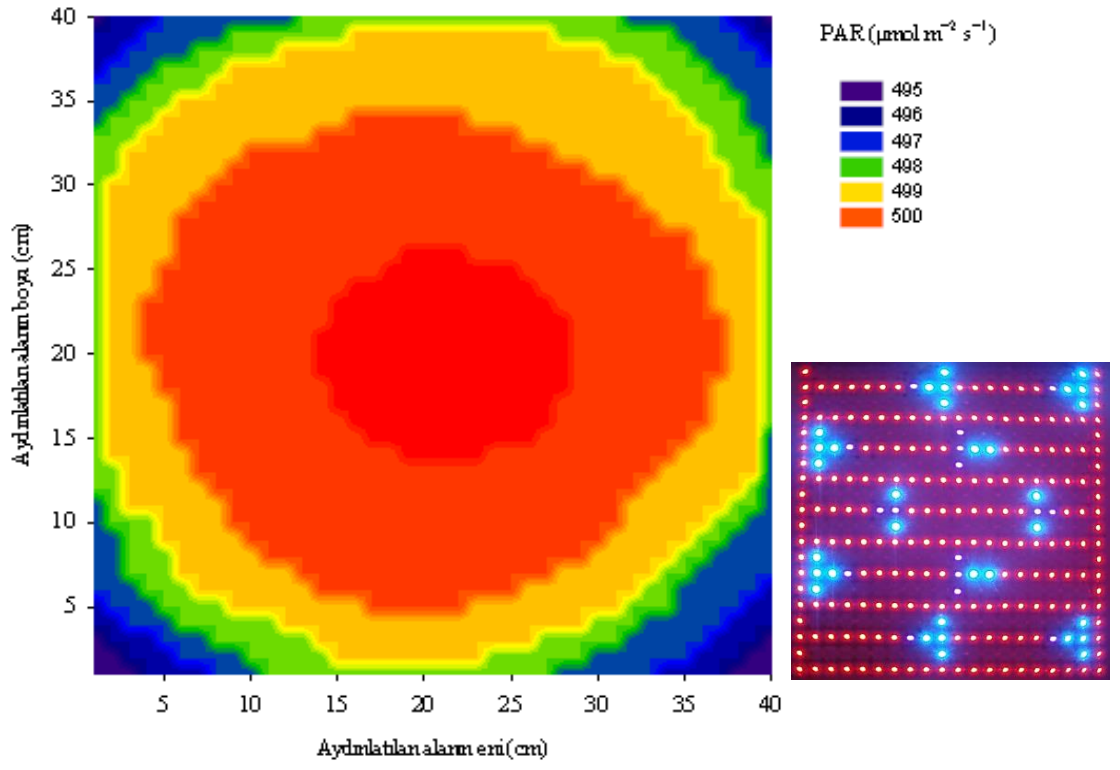
Şekil 4.5. Kırmızı LED grubunun yatay düzlemdeki ışık dağılımı



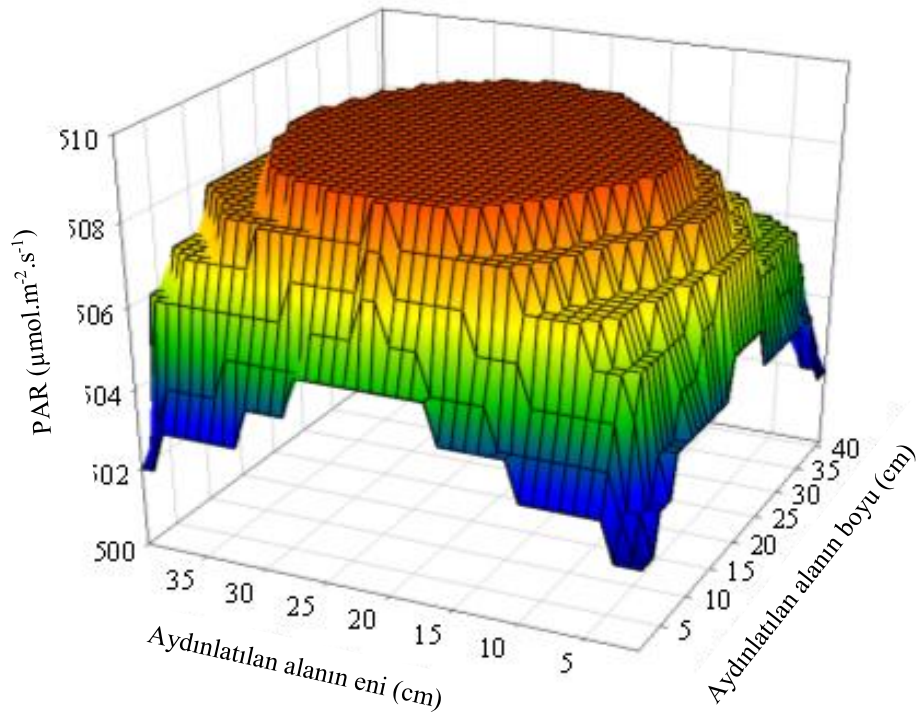
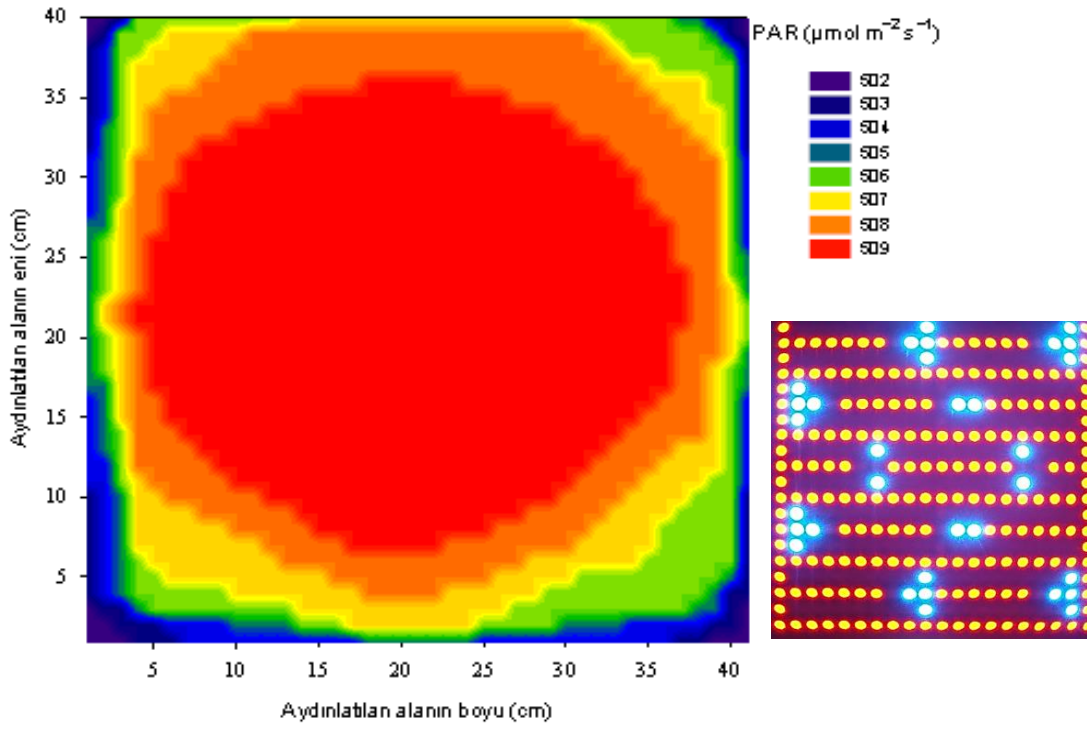
Şekil 4.6. Mavi LED grubunun yatay düzlemdeki ışık dağılımı



Şekil 4.7. Morötesi (UV-A) LED grubunun yatay düzlemdeki ışık dağılımı



Şekil 4.8. Kırmızı-Mavi LED grubunun yatay düzlemdeki ışık dağılımı



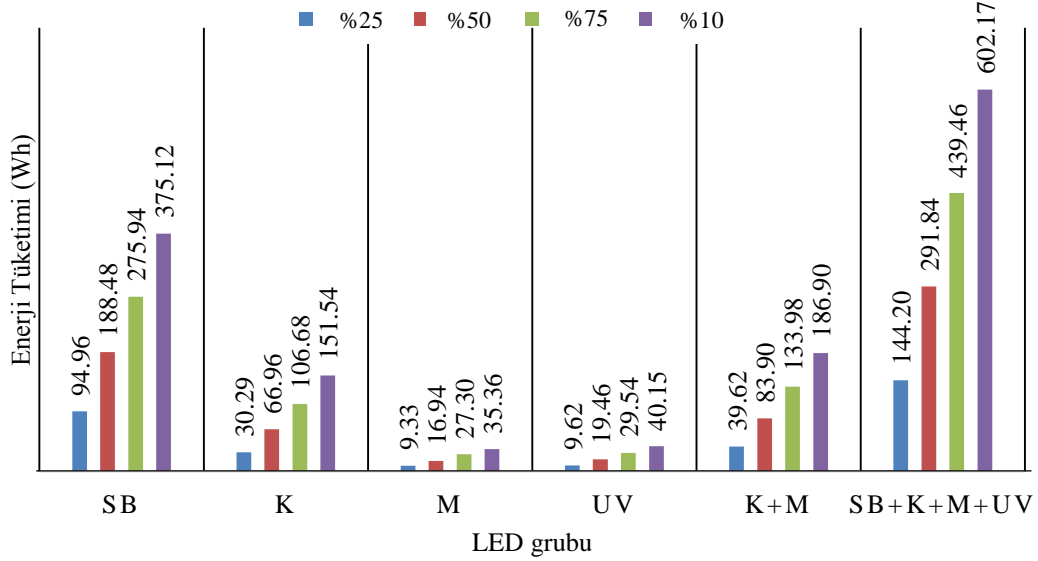
Şekil 4.9. Kırmızı-Mavi-UV-A LED grubunun yatay düzlemdeki ışık dağılımı

4.2. Güç Tüketimi

Lambadaki LED'ler isteğe bağlı olarak ya tek renk dalga boyunda ya da karışık renklerin oluşturduğu dağılımda ışık verecek şekilde ayarlandıklarından, güç tüketimi çalışan LED grubuna göre farklı olmaktadır. Sistemin toplam güç tüketimi ise;

- LED grubu sürücüleri,
- Veri toplama birimi,
- Duyargalar, işaret yükselticileri ve çevirici birimlerin harcadıkları gücün toplamından oluşmaktadır.

LED lamba tek renk LED grupları (Soğuk beyaz-SB, kırmızı-K, mavi-M ve morötesi-MÖ) aktif olduğu zaman ve farklı renk LED grupları (K+M ve SB+K+M+UV) birlikte aktif olduklarında ışık seviyesine bağlı olarak çektikleri akım ve güç tüketimleri de değişmektedir. Şekil 4.10'daki grafikte, LED gruplarının %25-100 arası ışık seviyelerinde güç tüketimleri verilmiştir.



Şekil 4.10. LED gruplarının ışık seviyelerindeki güç tüketimleri

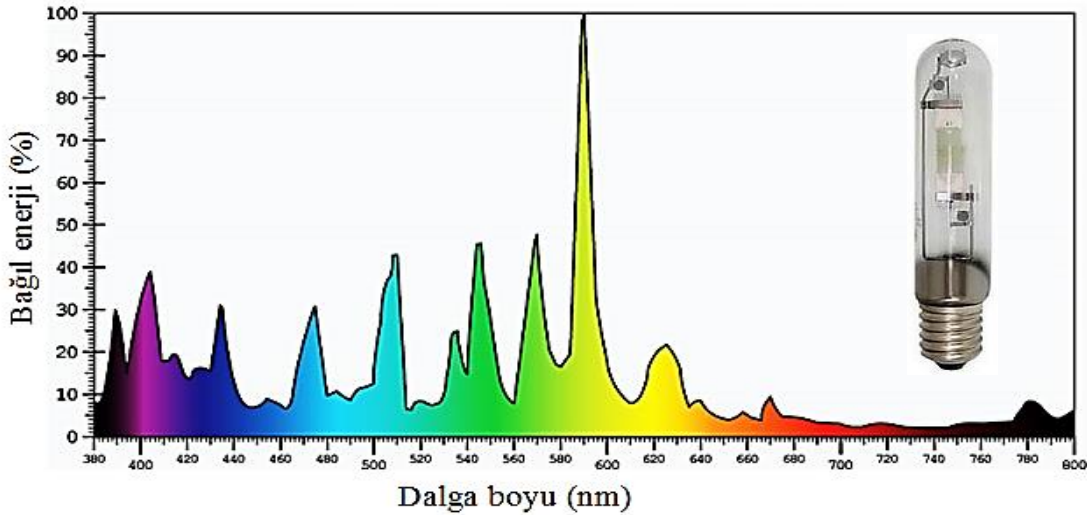
4.3. Bitkisel Üretim Denemeleri

Gerçekleştirilen aydınlatma otomasyon sistemi ile tam yapay şartlarda ve farklı dalga boylu ışıklar altında domates (*Solanum lycopersicum*) fideleri üzerinde üç farklı deneme (D1, D2, D3) yapılmış ve elde edilen sonuçlar incelenmiştir. Denemeler domates tohumları çimlendikten hemen sonra başlatılmış ve her deneme için toplam 20 fide kullanılmıştır. Kurulan denemeler birbirini takip eden 30 günlük dönemlerde gerçekleştirilmiştir. Denemelerde, LED ve MH ışık kaynaklarının verdikleri toplam PAR değeri içindeki oranları Çizelge 4.2'de verilmiştir. Kontrol (K) grubu olarak ise yine aynı çevre şartlarının sağlandığı ayrı bir ortamda 600 W gücündeki metal halojen (MH) lamba

kullanılmıştır (Şekil 4.11). LED ve MH lambaların asılma yüksekliği bitki üzerindeki PAR miktarı $350 \pm 2 \mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ olacak şekilde ayarlanmıştır.

Çizelge 4.2. LED ve MH ışık kaynaklarının verdikleri toplam PAR değeri içindeki oranları

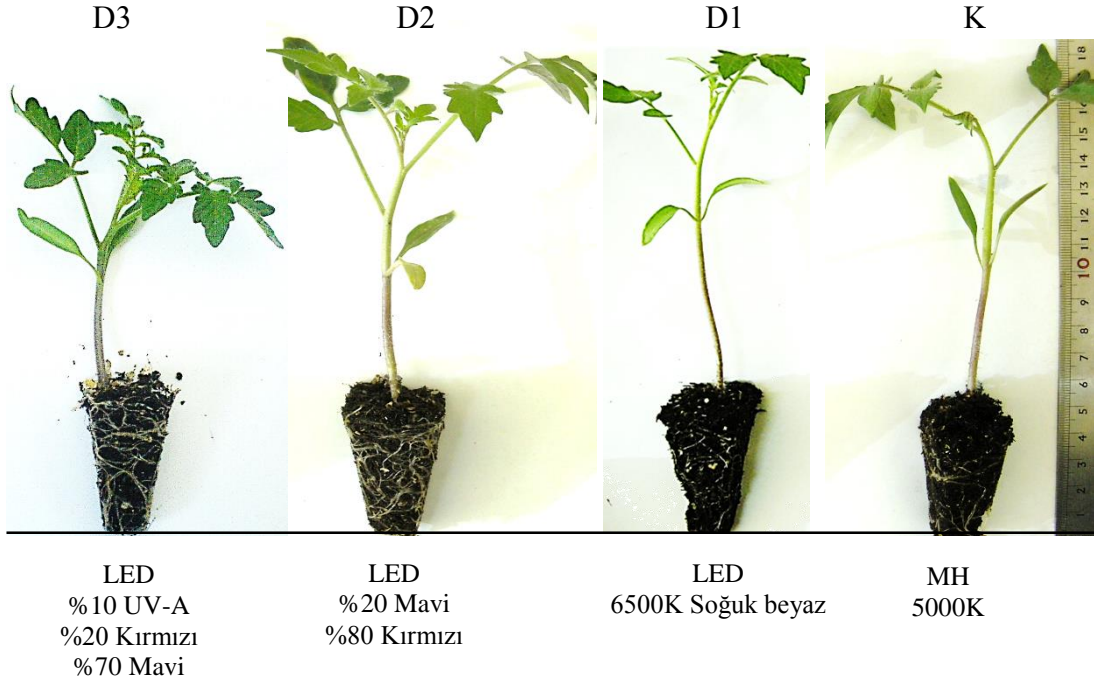
	Işık kaynaklarının toplam PAR değeri içindeki oranları (%)					Toplam PAR ($\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$)
	390-410nm UV-A LED	465-485nm Mavi LED	620-630nm Kırmızı LED	6500 K Gün ışığı LED	Metal halojen lamba (MH)	
D1	-	-	-	100	-	350±2
D2	-	20	80	-	-	350±2
D3	10	70	20	-	-	350±2
K	-	-	-	-	100	350±2



Şekil 4.11. Metal halojen lamba ve tayfdaki bağıl enerji değişimi (Philips 2012)

4.3.1. Fiziksel özelliklerin belirlenmesi

Tüm denemelerde 25°C sıcaklık ve %60 bağıl nemde 16 saat aydınlatma ve 18°C sıcaklık ve %65 bağıl nemde 8 saat karartma uygulanmıştır. D1 denemesinde yalnız görünür bölgedeki soğuk beyaz (6500 K) ışık uygulaması yapılırken, D2 ve D3 denemelerinde sırasıyla 620-630 nm kırmızı, 465-485 nm mavi ve 390-410 nm UV-A dalga boylarında ışık uygulamaları yapılmıştır. Şekil 4.12’de, D1, D2, D3 LED ve 5000 K MH ışığı altında yapılan denemelerden elde edilen örnek fidelere ait resimler verilmiştir. Şekil 4.13’de ise kabin içerisinde gerçekleştirilen soğuk beyaz (SB) LED, kırmızı-mavi (KM) LED denemeleri ile dış ortamda gerçekleştirilen Metal Halide (MH) lamba altındaki deneme resimleri görülmektedir.



Şekil 4.12. D1, D2 ve D3 LED ve MH ışığı altında yetiştirilen fideler

Denemelerde elde edilen fidelerin en, boy ve kalınlık özelliklerinin belirlenmesi amacıyla Mitutoyo marka 0.01 mm hassasiyetli dijital bir kumpastan yararlanılmıştır. Yüzey alanının belirlenmesi için önce yaprakların her biri ölçekli kağıtlara çizilmiş ve bu kağıtlar üzerinden planimetreyle geçilerek yaprak alanları belirlenmiştir (Işık 2003).

Denemeler sonucunda, gövde kalınlığı en büyük olan fideler mavi ışığın daha yoğun olduğu D3 denemesinde 3.12 ± 0.11 mm olarak ölçülürken, en küçük gövde kalınlığı soğuk beyaz ışık altında yetişen D1 denemesindeki fidelerde (2.26 ± 0.18 mm) ölçülmüştür. Boy ve kök uzunluğu en fazla olan bitkiler MH ışık altındaki bitkilerde görülürken, en kısa boylu bitkiler mavi ışığın yoğun olarak kullanıldığı D3 denemesinde elde edilmiştir. Yaprak sayısının en çok ve yaprak alanının en büyük olduğu fideler, %20 mavi ile birlikte %80 oranında kırmızı ışığın verildiği D2 deneme sonuçlarında saptanmıştır. Denemeler sonucu elde edilen bulgular Çizelge 4.3’de verilmiştir.

Çizelge 4.3. Bitkiler üzerinde yapılan fiziksel ölçüm sonuçları

Deneme	Gövde çapı (mm)	Boy uzunluğu (mm)	Yaprak alanı (mm ² /bitki)	Yaprak sayısı (adet/bitki)	Kök uzunluğu (mm)
D1	2.26 ± 0.18	121.42 ± 0.64	427.78	2.81	75.52 ± 1.00
D2	2.70 ± 0.15	116.11 ± 0.62	782.17	3.00	78.68 ± 0.65
D3	3.12 ± 0.11	97.30 ± 0.95	480.55	2.76	67.13 ± 0.85
K	2.59 ± 0.22	131.94 ± 0.95	541.21	2.67	117.20 ± 0.95

SB LED



K+M LED



MH



Şekil 4.13. Soğuk beyaz (SB), Kırmızı-Mavi (KM) LED ve Metal Halide (MH) ışıkları altında yapılan fide denemeleri

Fidelerdeki kuru ve yaş madde miktarları ile kül tayini için 0.0001 g hassasiyetli Sartorius marka hassas terazi kullanılmıştır. Deneme örneklerinin nem tayinlerinin yapılabilmesi için hacmi 120 lt olan Nüve FN 500 marka etüv kullanılmış ve örnekler 105°C sıcaklıkta 6 saat süre ile etüvde bırakılmıştır. Kül tayini için ise Nüve MF 100 marka bir kül fırınından yararlanılmış ve örnekler 550°C sıcaklıkta bekletilmiştir. Etüvden tartım için çıkarılan örneklerin dışarıdan nem çekmeden soğutulması için desikatörden yararlanılmıştır.

Örneklerin toplam ve kuru madde ağırlık değerleri ölçüldükten sonra aşağıdaki eşitlikler kullanılarak yaş baza göre nem içeriği tespit edilmiştir (Işık ve Alibaş 2000).

$$W_s = W_t - W_m \quad (4.1)$$

$$\%N_{yb} = \frac{W_s}{W_s + W_m} \times 100 \quad (4.2)$$

Eşitliklerde; W_s örnekteki su ağırlığı (g), W_t örneğin toplam ağırlığı (g), W_m örneğin kuru madde ağırlığı (g), $\%N_{yb}$ yaş baza göre nem içeriği (%) dir.

Örneklerdeki % olarak kül, kuru ve organik madde içeriklerinin tayini için ise aşağıdaki eşitlikten yararlanılmıştır:

$$\%N_k = \frac{W_k}{W_m} \times 100 \quad (4.3)$$

$$\%N_m = \frac{W_m}{W_t} \times 100 \quad (4.4)$$

$$\%OM = \%N_m - \%N_k \quad (4.5)$$

Eşitliklerde; $\%OM$ organik madde içeriği (%), W_k kül ağırlığı (g), $\%N_m$ kuru madde içeriği (%) ve $\%N_k$ kül içeriği (%)’dir.

LED’ler arasında yapılan ölçümler sonucunda kuru madde içeriği kırmızı ışığın daha yoğun olduğu D2 denemesinde (%19.37) en yüksek seviyede olurken, bunu soğuk beyaz gün ışığı veren D1 (%17.47) ve mavi-morötesi ışığın daha yoğun olduğu D3 (%13.51) izlemiştir. Pinho vd (2007), camlı sera koşullarında marul (*Lactuca sativa var. crispa L. ‘Frillice’*) bitkisi üzerinde, LED tabanlı tamamlayıcı 460 nm mavi ve 630 nm kırmızı aydınlatma sistemleri ile yaptıkları denemelerde de kırmızı-turuncu LED’lerin biyokütle birikiminin artırılmasında etken olduğu sonucuna ulaşmışlardır. Öte yandan kontrol (K) grubundaki MH ışığına en yakın ölçüm sonuçları D1 denemesindeki soğuk beyaz ışık veren LED grubu altındaki fidelerde bulunmuştur. Organik madde içerikleri ise sırasıyla D2 (%13.61), K (%8.97), D1 (%7.85) ve D3 (%6.18) olarak tespit edilmiştir. Çizelge 4.4 bitkilerin toplam ve kuru ağırlık, kül, nem, kuru madde ve organik madde miktarlarına ait sonuçları göstermektedir.

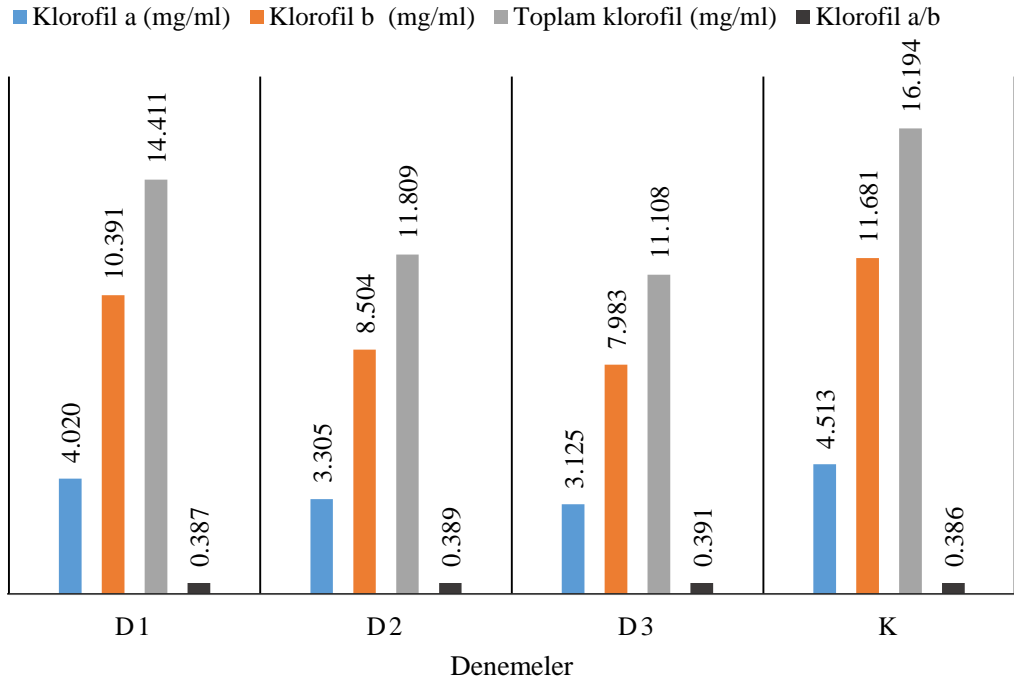
Çizelge 4.4. Örneklere ait toplam ve kuru madde ağırlıkları ile kül, kuru madde ve organik madde içerikleri

Deneme	Toplam ağırlık, W_t (g)	Kuru madde ağırlığı, W_m (g)	Kül içeriği, $\%N_k$ (%)	Kuru madde içeriği, $\%N_m$ (%)	Organik madde içeriği, $\%OM$ (%)
D1	1.66	0.29	9.62	17.47	7.85
D2	1.91	0.37	5.76	19.37	13.61
D3	2.59	0.35	7.33	13.51	6.18
K	3.80	0.64	7.87	16.84	8.97

4.3.2. Klorofil tayini

LED ışıkları altında yapılan analizlerden biri de fidelerdeki klorofil tayinidir. Klorofil değerlerinin elde edilmesi amacıyla bitkiler laboratuvar şartlarında analizlere tabi tutulmuşlardır. Analizde 100 ml'lik beherlerin içine taze yaprak örneklerinden tesadüfen alınan 10 adet yaprağın orta kısmından 0.25 g örnek alınmış ve bunun üzerine spatül ucu ile CaCO_3 ilave edildikten sonra üzerine 25 ml aseton konularak homojenizatörde 3-4 dakika parçalanmıştır. Daha sonra 50 ml'lik balon jöjeye beyaz bantlı filtre kağıdı yardımı ile süzölmüş ve 50 ml'ye aseton ile tamamlanmıştır. Hızlı bir şekilde spektrofotometrede klorofil a için 663 nm ve klorofil b için 645 nm dalga boyunda okumalar yapılmıştır. Okumalar sonucu elde edilen değerler 20.2 sabiti ile çarpılarak klorofil a ve klorofil b değerleri mg.ml^{-1} olarak hesaplanmıştır. Analiz sırasında yapılan tüm işlemler yarı gölgede yapılmıştır (Williams 1984). Klorofil analizleri için Shimatsu marka, UV-120 model ultraviyole ve görünür bölge spektrofotometresi kullanılmıştır.

D1, D2, D3 denemeleri ile MH lamba altındaki kontrol grubundan elde edilen klorofil a/b değeri yaklaşık 1/3 oranındadır. Analiz sonuçlarına göre en yüksek klorofil a (4.513 mg.ml^{-1}), b ($11.681 \text{ mg.ml}^{-1}$) ve toplam klorofil miktarı ($16.194 \text{ mg.ml}^{-1}$) MH ışığı altındaki fidelerde bulunmuştur. MH lamba grubuna (K) en yakın değerler ise D1 altında görölmüştür. Bunun nedeni olarak her iki grubun verdiği ışığın renk sıcaklığının benzer aralıkta olması ve görünür bölgede klorofil pigmentinin daha etkin olduğu mavi ve kırmızı dalga boylarını içermesinden kaynaklandığı söylenebilir. Buna göre klorofil a ve b miktarı mavi ve kırmızı ışık bölgelerinde daha fazla olmaktadır. Mavi ışık bölgesinde klorofil a için en yüksek ışık absorpsiyonu 429 nm, klorofil b için 453 nm dalga boyunda gerçekleşirken, kırmızı ışınlar bölgesinde, klorofil a için 660 nm klorofil b için 642 nm dalga boylarında gerçekleşmektedir. Klorofil bakımından en zayıf değerler ise D3 denemesindeki fidelerde ölçölmüştür. Fidelerdeki klorofil a, b, a/b ve toplam klorofil miktarlarının analiz sonuçları Şekil 4.14'te verilmiştir.



Şekil 4.14. Klorofil a, b, a/b ve toplam klorofil analiz sonuçları

4.3.3. Yaprak renk değişim tayini

Yaprak renk değişimlerinin tayini için *L*, *a*, *b* değerleri tespit edilmiştir. Deneme materyallerinin bu renk özelliklerinin belirlenmesi amacıyla CR 400 (Konica-Minolta, Osaka, Japan) marka bir renk ölçüm cihazından yararlanılmıştır. Cihazın gösterdiği “L” değeri rengin parlaklığını vermektedir. Bu değer renk beyaz ise 0’ı siyah ise 100’ü göstermektedir. Cihazda okunan “a” değeri rengin kırmızılık ya da yeşillik değerini vermektedir. Renk kırmızılığa kaydığında cihazda pozitif değerler, yeşillığe kaydığında ise negatif değerler okunmaktadır. Buna göre, cihaz tam kırmızıda +50, tam yeşilde ise -50 değerini göstermektedir. Cihazda okunan “b” değeri ise rengin sarılık ya da mavilik oranını vermektedir. Cihaz tam sarı renkte +50, tam mavi renkte ise -50 değerini göstermektedir. Renk ölçümleri sağlıklı ve deformasyona uğramamış 3 yaprak üzerinden yapılmış ve bu ölçümlerin ortalamaları alınmıştır.

Yaprak rengi için yapılan analiz sonuçları Çizelge 4.5’ de verilmiştir. Buna göre en yüksek “L” değeri 35.157 ile D3 denemesinde, en düşük 32.902 ile D1 denemesinde elde edilmiştir. D1, D2, D3 ve K denemelerinde yeşil renk değişimini ifade eden “a” değerleri sırasıyla -6.630, -8.409, -10.317 ve -6.856 olarak bulunmuştur. Denemelerde elde edilen “b” değeri ise en yüksek D3 uygulamasında (11.659) ve en düşük D1 uygulamasında (6.510) belirlenmiştir. Deneme sonuçlarına göre mavi ağırlıklı ışık altında yetiştirilen fidelerdeki yaprak renginin diğerlerine göre daha koyu yeşil tonda olduğu buna karşılık gün ışığı altında yetişenlerde ise daha açık tonda olduğu görülmüştür.

Çizelge 4.5. LED ve MH ışık uygulamalarının yaprak renk değişimlerine etkisi

Denemeler	Yaprak renk değişimi		
	L	a	b
D1	32.902	-6.630	6.510
D2	33.558	-8.409	10.489
D3	35.157	-10.317	11.659
K	34.685	-6.856	8.651

5. SONUÇLAR ve ÖNERİLER

LED aydınlatma kaynaklarının verimlerindeki hızlı artış, günlük hayatta olduğu kadar tarımsal üretimdeki aydınlatma uygulamalarında da kullanılabilirliklerini gündeme getirmiş ve bu konudaki araştırmalar hız kazanmıştır. Özellikle, kuzey Avrupa (Hollanda, Finlandiya vb) ve uzakdoğu Asya ülkelerinde (Japonya, Güney Kore, Tayvan) bitkisel üretim amaçlı LED aydınlatma sistemlerinin geliştirilmesi üzerine araştırmalar yapılmaktadır.

LED'lerin aydınlatma alanındaki kısa tarihlerine oranla etkinlik faktörleri çok hızlı bir gelişim göstermiştir. Günümüzde, sıcaklık ve modül halindeki LED kırımı için 250 lm.W^{-1} etkinlik faktörü seviyelerine ulaşıldığı bildirilmektedir (Cree inc. 2012). LED bitki yetiştirme lambaları bugün ilk yatırım masrafları bakımından diğer lambalarla karşılaştırıldığında dezavantajlı görülmektedir. Fakat etkinlik faktörlerinin yüksek olması, iyi ısı tasarımıyla yüksek kullanım ömrüne sahip olabilmeleri, küçük boyutları, dar band dalga boyunda ışık verebilmeleri gibi pek çok üstünlükleri sayesinde 2020 yılına kadar genel aydınlatma uygulamalarında önemli bir paya sahip olacaklarını işaret etmektedir. Ancak, LED'lerin kullanım alanlarının tarımsal üretim alanlarında yaygınlaşması, ışık verimlerinin artırılmasından ve maliyetlerinin düşürülmesinden geçmektedir. Bu yüzden özellikle LED üreticilerinin bu iki konu üzerinde daha çok mesafe almaları gerekmektedir.

LED'ler, geleneksel ışık kaynakları ile kıyaslandığında boyutları küçüktür, daha az enerjiye gereksinim duyarlar, belirli dalga boylarında ışık verirler, ısı üretimleri az, ışık yoğunluğu ayarlanabilir ve gün ışığına yakın kalitede ışık verirler. Ayrıca LED'lerin bünyesinde, cıvalı ve sodyum içeren lambalar gibi çevreyi kirleten gazlar bulunmamaktadır. Düşük elektrik tüketimi dolayısıyla da CO₂ miktarını azaltıcı yönde etkisi olmaktadır. LED'ler bu özellikleri nedeniyle doku kültürü ve büyüme odaları gibi kontrollü bitki büyüme ortamları için mükemmel derecede faydalar sağlayabilecek ışık kaynaklarıdır. Yetiştirme ortamlarında bu tür çevre dostu aydınlatma kaynaklarının kullanımının artmasının çevre sağlığının korunması adına katkıları olacaktır.

Yapay aydınlatmada kullanılan ark, flüorışıl ve akkor telli lambalar gibi geleneksel ışık kaynakları, elektromanyetik tayfin görünür bölgesinin tamamı ile yakın kızıl ötesi ve morötesi bölgelerde de küçük bir kısım ışığı yayarken, LED lambaları tek renk ışık yaymaktadırlar. Bu özellik, bitki büyümesinde ve gelişmesinde etkin rol oynayan sadece mavi ve kırmızı dalga boylu bölgelerdeki ışığın bitkiye ulaştırılmasına olanak sağlamaktadır. Kontrollü çevre ortamlarında ve yapay ışık altında bitki yetiştirmek için LED lamba kullanmak elektrik enerjisinin çok az kayıpla ışık enerjisine çevrilebilmesinden ötürü geleneksel yapay ışık kaynaklarına oranla önemli derecede avantajlar sağlamaktadır. Özellikle yeterli ışık alamayan ve dolayısıyla seracılığın kısıtlı yapıldığı bölgelerde az enerji harcayan LED aydınlatma sistemlerinin kurulması, bu bölgelerde de seracılığın gelişebilmesine önemli katkılar sağlayacaktır. Ayrıca tarımsal amaçlı farklı aydınlatma uygulamalarında kullanımının yaygınlaşması, ülkemiz tarımsal alanlarında enerji kullanımının azaltılması yönünde de önemli katkıları olacaktır.

Günümüzde kullanılan yüksek ışık akılı LED'lerin doku kültürü uygulamalarında, bitki büyütme odalarında (Growing Chamber) ve sera yetiştiriciliğinde gerekli olan fotosentez için etkili ışınının üretilmesinde yeterli olabilmektedir. Berkovich vd (2005) yaptıkları çalışmada, farklı dalga boylarında ve değişen ışık yoğunluklarında LED ışık kaynakları kullanmışlar ve LED'lerin dar band aralığında ışık verebilmeleri nedeniyle, farklı aydınlatma koşullarında bitkilerin tepkisini belirlemede en uygun ışık kaynakları olduklarını bildirmişlerdir. Öte yandan, Yeh ve Chung (2009) klorofil moleküllerinin mavi ve kırmızı dalga boylarını daha iyi soğurdıklarını, buna karşılık yeşil ve sarı dalga boylarını ise yansıdıkları veya aktarıldıkları için fotosentezde önemli olmadıklarını bildirmektedir. Bu durum, bitkilere verilen dalga boylarının kısıtlanması ve beyaz ışık ile bitkilerin büyümelerinin gerçekleştirilmesi anlamına gelmektedir. Bunun sonucu olarak da, LED'ler yalnızca istenilen dalga boylarını verebilme özelliğine sahip olduklarından, beyaz ışığın içinde bulunan ve fotosentez için gereksiz olan dalga boylarının kullanımlarını ortadan kaldırarak bitki büyüme lambalarının gereksinim duyduğu güç miktarını azaltmaktadırlar.

UV-A bölgesi ışık, bitkilerin tomurcuklarında ve tepe noktalarındaki büyüme hücrelerinin bölünmesi sırasında kromozomlara etkili olmakta, onları değişikliğe uğratarak mutasyon meydana getirip, aynı bitki üzerinde farklı karakterde sürgünlerin oluşmasına ve böylece yeni çeşitlerin elde edilmesine sebep olmaktadır. Fakat öte yandan bu ışık, bitkilerde tüylenme, diken ve mantar tabakası oluşumunu da teşvik etmektedir. Bu nedenlerden ötürü, geliştirilen otomasyon sisteminde UV-A bölgesinde ışık veren yüksek güçlü LED'ler kullanılarak bu ışığın bitkiler üzerindeki etkilerinin araştırılması üzerine çalışmalar yapılmasına olanaklar sunulmuştur. UV-A ışık, mavi, kırmızı ya da gün ışığı ile birlikte kullanıldığında bitki üzerinde olumlu etkileri olmaktadır.

LED lambadaki farklı renklerde ışık veren LED gruplarının aydınlatma homojenliği ve radyometrik analiz sonuçları elde edilmiştir. Doğrusal LED dizilişi modelinin kullanıldığı deneme sonuçlarından yüzey üzerinde ölçülen ışınımsal aydınlık değerlerinin merkezden dışa uzaklaştıkça azaldığı ve aydınlatma yüzeyinin çok büyük bir kısmında homojen iken sadece kenarlarda farklılık olduğu tespit edilmiştir.

Yapılan çalışmada lambada kullanılan 1 W, 350 mA LED'lerin ısıl analizi yapılmış ve uygun alüminyum soğutucular kullanılarak sıcaklık değerinin 46.83°C'ye düşürülebildiği görülmüştür. Elde edilen sıcaklık değeri yapılan benzer çalışmalarda elde edilenlerle de örtüşmektedir. Bu sıcaklık değeri genelde üreticiler tarafından önerilen 30 000 saat ömür için 85 °C değerinin çok altındadır. Tasarımda kullanılan alüminyum soğutucu ve kanallarının boyutlandırılmasının bu düşük sıcaklık değerinin elde edilmesinde etkisi görülmektedir. Buradan LED lambadan istenilen ışık akısının elde edilebilmesi ve uzun ömürlü olması için gerekli şartların sağlandığı sonucuna ulaşılmıştır.

LED modül ve LED'li aydınlatma armatürlerinin performanslarının ölçülmesi konusunda yalnızca ABD'de yayınlanan IES LM 79-08 kodlu standart mevcuttur. Bu standartta da, ölçümlerin yapıldığı ortam sıcaklığı 25°C olarak belirlenmektedir. Teknik bir rapor olan CIE 127:2007 de, sadece "tekil" LED kırmıklarının 25°C ortam sıcaklığındaki performans ölçümleri için düzenlenmiştir. Fakat LED'lerin gerçek uygulamalardaki çalışma sıcaklıkları 25°C'den çok daha yüksek olarak gerçekleşmektedir. Dolayısıyla mevcut olan bu dokümanlar LED'lerin gerçek çalışma sıcaklıklarında geçerli olabilecek bir ölçüm yöntemi önermemektedir. Sıcaklığın artışı,

LED'lerin ışık akılarını, renksel özelliklerini ve ömürlerini negatif yönde etkilemektedir. Aynı şekilde üreticiler de beyan ettikleri katalog verilerinde, 25°C ortam sıcaklığını temel aldıkları için, doğrudan bu veriler ile yapılan armatür tasarımları, teorik olarak istenilen aydınlatma ölçütlerini sağlasalar da, pratikte hedeflenen değerlere ulaşamamaktadır. Diğer yandan, birçok ışık noktasından oluşan LED aydınlatma armatürlerinin optik özellikleri de, ölçümlerde belli kabullerle noktasal kabul edilebilen geleneksel ışık kaynaklı armatürlerden farklıdır. Aydınlatma kalite ölçütlerinin sağlanmasında kesinlikle sahip olunması gereken armatür fotometrik verilerinin elde edilmesi amacıyla şu an geleneksel ışık kaynakları için tanımlanmış ölçüm yöntemlerinin geçerliliği de, sorgulanması ve acilen çözümlenmesi gereken bir sorundur. Türk Standartları Enstitüsü (TSE) uluslararası standartları ulusal koşullara uyarlamakla ve bu tür sorunların çözümünüyle yükümlü bir kuruluştur. TSE bünyesinde oluşturulmuş olan "MTC 33-Aydınlatma Armatürleri ve İlgili Donanımlar" başlıklı ayna komitede, LED ve LED ışık kaynaklı armatürlerin değerlendirilmesi ve uluslararası gelişmelere paralel olarak Türkiye'de de ilgili standartların eş zamanlı olarak yayımlanması, piyasanın zamanında ve doğru olarak düzenlenmesi açısından acil yapılması gereken çalışmalardan biridir.

Aydınlatma otomasyon yazılımı, NI LabVIEW2010 (ver.10.0) yüksek performanslı bilimsel ve mühendislik uygulamalarında, ölçme ve otomasyon için tasarlanan G programlama dili kullanan grafiksel program ortamında geliştirilmiş, sade arayüzü ile kullanıcı dostu olacak şekilde tasarlanmıştır. LabVIEW, test, ölçüm, cihaz kontrolü, veri işleme ve veri analizi süreçlerini gerçek zamanlı veya benzetim modeli olarak hızlı şekilde yapılma olanağı sunabilen pek çok endüstriyel uygulamada tercih edilen bir geliştirme ortamıdır. Ayrıca sisteme ilave veri toplama modülleri ve duyargaları eklenerek birden fazla sera veya yetiştirme odasının aydınlatma uygulamaları mümkün olacak şekilde de genişletilebilmektedir. Bu durum, sistemin esnek ve işlevselliğinin artırılabilir olması açısından önemlidir. Öte yandan, LED yetiştirme lambalarının bitkiler üzerindeki etkilerinin incelenmesi günümüzde pek çok bilim çevresinin ilgilendiği popüler araştırma konularından biridir. Yapılan bu çalışma, LED ışığının bitkiler üzerindeki etkilerine dair gözlem ve inceleme fırsatlarını sunması ve yapılacak araştırma sonuçlarının bilime katkılar sağlaması açısından önemlidir. Aydınlatma otomasyon yazılımından elde edilebilecek faydalar ve yapılabilecek uygulamalar aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Lamba, yüksek güçlü kırmızı, mavi, UV-A ve soğuk beyaz LED ışıklarını tek veya karışık olarak verebilmektedir.
- Her renk ışık seviyesi %0-100 arasında ve %1 adımlarla ayarlanabilmektedir. Lambanın 20 cm yükseklikten verdiği en yüksek değer olan 82 000 lx dikkate alınacak olursa, her %1'lik seviye adımı 820 lx aydınlık şiddetine eşit olmaktadır. İlave olarak, en yüksek PAR değeri olan 1784.5 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ için yaklaşık 18 $\mu\text{mol.m}^{-2}.\text{s}^{-1}$ 'ya eşit olmaktadır.
- Sistem otomatik ve el ile aydınlatma kontrol seçimlerine sahip olup, özellikle örtü altı yetiştiriciliğinde, ortamdaki eksik PAR miktarını hesaplayarak lamba ışık seviyelerini otomatik olarak ayarlayabilmekte ve ortamdaki aydınlık seviyesini belirlenen sınır değerler arasında tutabilmektedir.

- Araştırmacılar için yapay ortamlarda, farklı dalga boyları ve ışık akısı altında bitkiler üzerinde araştırmalar yapmak amacıyla kullanılabilir özelliktedir.
- Fotoperiyodik ve fotosentetik uygulamalarda farklı dalga boyu ve ışık şiddeti isteklerine göre farklı aydınlatma programları hazırlanıp kaydedilebilir. Böylece içinde pekçok aydınlatma programının yer aldığı bir ışık-bitki program kütüphanesi oluşturulabilmektedir. Örneğin, sebze bitkileri, süs bitkileri ve doku kültürü uygulamaları için farklı zamanlarda kullanım için ayrı aydınlatma programları oluşturulabilir ve bu kütüphane içine kaydedilebilmektedir.
- Tüm ortam ve ışık verilerindeki değişim, yazılım ana penceresinden eş zamanlı olarak izlenebilmekte ve kayıt altına alınabilmektedir. Alınan verilerin yazıcıya gönderilerek çıktısı alınabilmekte veya MS Excel formatına çevrilebilerek saklanması sağlanabilmektedir.

6. KAYNAKLAR

- AGOSTON, G. A. 1987. Color Theory and Its Application in Art and Design, Second Completely Revised and Updated Edition, Springer-Verlag, Berlin, 286 pp.
- AKBULUT, M. ve GÜL, Ö. 2011. LED’li Işık Kaynaklarının Karakteristiklerini Belirlemeye Yönelik Ölçmeler. V. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu Bildiriler Kitabı (pdf dosyası). [Http://www.emo.org.tr/ekler/bcbc16e31fe69c6_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/bcbc16e31fe69c6_ek.pdf) (Erişim tarihi: Mart 2013).
- ANDERSSON, N.E. 1990. Effects of Level and Duration of Supplementary Light on Development of Chrysanthemum. *Scienta Horticulturae* 44: 163-169.
- ANDİÇ, C. 2002. Tarımsal Ekoloji. Atatürk Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Notları, Erzurum, 293 ss.
- ASAE, 1994, Plants: Greenhouses, Growth Chambers and Other Facilities. ASAE Fundamentals Handbook (SI).
- ASAE, 2005. Lighting Systems for Agricultural Facilities. ASABE Standards, ASAE EP 344.3, USA.
- ASHRAE, 1991. Design for Plant Facilities: Environmental Control for Animals and Plants. Handbook, HVAC Applications.
- AVERCHEVA, O.V., BERKOVICH, Y.A., EROKHIN, A.N., ZHIGALOVA, T.V., POGOSYAN, S. I. and SMOLYANINA, S.O. 2009. Growth and Photosynthesis of Chinese Cabbage Plants Grown Under Light-Emitting Diode-Based Light Source. *Russian Journal of Plant Physiology*, 56 (1), 14–21.
- AVGAN, A. ve ÖZCAN, C. 2011. LED Aydınlatma Çiplerinde Isıl ve Yapısal Dayanım Analizleri. AKRO R&D Ltd.
- AYBAK, H.Ç. 2002. Biber Yetiştiriciliği. Hasad Yayıncılık, İstanbul, 157 ss.
- AYDINŞAKİR, K., ÖZKAN, H., KARAGÜZEL, Ö. ve KAYA, A.S. 2005. Farklı Işık Kaynaklarının Altınbaşak (*Solidago x hybrida* ‘Tara’)’da Verim ve Kalite Özelliklerine Etkisi. *Akdeniz Üniversitesi Zir. Fak. Dergisi*, 18(3): 377-384.
- BAŞÇETİNÇELİK, A. 1977. Türkiye’de Yerli Olarak Yapılan Elektriksel Işık Kaynaklarının Tarımsal Amaçlarla İlgili Aydınlatma Karakteristikleri Üzerinde Bir Araştırma. Doktora Tezi, Ç.Ü. Ziraat Fakültesi Tarımsal Mekanizasyon Bölümü, Adana, 172 ss.
- BAŞÇETİNÇELİK, A. ve TEZER, E. 1983. Tarımda Kullanılan Yapay Işık Kaynakları. Çukurova Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları: 173, Yardımcı Ders Kitabı: 5, Adana.

- BERKOVICH, Y.A., KRIVOBOK, N.M., SMOLYANINA, S.O. and EROKHIN, A.N. 2005. Kosmicheskie oranzherei: nastoyashchee i budushchee (Space Greenhouses: Now and in Future), Moscow.
- BICKFORD, E.D. and DUNN, S. 1973. Lighting for Plant Growth. Kent State University Press. USA, 221 pp.
- BISHOP, R.H. 2006. LabVIEW 8 Express Student Edition, Prentice Hall, New Jersey, 139-174. USA, 619 pp.
- BOHREN, C.F. 2006. Fundamentals of Atmospheric Radiation: An Introduction with 400 Problems. (Physics Textbook) Wiley-VCH, 490 pp.
- BOURGIN, D. 1994. Color Spaces FAQ. [Http://www.cica.indiana.edu](http://www.cica.indiana.edu) (Erişim tarihi: Şubat 2011).
- BRAZAITYTĖ, A., DUCHOVSKIS' P., URBONAVICIŪTĖ, A., SAMUOLIENĖ, G., JANKAUSKIENĖ, J., KAZENAS, V., KASIULEVICIUTE-BONAKERE, A., BLINIKAS, Z., NOVICKOVAS, A., BREIVE, K. and ZUKAUSKAS, A. 2009. After-effect of light-emitting diodes lighting on tomato growth and yield in greenhouse. Scientific Works of the Lithuanian Institute of Horticulture and Lithuanian University of Agriculture, 28 (1): 115-126.
- BRIGGS, W.R. and HUALA, E. 1999. Blue-Light Photoreceptors in Higher Plants. *Annu. Rev. Cell Dev. Biol.* 15:33-62.
- BRUGGINK, G.T. and HEUVELINK, E., 1987. Influence of light on the growth of young tomato, cucumber and sweet pepper plants in the greenhouse: Effects on relative growth rate, net assimilation rate and leaf area ratio. *Scientia Hort.*, 31: 161- 174.
- BRUGGINK, G.T., 1992. A comparative analysis of the influence of light on growth of young tomato and carnation plants. *Scientia Hort.*, 51 :71-81.
- BULA R.J., MORROW R.C., TIBBITTS T.W., BARTA D.J., IGNATIUS R.W. and MARTIN T.S. 1991. Light-emitting diodes as a radiation source for plants. *HortScience*. 1991 Feb.; 26 (2):203-5.
- BULUT, Ö., SAĞDIÇ, D. ve KORKMAZ, S. 2000. Lise Biyoloji 3; 3. Baskı, Milli Eğitim Basımevi, İstanbul, 205 ss.
- CASAL, J.J. 2000. Phytochromes, Cryptochromes, Phototropin: Photoreceptor Interactions in Plants. *Photochem. Photobiol.*, 71:1-11.
- CHALLA, H. and SCHAPENDONK, A.H.C.M. 1984. Quantification of effects of light reduction in greenhouses on yield. *Acta Horti.*, 148: 501–510.

- CHRISTENSEN, A., HA, M. and GRAHAM, S. 2007. Thermal Management Methods For Compact High Power LED Arrays. Seventh International Conference on Solid State Lighting, Proc. of SPIE. USA.
- CIE, 2007. International Commission on Illumination. Technical Report Measurement of LEDs. CIE 127: 2007, 2nd Edition.
- CIOLKOSZ, D. 2008. Design daylight availability for greenhouses using supplementary lighting, Biosystems Engineering, 100:571-580. Springer-Verlag, Berlin.
- CREE INC. 2012. XLamp LED teknik dökümanı, Cree Firması resmi web sayfası: <Http://www.cree.com/led-components-and-modules/products/xlamp>. (Erişim tarihi: Kasım 2012).
- ÇAĞLAYAN, N. ve ERTEKİN, C. 2010. Using of Led Lighting Technologies to Substitute Traditional Lighting Systems in Greenhouses. Ecological aspects of exploitation of agricultural vehicles and machines. International Conference, Warsaw, Poland.
- ÇAĞLAYAN, N. ve ERTEKİN, C. 2011. Bitkisel Üretim İçin Led Yetiştirme Lambalarının Kullanımı. Uluslararası Katılımlı I. Ali Numan Kıraç Tarım Kongresi ve Fuarı Eskişehir, Türkiye.
- ÇOLAK, İ., SEFA, İ., BAYINDIR, R. ve DEMİRTAŞ, M. 2007. Güneş Enerjisi Kaynaklı LED Armatür Tasarımı. *Politeknik Dergisi*, 10 (4): 347-352.
- DE KONING, A.N.M. 1994. Development and Dry Matter Distribution in Glasshouse Tomato Quantitative Approach. Thesis, Wageningen.
- DENİZ, A. ve ERGÜNEŞ, G. 2004. Bitki Gelişimi ve Enerji Ekonomisi Açısından Fotoperiyodik Aydınlatma Yöntemlerinin Karşılaştırılması. *Gaziosmanpaşa Ü. Ziraat Fak. Dergisi*, 21 (2): 56-62.
- DENİZ, E. 2012. Aydınlatmada Enerji Verimliliği. On line: <http://www.akademimuhendislik.net/enerji-verimliliği/aydinlatma-enerji-verimliliği/item/aydinlatmada-enerji-verimliliği-enerji-tasarrufu.html>. (Erişim tarihi: Aralık 2012).
- DOE, 2008. Outdoor Area Lighting With LEDs: FAA Technical Center Report Brief, U.S. Department of Energy (U.S.D.O.E). <Http://www.energy.gov> (Erişim tarihi: Aralık 2012).
- DOUGHER, T.A. and BUGHEE, B. 2001. Differences in the Response of Wheat, Soybean and Lettuce to Reduced Blue Radiation. *Photochem. Photobiol.*, 73: (2), 199-207.
- E+E ELEKTRONIK GMBH INC. 2012. EE80 Duyarga ve Dönüştürücüsü Teknik Dökümanları. On line: <http://www.epluse.com/en/products/co2-measurement/co2-carbon-dioxide-transmitters/ee80/> (Erişim tarihi: Kasım 2012).

- EDISON INC. 2012. Edixeon Emitter High Power LED Datasheet, <Http://www.edison-opto.com.tw/Datasheet/Edixeon> (Erişim tarihi: Mayıs 2012).
- ELTEZ, R.Z. 1995. Bazı Sera Sebze Türlerinde İlkbahar Yetiştiriciliğinde Fide Döneminde Yapılan İlave Aydınlatmanın Kalite ve Verime Etkileri Üzerinde Araştırmalar. (Doktora Tezi). Ege Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Bahçe Bitkileri Anabilim Dalı. Bornova, İzmir, 111 ss.
- EMO, 2012. Teknik Bilgiler Dökümanı. Elektrik Mühendisleri Odası web sayfası http://www.erimsever.com/MakMuh/Elektrik/EMO_Ajandasi_Teknik_Bilgiler.pdf. (Erişim tarihi: Kasım 2012).
- EROL, Y. 2008. Power LED Sürücüsü. On line: <http://www.biltek.tubitak.gov.tr/gelisim/elektronik/dosyalar/45/powerLEDsurucu.pdf> (Erişim Tarihi: Temmuz 2012)
- ERTEKİN, Ü. 2002. Biber, Domates, Hıyar, Patlıcan Yetistirciliği. Seracılık ve Örtüaltı, Uğurer Tarım Kitapları, 505 ss.
- ESER, D. 1986. Tarımsal Ekoloji. Ankara Üniv. Ziraat Fakültesi Yayınları, Ders Kitabı, No: 287, Ankara.
- FOBSUN ELECTRONICS LTD. 2012. LED Bitki Yetiştirme Lamba Üreticisi İnternet Sayfası. On line:<http://www.fobsun.com/product.html> (Erişim tarihi: Ekim 2012).
- FOTON ELEKTROTEKNİK 2012. Lambalar Hakkında Genel Bilgiler. Resmi web sayfası:<http://www.fotonelektroteknik.com.tr/?ynt=solm&eyl=detay&id=6>. (Erişim tarihi: Temmuz 2012).
- GEFFROY, B., ROY, P. and PRAT, C. 2006. Organic light-emitting diode (OLED) technology: materials, devices and display Technologies. *Polymer International*. 55:572–582.
- GÜNAY, A. 1982. Genel Sebze Yetistirciliği, Cilt I, Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü, Ankara, 82 s.
- GÜNAY, A. 2005. Işığın Bitki Büyümesi ve Gelişmesine Etkisi. Genel Sebze Yetiştiriciliği, Cilt I, İzmir 502 ss.
- GÜNENÇ, A.Y. 2000. Bitkilerin Duyuları. *Bilim ve Teknik Dergisi*, 391:70-75.
- HA, M.S. 2009. Thermal Analysis of High Power LED Arrays. (MSc Thesis). School of Mechanical Engineering. Georgia Institute of Technology.
- HAITZ, R., KISH, F., TSAO, J. and NELSON, J. 1999. The Case For A National Research Program on Semiconductor Lighting. White Paper Presented Publicly at the 1999 Optoelectronics Industry Development Association (OIDA) forum in Washington DC, USA. <http://prod.sandia.gov/techlib/access-control.cgi/2000/001612.pdf> (Erişim Tarihi: Kasım 2012).

- HAY, R.K.M. and WALKER, A.J. 1989. An Introduction to the Physiology of Crop Yield. Longman Group UK Limited. 26:292 pp.
- HENDRICKS, S.B. and BORTHWICK, H.A. 1965. In Chemistry and Biochemistry of Plant Pigments, ed. T.W. Goodwin (New York: Academic Press), 405-406.
- HEUVELINK, E. 1989. Influence of Day and Night Temperature on the Growth of Young Tomato Plants. *Scientia Hort.*, 38: 11-22.
- HUANG, J., PADMANABHAN, K. and COLLINS, O.M. 2011. The Sampling Theorem With Constant Amplitude Variable Width Pulses, *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 58, 1178-1190.
- IŞIK, E. 2003. Biyolojik Materyalin Teknik Özellikleri. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Ders Notları No: 95. Bursa, 105 ss.
- IŞIK, E. ve ALİBAŞ, İ. 2000. Tarımsal Ürünlerin Kurutulmasında Kullanılan Yöntemler ve Kurutma Sistemleri. Uludağ Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yardımcı Ders Notu, No:3. Bursa, 64 ss.
- JAMAL, R. and PICHLIK, H. 1999. Control and Simulation in G – An Integrated Environment for Dynamic Systems”, *LabVIEW Applications and Solutions*, Prentice Hall, New Jersey, 379-404.
- JAO, R.C. and FANG, W. 2003. An Adjustable Light Source For Photo-Pyhto Related Research and Young Plant Production. *Appl. Eng. Agr.*, 19 (5):601-608.
- KANG, H. R. 1996. Color Technology for Electronic Imaging Devices. (E-Kitap), [Http://www.google.com.tr/books?id=vzQH3qA_RKkC&printsec=frontcover&hl=tr#v=onepage&q&f=false](http://www.google.com.tr/books?id=vzQH3qA_RKkC&printsec=frontcover&hl=tr#v=onepage&q&f=false). (Erişim Tarihi: Nisan 2012).
- KARAGÜZEL, O. 2003. Farklı Sera Koşullarının *Gypsophila paniculata* ‘Perfecta’da Büyüme ve Çiçeklenme Özelliklerine Etkisi. *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi* 16(1): 51-60.
- KARAGÜZEL, O. ve ORTAÇEŞME, V. 1999. *Gypsophila* Yetiştiriciliğinde Dikim Sıklığının Verim Kalite ve Aydınlatma Enerjisinin Verimli Kullanımına Etkisi. *Turk J. Agric.*, 24: 691-697.
- KARAGÜZEL, O., ÇAKMAKÇI, S. ve AYDINOĞLU, B. 2003. Doğal *Lupinus Varius* (L.) Popülasyonunda Gün Uzunluğunun Tohum Bağlama Tohum ve Bazı Çimlenme Özelliklerine Etkisi. *Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Dergisi*, 16 (1): 69-77.
- KARAKAŞ, A. 2008. Sera Aydınlatmacılığı. *Elektrik mühendisliği Dergisi*, 434:142-144
- KENDRICK, R.E. and FRANKLAND, B. 1978. *Phytochrome and Plant Growth*. Edward Arnold Pub. Lmt, London, United Kingdom, 76 pp.

- KEVSEROĞLU, K. 1999. Bitki Ekolojisi. O.M.Ü. Ziraat Fakültesi Ders Kitabı No:31, Samsun.
- KIRK, J.T.O. 1994. Light and Photosynthesis in Aquatic Ecosystems. Cambridge University Press, United Kingdom, 509 pp.
- KOÇ, C., VATANDAŞ M. ve KOÇ A.B. 2009. LED Aydınlatma Teknolojisi ve Tarımda Kullanımı. 25.Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi. Isparta, 153 ss.
- KOÇ, Y. 1995, Kuantum Felsefesi, *Bilim ve Teknik Dergisi*, Tübitak, 326:22-29.
- KOMMAREDDY, A. and ANDERSON, G. 2004. Study of Light Requirements of A Photobio Reactor. North Central ASAE/CSAE Conference. Paper No: MB04-111. Winnipeg.
- KONDO, N., LING, P.P., KURITA, M., FALZEA, P.D., NISHIZU, T., KURAMATO, M., OGAWA, Y. and MINAMI, Y. 2008. A Double Image Acquisition System With Visible and UV LEDs For Citrus Fruit. ASABE Publication Number 701P0508cd.
- LAMMENS, J. M. G. 1994. A Computational Model of Color Perception and Color Naming, PhD Thesis, Faculty of the Graduate School of State University of New York, Buffalo.
- LARSON, R.A. 1997. Naturally Occuring Antioxidants, Boca Raton (Lewis Publishers) Online files: [Http://tr.wikipedia.org/wiki/Karotenoid](http://tr.wikipedia.org/wiki/Karotenoid) (Erişim tarihi: Mayıs: 2012).
- LAWRANCE, K.C., PARK, B., HEITSCHMIDT, G. and WINDHAM, W.R. 2005. Led Ligthing For Use in Multispectral and Hyperspectral Imaging. ASAE Annual International Meeting.
- LI-COR INC. 2012. Işık Ölçüm Duyargaları Teknik Dökümanları. Online files: [Http://www.licor.com/env/products/light/](http://www.licor.com/env/products/light/) (Erişim tarihi: Nisan 2012).
- LIN, C. 2000. Plant Blue Light Receptors. Trends in Plant Science, 5, (8), 337-342.
- LIU, Y. 1998. Introduction to Finite Element Method. Lecture Notes, Dept. of Mechanical Engineering, University of Cincinnati, 178 pp.
- LOACH, K. 1970. Shade tolerance in tree seedlings. 2. Growth analysis of plants raised under artificial shade. New. Phytol., 67: 789-792.
- MASSON, J., TREMBLAY, N. and GOSELIN, A. 1990. Nitrogen Fertilization and HPS Supplementary Lighting Influence Vegetable Transplant Production. I. Transplant Growth. *J. Amer. Soc. Hort. Sci.* 116 (4): 594-598.
- McCREE, K.J. 1972. Test of Current Definitions of Photosynthetically Active Radiation Against the Leaf Photosynthesis Data, Agricultural and Forest Meteorology, 10: 443-453.

- MEAN WELL INC. 2012. LED Sürücü Teknik Dökümanları. Online files: [Http://www.meanwell.com](http://www.meanwell.com). (Erişim tarihi: Temmuz 2012).
- MIT TECHNOLOGY REVIEW. 2007. Organic LEDs Shine Invisibly. On line: http://www.nsf.gov/od/lpa/news/03/ma0303_images.htm. (Erişim tarihi: Nisan 2012).
- MIYASHITA, Y., KITAYA, Y., KOZAI, T. and KIMURA, T. 1995. Effects of Red and Far-Red Light on The Growth and Morphology of Potato Planters in Vitro: Using Light Emitting Diode as A Light Source For Micropropagation. *Acta Horti.*, 393: 189-194.
- MOISIO, O., PAJULA, M., PINHO, P., HALONEN, L. and SEPPONEN, R. 2005. Use of Junction Temperature in Control of CCT in LED Luminaire, in Proceedings of the CIE Midterm Meeting and International Lighting Congress Léon, Spain, 328-334.
- MOISIO, O., PINHO P., TETRI, E. and HALONEN, L. 2004. Controlling Colour Temperature of LED-Luminaire, in Proceedings of the 10th International Symposium on the Science and Technology of Light Sources - Toulouse, France, 375-376.
- MORENO, I. 2004. Configurations of LED Arrays For Uniform Illumination. (Proceeding Article). 5th Iberoamerican Meeting on Optics And 8th Latin American Meeting on Optics, Lasers and Their Applications, Bellinham, USA.
- MPELKAS, C.C. 1991. Horticultural Light Sources. Sylvania Engineering Bulletin 0- 352. Sylvania Lighting, Danvers, MA.
- MUSAYEV, E. 1999. Optoelektronik Devreler ve Sistemler. Birsen Yayınevi, İstanbul, 284 ss.
- NATH, B. 1974. Fundamentals of Finite Elements for Engineers. Athlone Press. 256 pp.
- NATIONAL INSTRUMENTS INC. 2012. Distributed Measurement and Control Systems with NI LabVIEW”, National Instruments Corporation, Online files: [Http://www.ni.com](http://www.ni.com), (Erişim tarihi: Ekim 2011).
- NAVIGANT CONSULTING Inc. 2012. 2010 U.S. Lighting Market Characterization. Solid-State Lighting Program. Office of Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy. Online files: <http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2010-lmc-final-jan-012.pdf>. (Erişim tarihi: Aralık 2012).
- O’CARRA, P., MURPHY R.F. and KILLILEA S.D. 1980. The native forms of the phycobilin chromophores of algal biliproteins. A clarification. *Biochem. J.* 187 (2): 303–9.
- ODABAŞ, M.S. 2003. Sıcaklık ve Işığın Baklada (*Vicia faba L.*) Büyüme, Gelişme ve Verime Kantitatif Etkileri. OMÜ Fen Bil. Enst. Doktora Tezi, Samsun, 147 ss.

- O'NOLAN, J. 2012. Rules for Perfect Lighting: Understanding The Inverse-Square Law. On line: <http://photo.tutsplus.com/articles/lighting-articles/rules-for-perfect-lighting-understanding-the-inverse-square-law/> (Erişim tarihi: Haziran 2012).
- ÖZKARAMAN, F. 2004. Sera Koşullarında Sıcaklık, Işık ve Farklı Budamaların Kavunda (Cucumis melo L.) Büyüme, Gelişme ve Verime Kantitatif Etkileri. OMÜ Fen. Bil. Enst. Doktora Tezi, Samsun, 229 ss.
- ÖZKAYA, M. 1972. Aydınlatma Tekniği, İTÜ Mühendislik Mimarlık Fakültesi Yayınları No: 88, İstanbul.
- ÖZTÜRK, H.H. 2008. Sera İklimlendirme Tekniği. Hasad Yayıncılık Ltd.şti. s. 267-269. İstanbul.
- PADEM, H. ve ÖZDAMAR, H. 2002. Sebze Büyüme ve Gelişiminde Fotoresptörler. Batı Akdeniz Tarımsal Araştırma Enstitüsü Müdürlüğü (BATEM), Narenciye ve seracılık araştırma Enstitüsü Yayını. *Derim*, (19):2, 2-8.
- PEARSON, S. 1992. Modelling the effect of temperature on the growth and development of horticultural crops. *Scientia Hort.*, 59 (2): 91-106.
- PHILIPS INC. 2012. Philips Horticulture Lighting. Philips. Online files: Http://www.lighting.philips.com/main/application_areas/horticultural/ (Erişim tarihi: Ekim 2012).
- PICKEN, A.J.F., STEWART, K. and KLAPWICJK, 1986. Germination and Vegetative Development. In: J.G. Atherton And J. Rudich (Eds), *The Tomato Crop*. Chapman And Hall, London: 167-200.
- PINHO, P. 2008. Usage and Control of Solid-State Lighting for Plant Growth. (PhD Thesis) Helsinki University of Technology Faculty of Electronics, Communication and Automation Department of Electronics, Lighting Unit Spoo, Finland.
- PINHO, P., LUKKALA, R., SÄRKKÄ, L., TETRI, E., TAHVONEN, R. and HALONEN, L. 2007. Evaluation of Lettuce Growth Under Multi-Spectral-Component Supplemental Solid State Lighting in Greenhouse Environment. *International Review of Electrical Engineering (IREE)*, (2): 6.
- PINHO, P., TETRI, E. and HALONEN, L. 2005. Design and Performance Assessments of Solid State Light Sources For Plant Growth, in *Proceedings of the 10th European Lighting Conference Lux Europa 2005: Lighting for Humans - Berlin, Germany*, 297-301.
- PROLUX INC. 2012. Işık Kaynaklarında Aydınlatma ile İlgili Temel Kavramlar. Online Files: <Http://www.prolux.com.tr/teknikdetay.aspx?hid=7>. (Erişim tarihi: Ağustos 2012).
- SCHILER, M. 1997. *Simplified Design of Building Lighting*, 4th Ed.. USA: John Wiley and Sons. 27 pp.

- SCHOLAND, M.J. and DILLON, H.E. 2012. Life-Cycle Assessment of Energy and Environmental Impacts of LED Lighting Products Part 2: LED Manufacturing and Performance. Building Technologies Program. Energy Efficiency and Renewable Energy. U.S. Department of Energy. On line http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/2012_led_lca-pt2.pdf. (Erişim tarihi: Aralık 2012).
- SEEMANN, J. 1952. Strahlungsverhaltnisse in Gewachshausern. Arhic für Meteorologie. Geophys. U. Bioklim. Serie band IV.
- SHIMIZU, H., MA, Z., TAZAWA, S., DOUZONO, M., RUNKLE, E. and HEINS, R. 2005. The application of blue lighth as a growth regulator. ASAE International Meeting, Paper Number: 054152.
- SİREL, ř. 2009. LED ve Yararlı Akı. Yapı Fiziği Uzmanlık Uygulamaları San. ve Tic. A.ř. Online files: Http://www.yfu.com/booklets/Ledler_SS-Makale.pdf. (Erişim tarihi: Aralık 2012).
- STEIGERWALD, D. A., BHAT, J. C., COLLINS, D., FLETCHER, R.M., HOLCOMB, M.O., LUDOWISE, M.J., MARTIN, P.S. and RUDAZ, S.L. 2002. Illumination With Solid State Lighting Technology, *IEEE J. Selected Topics Quantum El.*, (8): 310-320.
- şENİZ, V. 1992. Domates Biber ve Patlıcan Yetiştiriciliği. Tarımsal Araştırmaları Destekleme ve Geliştirme Vakfı, Yayın No: 26, Yalova.
- TAIZ, L. and ZEIGER, E. 2002. Plant Physiology, Third Edition. Sinauer Associates Inc., Sunderland MA.
- TENNESSEN, D.J., SINGSAAS, E.L. and SHARKEY, T.D. 1994. Light-Emitting Diodes as A Light Source For Photosynthesis Research. *Photosynth Res*, 39:85–92.
- TUBİTAK, 2012. Ulusal Metroloji Enstitüsü. SI Birimler Sistemi. Online files: Http://www.ume.tubitak.gov.tr/menu_si_birimler.php?f=6003. (Erişim tarihi: Ekim 2012).
- UğUR, N. 1991. Proses ve Tesis Kontrolü, Ege Üniversitesi, İzmir, 364 ss.
- UZUN, S. 1996. The Quantitative Effects of Temperature and Light Environment on the Growth, Development and Yield of Tomato and Aubergine (Unpublished PhD Thesis). The Univ. of Reading, England.
- UZUN, S. 2000. Sıcaklık ve Işığın Bitki Büyüme, Gelişme ve Verimine Etkisi (III. Verim). *OMÜ Ziraat Fak. Dergisi* 15 (1): 105-108.
- UZUN, S. 2001. Serada domates ve patlıcan yetistirciliginde bazı büyüme ve verim parametreleri ile sıcaklık ve ısıık arasındaki iliskiler. 6. Ulusal Seracılık Sempozyumu. 5-7 Eylül 2001, Fethiye-Muğla.

- ÜNAL, A., 2009. Aydınlatma Tasarımı ve Proje Uygulamaları. Birsen Yayınevi, Umut Matbaası, İstanbul, 613 ss.
- ÜNVER, R. 2000. Renk Görünüm Dizgeleri, 3. Ulusal Aydınlatma Kongresi, İstanbul, 138-143.
- VARDAR, Y. 1975. Bitki Fizyolojisine Giriş. Ticaret Gazetesi Matbaası, İzmir, 229 ss.
- VARDAR, Y., GÜVEN, A. ve AHMET, M. 1973. Bitkilerde Fitokrom Sistemi. *Türk Biyoloji Dergisi*, (23): 47-56.
- VARINCA, K. B. ve GÖNÜLLÜ, M. T. 2006. Türkiye’de Güneş Enerjisi Potansiyeli ve Bu Potansiyelin Kullanım Derecesi, Yöntemi ve Yaygınlığı Üzerine Bir Araştırma, I. Hidrojen ve Güneş Enerjisi Kongresi.
- VITOONE INC. 2012. ışık ve Aydınlatma. Raina Elektrik ve Aydınlatma Malzemeleri İmalat ve San. Tic. Ltd. Şti. Online files: [Http://www.vitoone.com/tr/about.asp](http://www.vitoone.com/tr/about.asp). (Erişim tarihi: Aralık 2012).
- VURAL, H., ESIYOK, D. ve DUMAN, I. 2000. Kültür Sebzeleri (Sebze Yetistirme). Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Bahçe Bitkileri Bölümü, Bornova, İzmir.
- WEIR, J. 1975. Artificial lighting for commercial horticulture. *Lighting Research and Technology*. 7(4): 209- 225.
- WHITEHEAD, F.H. 1973. The Relationship Between Light Intensity and Reproductive Capacity. *Plant Response to Climatic Factors*. Unesco, Paris, 73-75 p.
- WILLIAMS, S. 1984. Official Methods of Analysis of the Association of official Analytic Chemist. Published by the Association of Official Analytical Chemist. Inc. Wircini, USA, 59-60 p.
- WU, M.S., HUANG, H.H., HUANG, B.J., TANG, C.W. and CHENG, C.W. 2009. Economic feasibility of solar-powered led roadway lighting. *Renewable Energy* (34):1934–1938.
- YAĞCIOĞLU, A. 1996. Tarımsal Elektrifikasyon. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları. Bornova- İzmir, 280 ss.
- YAĞCIOĞLU, A. 2005. Sera Mekanizasyonu. Ege Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları, Bornova- İzmir, 251 ss.
- YANAGI, T. and OKAMOTO, K. 1994. Super-Bright Light Emitting Diodes as an Artificial Light Source For Plant Growth. In: Abstract of 3rd International Symposium on Artificial Lighting in Horticulture, 19 pp.
- YEGM 2012. Aydınlatmada Kullanılan Yeni Teknolojileri. Online files: <http://www.eie.gov.tr/teknoloji/aydinlatma.aspx> (Erişim: Aralık 2012).

- YEH, N. and CHUNG J. 2009. High-brightness LEDs Energy efficient lighting sources and their potential in indoor plant cultivation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* (13): 2175–2180.
- YILDIZ, Y., KARACA, C. ve DAĞTEKİN, M. 2010. Hayvan Barınaklarında Çevre Denetimi. Hasat Yayıncılık Ltd. Şti., Bilnet Matbaacılık, İstanbul, 256 ss.
- YILMAZ, İ. 2002. Renk Sistemleri, Renk Uzayları ve Dönüşümler. Selçuk Üniversitesi Jeodezi ve Fotogrametri Mühendisliği Öğretiminde 30. Yıl Sempozyumu, 340- 350. 16-18 Ekim 2002, Konya.
- YURTSEVEN, M.B. 2012. 47. Grup Aydınlatma Donanımları Sanayii Genişletilmiş Sektör Toplantısı Sunumu. Aydınlatma Türk Milli Komitesi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü.
- YURTSEVEN, M.B., ERKİN, E. ve ONAYGİL, S. 2011. Katı Hal Aydınlatma ve LED Standartlarındaki Gelişmeler, II. Elektrik Tesisat Ulusal Kongresi, İzmir.
- YURTTAŞ, H.G., ÖZDUMANLAR, S., BÜKE, G.C., ÇİL, C.Z., KAMIŞLI, Ö. ve ERTUĞ, A.M. 2011. LED'lerin Spektrofotometride Kullanımı. MTS4 Çankaya Üniversitesi. Online files:
[http://memd.cankaya.edu.tr/uploads/files/LEDlerinSpektrofotometrideKullanimi_06_04_20112\(2\).pdf](http://memd.cankaya.edu.tr/uploads/files/LEDlerinSpektrofotometrideKullanimi_06_04_20112(2).pdf) (Erişim tarihi: Ekim 2012).
- YÜKSEL, A.N. 1995. Sera Yapım Tekniği. 2. Baskı, Hasat Yayıncılık Ltd.
- ZIESLIN, N. and MOR, Y. 1990. Light on Roses: A Review. *Scientia Horticulturae* 43, 1- 14.

7. EKLER

Ek 7.1. Işık Tekniği ve Bitkisel Aydınlatmada Kullanılan Terimler

Aydınlık Şiddeti (lx): Birim yüzeye düşen toplam ışık akısıdır. 1 lümen değerindeki ışık akısının 1 m² yüzeye eşit yayılmış şekilde düştüğü durumdaki aydınlık şiddeti 1 lx değerindedir.

Işık Akısı (lm): Bir ışık kaynağından çıkan ve normal gözün görmesine ait spektral duyarlılık eğrisine göre değerlendirilen enerji akısıdır.

Işık şiddeti (cd): Birim uzay açısı başına düşen ışık akısı miktarı (Candela) olarak ifade edilmektedir (1cd=1 lm steradyan⁻¹).

Etkinlik faktörü (lm.W⁻¹): Bir ışık kaynağının ışık akısının, kaynağın elektriksel gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır.

Yansıtma verimi (η_{arm}): Yansıtıcıdan çıkan toplam ışık akısının, yansıtıcının içindeki lambaların toplama ışık akısına oranıdır.

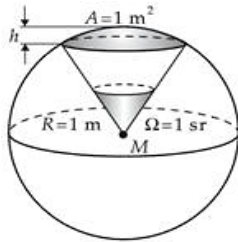
Parıltı (cd.m⁻²): Aydınlatma kaynaklarından veya aydınlatılan bir yüzeyden göze gelen ışık şiddeti miktarıdır. Aynı aydınlık düzeyi ile aydınlanan yüzeylerin, yansıtma özellikleri farklı ise parıltıları da farklı olacaktır.

Kamaşma: Işıksal parıltı olarak tanımlanan cd.m⁻² değerinin aşırı derecede yüksek olması veya ışık kaynağından yayılan ışınların doğrudan göz tarafından rahatsız edici olarak algılanmasıdır.

Fotosentetik Etkili Işınım (PAR, μmol.m⁻².s⁻¹): 400–700 nm dalga boyları arasında kalan ve fotosentezi doğrudan etkileyen, bitki gelişimi üzerindeki etkin ışımaya olarak tanımlanmaktadır (Weir 1975, Mpelkas 1991).

Günlük Işık İntegrali (DLI: Daily Light Integral): Bitkinin bir gün boyunca aldığı kümülatif ışık miktarı günlük ışık integrali kavramıyla tanımlanabilir. DLI bir günde birim alana gelen fotonların sayısını (mol.m⁻².gün⁻¹) ifade eder. DLI seviyeleri kış ve yaz aylarında 5-60 mol.m⁻².gün⁻¹ gibi geniş bir aralıkta değişmektedir (Ciolkosz 2008).

Uzay açısı (str): Yarıçapı 1 m olan bir küre yüzeyinde 1 m²'lik bir yüzeyi gören uzay açısının değeri 1 steradyan olarak tanımlanmaktadır (Şekil 7.1). SI birimler sisteminde Steradyan katı açı birimidir ve tam küresel açı 4π str'dır (Tübitak 2012).

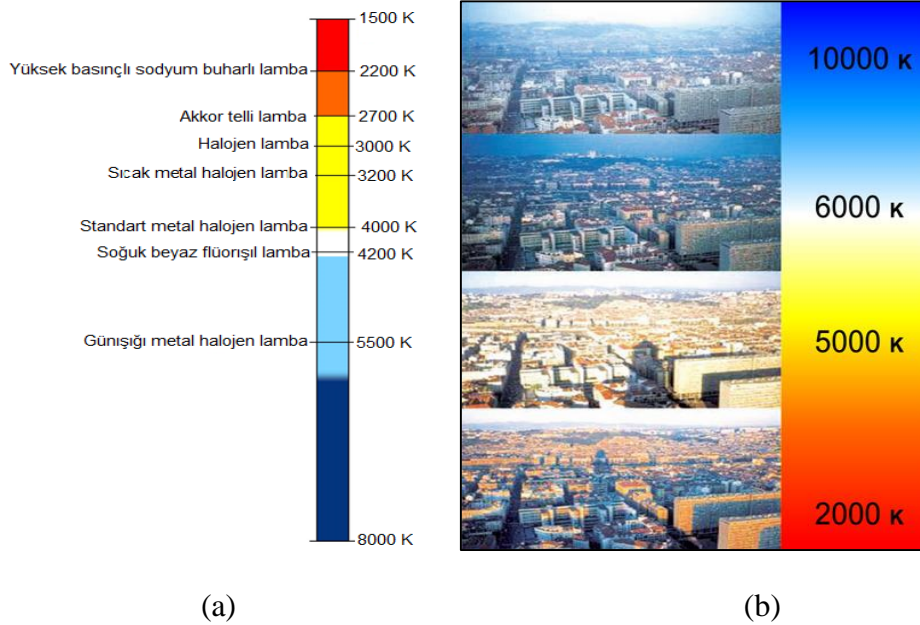


Şekil 7.1. Steradyan'ın tanımlanması

İlişkili Renk Sıcaklığı (CCT: Correlated Color Temperature): Bir lambanın yaydığı ışığın, belli bir sıcaklığa kadar ısıtıldığında referans bir kaynaktan gelen ışık rengine bağlı olarak aldığı rengin görünüşünü tanımlamakta ve Kelvin (K) birimi ile kullanılmaktadır. CCT değeri, kaynağın yaydığı ışığın sıcak veya soğuk olduğunu gösterir. Ancak sıcaklık ölçeğinin aksine CCT değeri 3200 K'nin altında ise ışık renk olarak sıcak olarak kabul edilirken, 4000 K üzerinde iken soğuk ışık olarak kabul edilmektedir (Prolux 2012). CCT, DIN 5033'e göre standart renk ölçeğiyle bildirilmiş ve genel olarak üç ana grupta tanımlanmıştır:

- Sıcak beyaz (<3300 K)
- Doğal beyaz (3300-5000 K)
- Gün ışığı beyaz (>5000 K)

CCT, ışık kaynağının verdiği ışığın genel görünüşüne dair ideal bir gösterge niteliğinde olup, ışık kaynağını tanımlayıcı spektral güç dağılımı ile ilgili herhangi bir bilgi vermez. Bu yüzden iki ışık kaynağının verdiği ışık aynı renkte görülebilir ancak bu ışıkların obje renkleri üzerindeki etkileri oldukça farklı olabilir. Bazı yaygın yapay ışık kaynaklarının CCT değerleri Şekil 7.2.a'da ve ışıkların objeler üzerindeki etkileri Şekil 7.2.b'de görülmektedir.



Şekil 7.2. a) Işık kaynaklarının CCT değerleri ve b) objeler üzerindeki etkileri

Renksel Geriverim Endeksi (CRI: Color Rendering Index): Benzer renk sıcaklığına sahip olan bir referans kaynak tarafından aydınlatıldığı duruma kıyasla, objelerin bir ışık kaynağı tarafından aydınlatıldığında uğradığı renk dönüşüm derecesinin bir ölçüsüdür. Işık kaynaklarının nesnelerin rengini doğru şekilde dönüştürebilme yeteneği birbirinden farklıdır. CRI, 0-100 arasında değerlendirilir ve 100 en canlı rengi göstermektedir. Doğal güneş ışığı için CRI 100 olurken, bitki yetiştirme, hayvan besleme ve sağım gibi faaliyetlerin yapıldığı ortamlarda CRI>80 olması gerekmektedir (ASAE 2005). Şekil 7.3 nesnelerin belli bir ışık kaynağı tarafından aydınlatıldığında nasıl görüleceğini ve CRI

değerlerini göstermektedir. CRI için belirlenen DIN 5035 normuna göre kategoriler Çizelge 7.1’de ve yaygın olarak kullanılan bazı kaynaklar için tipik CRI değerleri ise Çizelge 7.2’de verilmiştir.



Şekil 7.3. Farklı CRI değerlerinde nesnelerin görüntüsü

Çizelge 7.1. CRI için belirlenen DIN 5035 normuna göre kategoriler (EMO 2012)

Kademe		Renksel geriverim
1A	Çok iyi	$Ra > 90$
1B	Çok iyi	$80 < Ra < 90$
2A	İyi	$70 < Ra < 80$
2B	İyi	$60 < Ra < 70$
3	Çok iyi değil	$40 < Ra < 60$
4	İyi değil	$20 < Ra < 40$

Çizelge 7.2. Yaygın olarak kullanılan bazı ışık kaynakları için tipik CRI değerleri

Işık kaynağı	Renksel geriverim dizini (CRI)
Akkor telli lamba	95–100
Kompakt flüorışıl lamba	85–100
Yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba	80–85
T8 lineer flüorışıl lamba	75–85
Metal halojen lamba	60–95
Soğuk beyaz LED	90–95
Doğal beyaz LED	80–85
Sıcak beyaz LED	70–75

ÖZGEÇMİŞ

Nuri ÇAĞLAYAN 1975 yılında Sivas'ta doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini Antalya'da tamamladı. 1994 yılında girdiği Ege Üniversitesi Ege Meslek Yüksek Okulu Endüstriyel Elektronik Programı'ndan 1996 yılında mezun oldu. 1998 yılında Akdeniz Üniversitesi Ziraat Fakültesi Tarım Makineleri Bölümü'ne başladı ve 2002 yılında Ziraat Mühendisi olarak mezun oldu. 2003 yılında Akdeniz Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tarım Makinaları Anabilim Dalı'nda Yüksek Lisans öğrenimine başladı. "Plastik Bir Serada Kelebek Tipi Havalandırma Sisteminin Otomasyonuna Yönelik Bir Çalışma" başlıklı Yüksek Lisans tez çalışmasını 2006 yılında tamamladı. 2007 yılında Tarım Makinaları Anabilim Dalı'nda doktora öğrenimine başladı. 2010 yılında Akdeniz Üniversitesi Teknik Bilimler MYO'na öğretim görevlisi olarak atandı. Aynı yıl Akdeniz Üniversitesi Uzaktan Eğitim Uygulama ve Araştırma Merkezi (AKUZEM) teknik alt yapısının kurulmasında görev alan Nuri ÇAĞLAYAN, halen öğretim görevlisi ve AKUZEM sistem yöneticisi olarak çalışmaktadır.