

T.C.
SÜLEYMAN DEMİREL ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

TARIMSAL AYDINLATMADA LED IŞIK KAYNAKLARININ
KULLANIM OLANAKLARI

Önder UYSAL

Danışman: Doç. Dr. Kamil EKİNCİ

II. Danışman: Prof. Dr. Mustafa VATANDAŞ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
TARIM MAKİNALARI ANABİLİM DALI
ISPARTA-2011

TEZ ONAYI

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
İÇİNDEKİLER	i
ÖZET.....	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR.....	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	viii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ	xi
1. GİRİŞ	1
1.1. Işığın Tanımı	2
1.2. Fotometrik Büyüklükler	3
1.3. Aydınlatma.....	4
1.4. Aydınlatmada Kullanılan Bazı Tanımlar	4
1.5. Elektriksel Işık Kaynakları.....	5
1.5.1. Akkor telli lambalar	5
1.5.2. Deşarj lambaları	6
1.5.2.1 Yüksek basınçlı deşarj lambaları (HID).....	6
1.5.2.2 Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar	6
1.5.2.3. Flüorışıl lambalar	7
1.5.3. Işık Yayan Diyot (LED) lambalar.....	8
1.6. Elektriksel Işık Kaynaklarının Karşılaştırılması	9
1.7. Tarımsal Üretimde Aydınlatmanın Önemi.....	10
1.7.1. Bitkisel üretimde aydınlatmanın önemi	11
1.7.2. Hayvansal üretimde aydınlatma ve önemi	12

2. KAYNAK ÖZETLERİ	13
3. MATERYAL VE YÖNTEM	19
3.1. Materyal	19
3.2. Yöntem.....	23
3.2.1. 1. Aşama: Seçilen LED ışık kaynaklarının FAR değerlerinin belirlenmesi	23
3.2.2. 2. Aşama: 1 W gücündeki 9 adet mavi ve kırmızı LED'ten oluşturulan aydınlatma sistemlerinin FAR dağılımlarının belirlenmesi.....	25
3.2.3. 3. Aşama: sığla balsamı (<i>Liquidambar styraciflua</i> L.) bitkisinin doku kültürü ile üretiminde FAR isteklerine uygun LED aydınlatma sistemlerinin yerleşim geometrisinin belirlenmesi	28
4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA	35
4.1. LED'lerin FAR Ölçümleri	35
4.2. LED Aydınlatma Sistemlerinin FAR Dağılımları.....	37
4.3. LED Aydınlatma Sistemlerinin Yerleşim Geometrisi	44
4.4. Flüorışıl Lambanın Aydınlatma Düzlemindeki FAR Değerlerinin Dağılımları	48
4.5. LED ve Flüorışıl Lamba Aydınlatma Sistemi Tasarımının Oluşturulması.....	50
4.6. Doku Kültüründe LED Uygulamasının Ekonomik Analizi	52
5. SONUÇ	57
6. KAYNAKLAR	60
ÖZGEÇMİŞ	64

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

TARIMSAL AYDINLATMADA LED IŞIK KAYNAKLARININ KULLANIM OLANAKLARI

Önder UYSAL

Süleyman Demirel Üniversitesi,
Fen Bilimleri Enstitüsü,
Tarım Makinaları Anabilim Dalı

Danışman: Doç. Dr. Kamil EKİNCİ

Bu çalışmada, tarımsal aydınlatmada ışık yayan diyot (LED) ışık kaynaklarının kullanım olanaklarının belirlenmesi amaçlı denemeler yürütülmüştür. İlk denemede, kırmızı, sıcak beyaz, mavi, turuncu, yeşil ve beyaz renkli 1W ve 3W güç LED'lerinin Fotosentetik Aktif Radyasyon (FAR) ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) değerleri CIE-2007 standardında belirtilen durum A ve durum B için belirlenmiştir. Deneme, tesadüf blokları deneme desenine göre 3 tekerrürde yapılmıştır. FAR özelliği bakımından yapılan varyans analizi sonucunda LED renk×güç interaksyonu istatistiki olarak önemli bulunmuştur ($P<0.01$). Her iki durum için ölçümü yapılan 1W gücündeki LED'lerde en yüksek FAR değeri kırmızı LED için belirlenirken, en düşük FAR değeri turuncu ve yeşil renkli LED'ler için bulunmuştur. 3 W gücündeki LED'ler için benzer durum olduğu belirlenmiştir.

İkinci denemede, 1W güçte 9 adet kırmızı veya mavi LED'lerden oluşan LED aydınlatma sistemlerinin farklı ölçme yüksekliklerinde, FAR ölçümlerinin ölçüm düzleminde oluşturulan geometriye bağlı olarak dağılımları incelenmiştir. Çalışmanın sonucunda, FAR değerleri merkezde yüksek iken, kenarlara doğru azaldığı ve bir şemsiye görüntüsü verdiği gözlenmiştir.

Üçüncü denemede ise, sığla balsamı (*Liquidambar styraciflua* L.,) bitkisinin doku kültürü ile üretiminde en düşük FAR değerinin ($50\pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) 16 saatlik fotoperiyot uygulamasında homojen olarak dağıtılabilmesi amacıyla 9 adet 1 W güçteki kırmızı LED'lerden oluşan LED aydınlatma sisteminin yerleşim geometrisi belirlenmiştir. Yerleşim geometrisinin FAR dağılımlarına etkisini belirlemek için kare, daire, üçgen, paralelkenar gibi geometrik yapılar oluşturulmuştur. Üçüncü denemenin sonucunda, belirtilen koşullarda LED aydınlatma sistemlerinin tasarımında kare yerleşim planının FAR değerlerinin homojen dağılımı açısından en uygun olduğu kanısına varılmıştır.

Çalışmada ekonomik analizde kullanılmak üzere tek bir flüorışıl lambanın aydınlatma düzlemindeki FAR değerlerinin dağılımı da incelenmiştir. Doku kültürü yetiştiriciliğinde kullanılmak üzere tasarlanan LED ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinin ekonomik analiz sonuçları, net bugünkü değer (NBD) 1,96, 5,98, 9,80, 25,48, 50,96, 99,96 m² lik alanlar için sırasıyla 283,07, 1468,04, 2839,49, 7240,26, 13768,45 ve 27253,83 TL olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, her bir tasarım alanı için belirtilen özgül koşullar altında sığla balsamı (*Liquidambar styraciflua* L.,) bitkisinin doku kültürü ile üretiminde mevcut flüorışıl lamba aydınlatma sistemleri yerine LED sistemlerinin kullanılması yatırım açısından cazip olduğu söylenebilir.

Anahtar Kelimeler: Tarımsal aydınlatma, ışık yayan diyot (LED), fotosentetik aktif radyasyon (FAR).

2011, 64 sayfa

ABSTRACT
M. Sc. Thesis

**THE POSSIBILITIES OF THE USAGE OF LED LIGHT SOURCES IN
AGRICULTURAL LIGHTNING**

Önder UYSAL

**Süleyman Demirel University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Agricultural Machinery**

Supervisor: Assoc. Prof. Dr. Kamil EKİNCİ

In this study, experiments were conducted to determine the possibilities of the usage of Light Emitting Diodes (LEDs) light sources in agricultural lightning. In the first experiment, the values of Photosynthetically Active Radiation ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (PAR) of 1W and 3W LEDs, which are in red, day light, blue, orange, green and white colour were measured for condition A and condition B based on CIE-2007 standard. Randomized block design with 3 replications was applied. The results showed that LED colour x power interaction was significant in terms of PAR ($P < 0.01$). For both conditions, among the 1W LEDs, the highest PAR values was determined for the red coloured LED while the lowest PAR values was determined for green and orange coloured LEDs. The similar trend was observed for 3W LEDs.

In the second experiment, distribution of FAR values of LED lightning systems consisting of nine-1W red or blue LEDs at different measurement heights at geometry drawn on the measurement plane was investigated. Results showed that the PAR values were high at the center and PAR values decreased when moved to the edges.

In the third experiment, allocation geometry of LED lightning systems consisting of four groups of nine-1W red LEDs was determined for the lowest PAR values (50 ± 5

$\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) required for production of sweet gum (*Liquidambar styraciflua* L.) based on tissue cultures with 16 hours of photoperiodic applications. Geometric figures such as square, circle, triangles and parallelogram were considered. The results showed that square allocation geometry was the best at the given conditions for the distribution homogeneity of PAR values on the measurement plane.

Distribution of PAR values of a single fluorescent lamp at the 20 cm height from the measurement plane was measured for economic analysis. The results of the economic analysis of LED and fluorescent lamp lightning systems for production of sweet gum (*Liquidambar styraciflua* L.) based on tissue cultures showed that net present values were 283,07, 1468,04, 2839,49, 7240,26, 13768,45, and 27253,83 TL for the assumed design area of 1,96, 5,98, 9,80, 25,48, 50,96, and 99,96 m². Therefore, it can be concluded that the investment for LEDs for each design area specified in this study is attractive when LED lightning system is replaced with fluorescent lamp lightning system for the production of sweet gum (*Liquidambar styraciflua* L.) based on tissue cultures.

Key Words: Agricultural Lightning, Light Emitting Diodes (LED), Photosynthetically Active Radiation (PAR).

2011, 64 pages

TEŞEKKÜR

Araştırma konumun belirlenmesinden tezin yürütülmesi ve tamamlanmasına kadar her aşamada yardım ve desteğini gördüğüm, sayın danışman hocalarım Doç. Dr. Kamil EKİNCİ ve Prof. Dr. Mustafa VATANDAŞ'a ve çalışmama yaptığı katkılarından dolayı Doç. Dr. Recep KÜLCÜ'ye teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

2422-YL-10 No`lu Proje ile tezimi maddi olarak destekleyen Süleyman Demirel Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Yönetim Birimi Başkanlığı'na teşekkür ederim.

Beni bu günlere getiren, benden maddi manevi desteklerini bir an bile olsun esirgemeyen ve bütün zorlukları aşmamda sonsuz katkılarından dolayı canım annem Hülya UYSAL'a, babam Ahmet Naci UYSAL'a ve tezimin yürütülmesinde desteklerini esirgemeyip gösterdiği fedakârlıklardan ötürü bir ömür boyunca minnettar kalacağım Özge ÖZDEMİR'e, ayrıca çok değerli bölüm hocalarıma ve tüm arkadaşlarıma teşekkür ederim.

Önder UYSAL

ISPARTA, 2011

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum ve görünür ışınım bölgesi	3
Şekil 1.2. Işık kaynaklarının sınıflandırılması	5
Şekil 1.3. Akkor telli lamba	6
Şekil 1.4. Flüorışıl lambanın içyapısı.....	7
Şekil 1.5. Işık yayan diyot.....	8
Şekil 3.1. LED'lerin FAR değerlerinin belirlenmesinde kullanılan test düzeneği	20
Şekil 3.2. FAR sensörü	20
Şekil 3.3. FAR sensörünün tipik tepkisel eğrisi.....	21
Şekil 3.4. DC güç kaynağı	22
Şekil 3.5. DELTA OHM 9847K veri kaydedici	22
Şekil 3.6. FAR değerlerinin ölçümü için CIE standart durumlarının şematik gösterimi (durum A için d=316 mm, durum B için d=100 mm.....	24
Şekil 3.7. LED aydınlatma sistemlerinin FAR dağılımlarının belirlenmesinde kullanılan test düzeneği.....	26
Şekil 3.8. Baskılı devre kartı üzerine yerleştirilmiş 9 adet kırmızı LED'ten oluşan aydınlatma sistemi	26
Şekil 3.9. Baskılı devre kartı üzerine yerleştirilmiş 9 adet mavi LED'ten oluşan aydınlatma sistemi.....	26
Şekil 3.10. LED'lerin FAR değerlerinin dağılımlarının belirlenmesi için bir merkez ve iç içe dairelerden oluşan ölçüm noktaları	28
Şekil 3.11. LED aydınlatma sistemlerinin yerleşim geometrisinin belirlenmesinde kullanılan test düzeneği	30
Şekil 3.12. LED aydınlatma sistemlerinin FAR değerlerinin dağılımlarının belirlenmesi için ölçüm noktalarının geometrisi.....	31
Şekil 3.13. Flüorışıl lambanın belirli yükseklikte sağlayabileceği FAR değerlerinin dağılımını belirlemek için kullanılan test düzeneği	i33

Şekil 4.1. Kırmızı LED aydınlatma sisteminin 10 cm ölçüm yüksekliğinde FAR değerlerinin ölçüm geometrisi üzerindeki dağılımı	40
Şekil 4.2. Kırmızı LED aydınlatma sisteminin 20 cm ölçüm yüksekliğinde FAR değerlerinin ölçüm geometrisi üzerindeki dağılımı	40
Şekil 4.3. Kırmızı LED aydınlatma sisteminin 30 cm ölçüm yüksekliğinde FAR değerlerinin ölçüm geometrisi üzerindeki dağılımı	41
Şekil 4.4. Mavi LED aydınlatma sisteminin 10 cm ölçüm yüksekliğinde FAR değerlerinin ölçüm geometrisi üzerindeki dağılımı	43
Şekil 4.5. Mavi LED aydınlatma sisteminin 20 cm ölçüm yüksekliğinde FAR değerlerinin ölçüm geometrisi üzerindeki dağılımı	43
Şekil 4.6. Mavi LED aydınlatma sisteminin 30 cm ölçüm yüksekliğinde FAR değerlerinin ölçüm geometrisi üzerindeki dağılımı	44
Şekil 4.7. Doku kültürü için 4 adet LED aydınlatma sistemlerinden oluşan modülün tasarım geometrisi	51
Şekil 4.8. Doku kültürü için 4 adet flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinden oluşan modülün tasarım geometrisi.....	52

ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.2. Bazı elektriksel ışık kaynaklarının karakteristikleri	10
Çizelge 1.3. Farklı renklerin bitki üzerindeki etkileri	11
Çizelge 3.1. 1. aşamada kullanılan LED'lerin teknik özellikleri	19
Çizelge 3.2. FAR sensörünün teknik özellikleri	21
Çizelge 4.1. CIE 2007 “durum A”ya göre LED'lerin ölçülen FAR değerleri.....	36
Çizelge 4.2. CIE 2007 durum B'ye göre LED'lerin ölçülen FAR değerleri.....	37
Çizelge 4.3. Kırmızı LED aydınlatma sisteminde ölçüm yüksekliğine bağlı olarak FAR değerlerinin değişimi	39
Çizelge 4.4. Mavi LED aydınlatma sisteminde ölçüm yüksekliğine bağlı olarak FAR değerlerinin değişimi	42
Çizelge 4.5. LED aydınlatma sisteminin farklı yerleşim geometrileri sonucunda aydınlatma düzleminden elde edilen FAR değerleri	46
Çizelge 4.5.'in devamı	47
Çizelge 4.6. Flüorışıl lamba aydınlatma sisteminin aydınlatma düzleminden ölçülen FAR değerleri	49
Çizelge 4.7. Ekonomik analizde kullanılan LED ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinin ve ekipmanlarının teknik özellikleri ve piyasa değerleri.....	53
Çizelge 4.8. LED ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinin ekonomik analiz sonuçları.....	55

KISALTMALAR VE SİMGELER DİZİNİ

cd	Candela
CRI	Renksel geriverim
FAR	Fotosentetik Aktif Radyasyon
LED	Işık yayan diyot
lm	lümen
m	metre
NBD	Net Bugünkü Değer
RMSE	Kök Ortalama Karesel Hata
s	saniye
str	steradyan
UV	Ultraviyole
W	Watt
μmol	Mikromol

1. GİRİŞ

Işık enerjisi tarımsal üretimin en önemli girdilerinden biridir. Güneşten gelen enerjiye destek olmak amacıyla kullanılan yapay ışık kaynakları fotobiyolojik olayların oluşumunu desteklemektedirler. Yapay aydınlatmada kullanılan ışık kaynaklarının canlıların gereksinmelerine uygun, emniyetli, çevreci ve düşük enerji ihtiyacına sahip olmaları çok büyük önem taşımaktadır. Bitkileri etkileyen fizyolojik faktörlerden en önemlisi ışıktır (Yağcıoğlu, 2009). Işık, bitkilere sadece enerji taşımaz aynı zamanda çeşitli fotomorfogenetik mekanizmalarla, enerjinin farklı metabolik yollara yönlendirilmesinde önemli rol oynar (Wassink and Stolwijk, 1956). Hayvanlar için ise ışık, günlük faaliyetlerini yerine getirebilmeleri için gereklidir. Bunun yanında, bitkilerde fotosentez sonucunda kimyasal formlarda depolanan ışık enerjisini yaşamaları için gerekli enerjinin sağlanmasında kullanırlar (Yağcıoğlu, 1996).

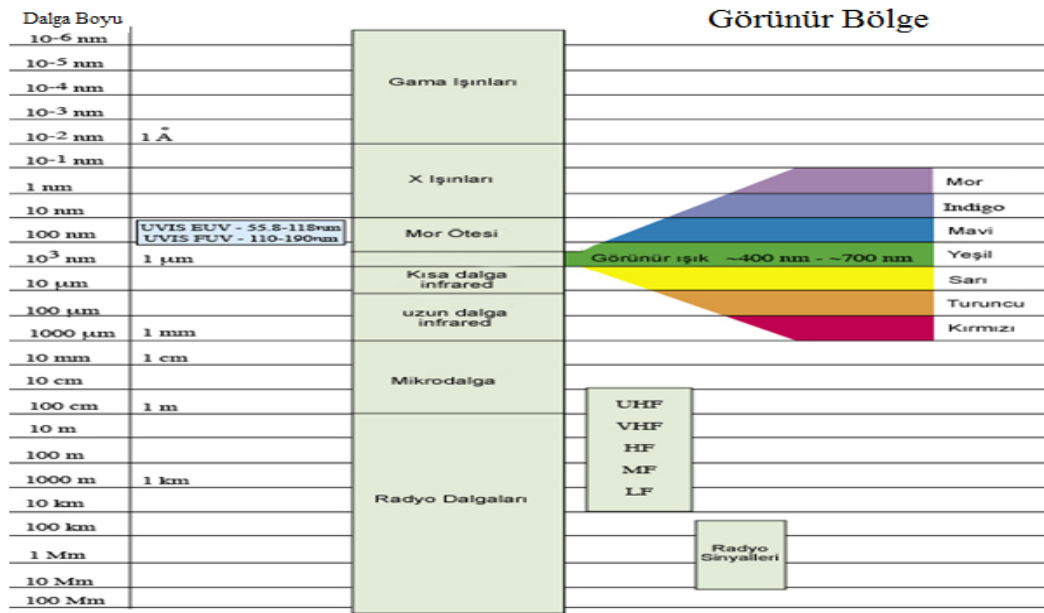
Bitkiler, hayvanlar ve insanlar için en uygun ışıklı şartlarının varlığı, onların üretim yeteneklerinden tam yararlanılarak nitelik ve nicelik açılarından üstün ürünlerin üretilmesine olanak verir. Bu nedenle, insanlar doğal ışığın yeterli olmadığı zamanlarda, ışığı yapay yollarla üretmeye çalışmışlardır (Yavuzcan, 1994; Yağcıoğlu, 1996). Yapay ışık kaynaklarının kullanılmasıyla tarımsal üretim nitelik ve nicelik yönünden iyileştirilmektedir. Elektrikli yapay ışık kaynakları olarak farklı lambalar (akkor telli lamba, yüksek basınçlı sodyum buharlı lamba, metal halojen lamba, serin beyaz flüorışıl lamba, düşük basınçlı sodyum buharlı lamba, cıva buharlı lamba) kullanılmaktadır. Bunun yanında, "Işık Yayan Diyot (Light Emitting Diode-LED) olarak bilinen yarı iletken diyot temelli ışık kaynakları; düşük enerji tüketimleri, istenilen dalga boyunda ışık verebilmeleri, uzun ömürlü olmaları, küçük boyutlu ve hızlı açılıp kapanabilmeleri gibi özellikleriyle, pek çok avantaj sunarken, diğer ışık kaynaklarına alternatif oluşturmaktadır. LED'ler yaygın olarak otomobil fren lambaları, ekranlar, cep telefonları için arka fon aydınlatma ve mekân aydınlatma alanlarında ışık kaynağı olarak kullanılmaktadır.

Belirli ışınım dağılımı ve yüksek ışık akısı çıktıkları nedeni ile LED'ler son yıllarda tarımda özellikle seralarda, fide üretiminde ve doku kültürü ile bitki üretiminde yapay ışık kaynakları olarak kullanılmaktadır (Hsu, 2011).

Bu çalışmada LED ışık kaynakları kullanılarak oluşturulan farklı lamba tasarımlarının FAR, yerleşim geometrisi, sığla balsamı (*Liquidambar styraciflua* L.,) bitkisinin doku kültürü ile üretiminde uygulanabilirliği ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemleri ile karşılaştırmalı ekonomik analizleri yapılarak kullanım olanakları araştırılmıştır.

1.1. Işığın Tanımı

Işık; çoğunlukla güneş ışınmasının gözle görülür bölümünü veya göze etki eden bir enerji çeşidini ifade eder. Işığın yayılım şekli elektromanyetik dalgalar biçiminde olurken, bu dalga hareketlerinin hızı 3×10^8 m/s'dir. Hem doğal (güneş) hem de yapay kaynaklardan oluşan elektromanyetik dalgalar yayılma yönünde sinüzoidal eğri biçimindeki bir yörüngede ilerler. Bu eğrinin birbirine yakın iki tepe noktası arasındaki uzaklık 'dalga boyu' olarak ifade edilir. Doğal ve yapay kaynaklardan yayılan elektromanyetik dalgalar farklı dalga boylarında olabilirler (Yıldız vd., 2010). Şekil 1.1.'de elektromanyetik spektrum ve görünür ışınım bölgesi verilmektedir. Elektromanyetik spektrum (tayf), elektromanyetik dalgaların boylarına göre sınıflandırılmasıyla elde edilir. Bu spektrumda insan gözü 380–760 nm dalga boyundaki ışığı görebilirken, bitkiler ise insan gözünün görme aralığı bölgesinde yer alan 400–700 nm dalga boyundaki ışığı fotosentez amacıyla kullanmaktadırlar.



Şekil 1.1. Elektromanyetik spektrum ve görünür ışınım bölgesi (Anonymous, 2011a)

Işık kaynakları; doğal ve yapay olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Güneşten gelen ışık doğal ışık olarak ifade edilirken, yapay aydınlatma kaynaklarından yayılan ışık ise yapay ışık olarak tanımlanır. Flüorışıl lambalar, metal halojen lambalar ve LED'ler gibi ışık kaynakları yapay ışık kaynaklarına örnektir (Ünal, 2009).

1.2. Fotometrik Büyüklükler

Aydınlatma hesaplarının yapılabilmesi ve değerlendirilmesinde kullanılan bazı terimlerin tanımları aşağıda verilmiştir (Ünal, 2009).

Uzay Açısı: İçerisinden belirli bir ışık akısı geçen koni veya piramit şeklindeki uzay parçasına uzay açısı denilmektedir. Uzay açısı yüzeyin büyüklüğü ile doğru, uzaklığın karesiyle ters orantılıdır. Yarıçapı 1 m olan bir küre yüzeyinde 1 m²'lik bir yüzeyi gören uzay açısının değeri bir steradyan (str) olarak tanımlanmaktadır.

Işık Akısı: Bir ışık kaynağının ışık akısı, bu ışık kaynağından çıkan ve normal gözün görmesine ait spektral duyarlılık eğrisine göre değerlendirilen enerji akısına denilmektedir. Birimi lümen (lm) olarak belirtilmektedir.

Işık şiddeti: Birim uzay açısı başına düşen ışık akısı miktarı olarak ifade edilmektedir. Birimi Candela (cd) olarak gösterilmektedir.

Aydınlık Şiddeti: Birim yüzeye düşen toplam ışık akısı o yüzeyin aydınlık şiddeti olarak tanımlanmaktadır. Aydınlık şiddetinin birimi lüks (lx)'tür.

1.3. Aydınlatma

Bitki büyümesi ve gelişmesi için ışık önemli bir parametredir. Hayvanlar için ise yaşamları için gerekli olan enerjiyi sağlamada dolaylı, fakat görme gibi yaşamsal faaliyetleri sürdürmede zorunlu olan bir etkidir. Bitkiler, hayvanlar ve insanlar için en uygun ışıklı şartların varlığı onların üretim yeteneklerinden tam yararlanarak nitelik ve nicelik açılarından üstün ürünlerin üretilmesine olanak verir. Bu nedenle doğal ışığın yeterli olmadığı koşullarda ışığın farklı amaçlarla temini için aydınlatma yapılmaktadır. Burada yapılan aydınlatmada yapay ışık kaynakları kullanılmaktadır (Gustafson, 1988; Yavuzcan, 1994; Yağcıoğlu, 1996).

1.4. Aydınlatmada Kullanılan Bazı Tanımlar

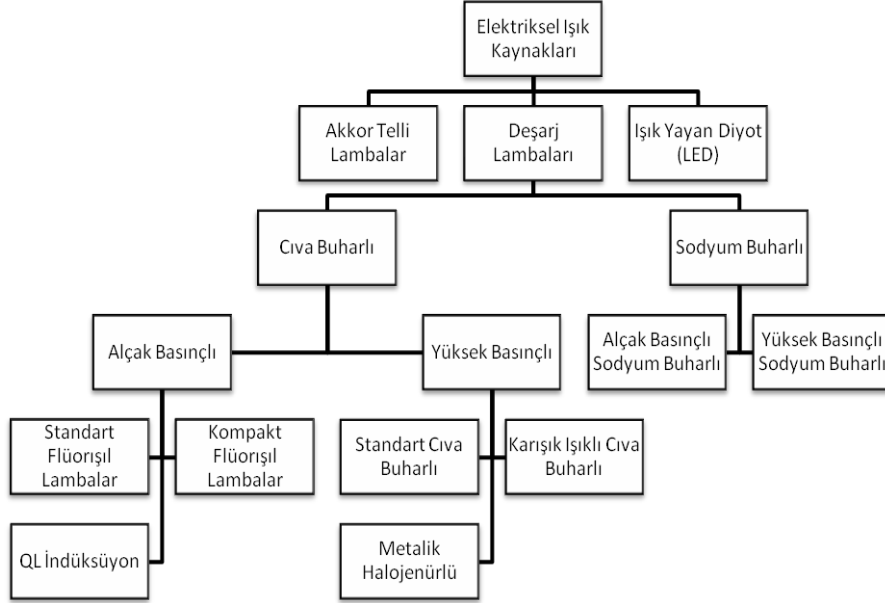
Aydınlatma Tesir Derecesi: Bir ışık kaynağının ışık akısının, kaynağın elektriksel gücüne oranı olarak tanımlanmaktadır. Birimi lm/W olarak gösterilmektedir (Yıldız vd., 2010).

Renksel geriverim (Color Rendering Index) (CRI): Işık kaynağından alınan ışığın kalitesini göstermektedir. Bitki yetiştirme, hayvan besleme ve sağım gibi faaliyetlerin yapıldığı ortamlarda CRI>80 olması gerektiği bildirilmektedir (Anonymous, 2005).

Fotosentetik Aktif Radyasyon (FAR): 400–700 nm dalga boyları arasında kalan ve fotosentezi doğrudan etkileyen, dolayısıyla bitki gelişimi üzerinde etkili bir ışımaya olarak tanımlanabilir. FAR değerinin birimi $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ dir. (Weir, 1975; Mpelkas, 1991).

1.5. Elektriksel Işık Kaynakları

Tarımsal aydınlatmada kullanılan ışık kaynakları; akkor telli lambalar, deşarj lambaları, flüorışıl lambalar, yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar ve belirli tarımsal faaliyetlerde kullanımı hızla yaygınlaşan LED ışık kaynakları Şekil 1.2.'de verilmiştir.



Şekil 1.2. Işık kaynaklarının sınıflandırılması (Ünal, 2009)

1.5.1. Akkor telli lambalar

Akkor telli lambalar, madeni bir telin elektrik akımıyla ısıtılarak akkor hale gelmesi sonucu ışık meydana getirmektedir. Telin (flamanın) üzerinden geçen akım, teli 2500-3000 °C'ye kadar kızdırdığı için, bunlar ergime sıcaklığı yüksek olan tungsten, wolfram veya molibden gibi metallere yapılmaktadır (Şekil 1.3). Akkor telli lambaların yatırım maliyetleri düşük olup, işletme maliyetleri yüksektir. Aynı zamanda çabuk ve çok ısınırlar (Yavuzcan, 1994).



Şekil 1.3. Akkor telli lamba

1.5.2. Deşarj lambaları

Işığın dolaylı ya da dolaysız bir biçimde, bir gazın, bir metal buharının ya da gaz-buhar karışımının içinde oluşan elektriksel boşalma ile üretildiği lambalara deşarj lambaları denilmektedir. Bunlar, içi gaz ve/veya metal buharıyla doldurulmuş tüp yapısı, tüpü diğer yardımcı ekipmanları dış etmenlerden koruyan ampul yapısı ve bazı modellerde ampulünün iç yüzeyine sürülen fosfor tozlarından oluşmaktadır. Deşarj lambaları, 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).

1.5.2.1 Yüksek basınçlı deşarj lambaları (HID)

Elektrotları sıcak tutmak için gerekli gücün daha düşük olması nedeniyle HID lambalarda lamba gücüyle verimi paralel bir artış göstermektedir. HID lambalar deşarj tüplerini çevreleyen ampul yapısı ve deşarj esnasında oluşan yüksek sıcaklık sonucunda dış ortam sıcaklığındaki değişimlerden çok fazla etkilenmemektedirler (Ünal, 2009).

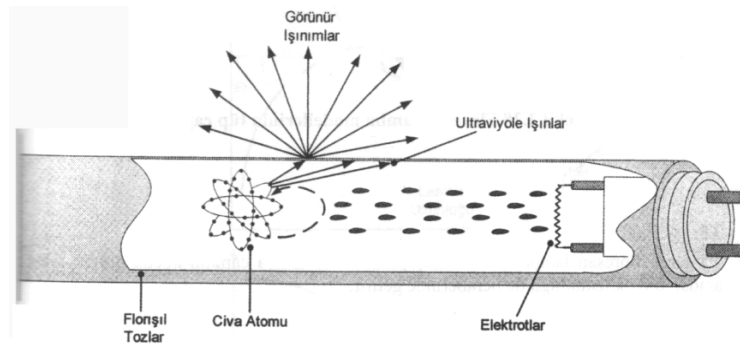
1.5.2.2 Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar

Bu lambalarda direnci yüksek bir seramik ark tüpünün içine doldurulan yüksek basınçlı sodyum buharının içinden elektrik akımı geçirilerek ışık elde edilir. Bu lambaların ışınım etkinliği 110 lm/W, ekonomik ömürleri 10000 saat

olarak kabul edilir. Doğal ışığın hiç olmadığı ortamlarda yapılacak bitkisel üretime yönelik aydınlatma uygulamalarında mavi ışığı yoğun düşük basınçlı cıva buharlı lambalar ve yüksek basınçlı cıva buharlı metal halojen lambalarla karma olarak kullanımları iyi sonuç vermektedir. Bu lambalar içerisindeki gazın yüksek olması nedeniyle lambanın renksel özelliklerinde düzelme meydana gelirken, ışıksal verimlerinde düşüş görülmektedir (Yağcıoğlu, 1996; Ünal, 2009).

1.5.2.3. Flüorışıl lambalar

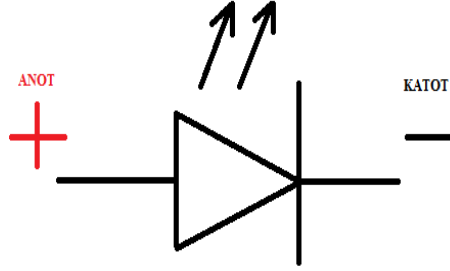
Flüorışıl lambalar düşük basınçlı cıva buharı içinden elektrik akımı geçirildiğinde mor ötesi bölgede daha yoğun olmak üzere 254, 365, 405, 436, 546, 577 ve 579 nm dalga boylarında ışık yayan yapay ışık kaynaklarıdır. Lamba tüpün iç yüzeyi, insan gözünün algılayamadığı mor ötesi bölgeye ait ışınları absorbe edip, onlardan elde ettiği enerjiyle görülebilen bölgede dalga boyuna sahip ışınlar yayımlayan flüorışyan (fosforlu) bir maddeyle kaplanarak, lambanın etkinliği artırılmıştır. Aydınlatma maddesi olarak çok çeşitli silikatlar, halojen fosfatlar, molibdatlar, fosfatlar, boratlar, volframatlar kullanılmaktadır. Flüorışıl lamba bir balast ve starter devresi ile birlikte çalıştırıldığı gibi bazı tüp modellerinde starter devresine ihtiyaç duyulmadan çalıştırılabilmektedir (Şekil 1.4). Kompakt flüorışıl olarak bilinen modellerin çalışmaları için gerekli olan yardımcı elemanları yapılarının içerisinde bulundurduklarından şebekeye doğrudan bağlanabilmektedirler (Yavuzcan, 1994; Yağcıoğlu, 1996; Ünal, 2009).



Şekil 1.4. Flüorışıl lambanın iç yapısı (Ünal, 2009)

1.5.3. Işık Yayan Diyot (LED) lambalar

Doğru yönde gerilim uygulandığında ışıyan; yani elektriksel enerjiyi ışık enerjisine dönüştüren özel katkı maddeli PN (Pozitif, Negatif) diyotlarına denilmektedir (Şekil 1.5.).



Şekil 1.5. Işık yayan diyot (LED)

LED'lerde, uygulanan akım arttıkça LED'in ışık akısı da doğru orantılı olarak artmaktadır. Eşik değeri aşıldığında LED ısınmaya başlamakta ve bunun sonucunda LED'in ışık akısı hızla azalmakta, kullanım ömrü kısalmakta ve hatta LED bozulmaktadır. Bu nedenle LED çalıştırılırken üretici firma tarafından belirtilen maksimum akım değerinin aşılmaması gerekmektedir (Ünal, 2009). LED'lerin farklı renklerde ışık oluşturabilmeleri için yarı iletken malzemeye ilave edilen bazı katkı maddeleri Çizelge 1.1.'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. LED'in yapısında kullanılan bazı malzemelere göre elde edilen dalga boyları (Musayev, 2002)

Yarı iletken malzeme	Dalga Boyu (nm)
<i>SiC, InGaP, GaN</i>	400-680
<i>GaP, GaAsP</i>	600-700
<i>GaAs, GaAsP</i>	700-950
<i>GaAlAs</i>	700-950
<i>GaAsSb, AlGaAsSb</i>	1000-2000

Geleneksel aydınlatma sistemleri ile LED'ler karşılaştırıldıklarında, LED'lerin sahip oldukları birçok olumlu özellikten dolayı her geçen gün biraz daha geliştirilerek

aydınlatma sektöründeki yerlerini almaktadırlar. LED'lerin geleneksel aydınlatma sistemlerine göre üstün özellikleri aşağıdaki gibi sıralanabilir (Ünal, 2009). LED'ler:

1. Çok düşük enerji tüketmektedirler,
2. Yüksek ışık verimliliğine sahiptirler,
3. Minimal boyutlara sahiptirler,
4. Geniş renk yelpazesine ve farklı renk sıcaklıklarına sahiptirler,
5. Şok ve titreşimlere karşı daha dayanıklıdırlar,
6. Cam, flaman gibi kırılğan elemanlara sahip değildirler,
7. Doğru akım kullandığı için tamamıyla sessizdirler,
8. Yapılarında cıva gibi ağır metaller ve halojen gazlar bulundurmadıkları için çevre dostudurlar,
9. Titreşimsiz çalışma özelliğine sahiptirler,
10. Isı ışınlarını düşük düzeyde içeren dalgaboyu aralığına sahip olmaları nedeniyle güvenli ve verimli çalışmaya sahiptirler.

LED'ler; düşük güçlü ve düşük parlaklıklı standart LED'ler, yüksek parlaklıklı LED'ler ve yüksek güçlü LED'ler olarak üç gruba ayrılmaktadırlar (Anonim, 2011a).

1.6. Elektriksel Işık Kaynaklarının Karşılaştırılması

Çizelge 1.2'de gösterilen veriler ile akkor telli lambalar ve flüorışıl lambaların güç tüketimleri, kullanım ömürleri ve verimleri kıyaslandığında flüorışıl lambaların akkor telli lambalara göre güç tüketimlerinin daha az, kullanım ömürlerinin ve verimlerinin daha yüksek olduğu görülmektedir. Yapay aydınlatmada genellikle tercih edilen flüorışıl ve yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalara alternatif olarak daha uzun kullanım ömrüne sahip, tükettiği enerjiyi ışığa daha büyük oranda dönüştüren daha verimli çalışan LED'ler kullanılmaya başlanmıştır. Özellikle doku kültürü çalışmalarında kullanılan LED aydınlatma lambaları ile enerjiden tasarruf sağlanırken, üretimi yapılan bitkiye en uygun FAR değerleri verilebilmektedir. Fotosentez işleminde diğer renklere kıyasla kırmızı ve mavi renklerin üstünlükleri bilinmektedir. Sadece kırmızı ve mavi rengin karışımıyla elde edilen LED lambalar

ise piyasada satılmaktadır. İlk yatırım maliyeti diğer lambalara kıyasla yüksek olmasına karşın, bitki gelişimi için istenilen aydınlatma sağlanabilmektedir.

Çizelge 1.2. Bazı elektriksel ışık kaynaklarının karakteristikleri (Anonim, 2011a; Anonymous, 2011b)

Lambalar	Güç (W)	Işık Akısı (lm)	Işıksal Verim (lm/W)	Renk Sıcaklığı (K)	Renk Geri verimi (CRI)	Ortalama Ömür (h)
Akkor Telli Lambalar	15-300	90-3150	8-16	2700	100	1000
Halojen Lambalar	10-300	60-4200	14-25	3000	100	2000-4000
Flüorışıl Lambalar ve TC-L Tipi Kompakt Flüorışıl Lambalar	15-58	120-5200	66-89	2700 3000 4000	85	Klasik Balast 12000 Elektronik Balast 16000
TC/TC-D/TC-T/TC-DD Tipi ve Kompakt Flüorışıl Lambalar	5-55	250-3500	50-87	2700 3000 4000	80	Klasik Balast 8000 Elektronik Balast 12000
Cıva Buharlı Lambalar	50-1000	1800-58000	40-60	3300 4300	40-60	8000-16000
Metal Halojen Lambalar	35-400	3100-20000	61-83	3300 4000 5000	70-90	6000-10000
Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı Lambalar	35-1000	2200-130000	66-138	2000	20 40	14000-18000
Alçak Basıncılı Sodyum Buharlı Lambalar	18-130	1800-25000	130-200	1750	-	12000
LED Bitki Büyütme Lambaları	90 300 600	4000 12520 25000	44 41 42	-	-	50000

1.7. Tarımsal Üretimde Aydınlatmanın Önemi

Tarımsal üretimde aydınlatma zamanı, süresi ve miktarı doğrudan verime etki etmektedir. Verim artışını veya azalışını etkileyen bu faktör, tarımsal faaliyete ve yetiştiriciliği yapılan canlılara göre farklılık göstermektedir. Tarımsal işletmelerde doğru aydınlatma uygulamaları ile birlikte diğer faktörlerde yetiştiricilik için ideal oldukları zaman, hem üretimde maksimum bir artış hem de elektrik tüketimde tasarruf sağlanmaktadır. Hem tamamlayıcı fotosentetik aydınlatma hem de tam yapay fotosentetik aydınlatma için aydınlatmanın gereğinden fazla ya da eksik

uygulanması, tarımsal işletmelerde verimin düşmesine neden olacağından, mutlaka yetiştiriciliği yapılacak canlıya göre uygun yoğunlukta ve sürede aydınlatma gerçekleştirilmelidir (Yağcıoğlu, 1996 ve 2009).

1.7.1. Bitkisel üretimde aydınlatmanın önemi

Işık, bitki büyümesi ve gelişmesinde önemli bir faktördür. Işığın, bitkinin vejetatif ve generatif organların oluşumu üzerinde, topraktan besin maddeleri alınmasında, fotosentezin gerçekleşmesinde, içsel maddelerin, dal ve gövde gibi organlarının hareketlerinde, stomaların açılıp kapanması ve solunum üzerinde etkileri bulunmaktadır. Bitkilerin farklı renklere karşı gösterdikleri tepkiler Çizelge 1.3.'de verilmiştir (Günay, 2005).

Bitki büyümesi ve gelişmesi açısından FAR değeri önemlidir. FAR 400-700 nm dalga boyu aralığındaki ışığın foton miktarı olarak tanımlanabilir. Bu nedenle FAR ölçümleri fotosentetik foton akısı yoğunluğu ölçümü şeklinde de ifade edilmektedir. FAR değerinin birimi $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ dir ve tamamlayıcı aydınlatmalı seralar için 50-200 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olması önerilmektedir (Weir, 1975; Mpelkas, 1991).

Çizelge 1.3. Farklı renklerin bitki üzerindeki etkileri (Weir, 1975; Mpelkas, 1991)

Işık Cinsi	Bitki Üzerindeki Etkisi
UV-B Işıkları (280-315 nm)	Bitkilerin bodur büyümesine ve çüce kalmasına neden olmaktadır. Özellikle dağlık bölgelerde miktarı artar. Bu ışınımlardan korunmak için bitkilerde; aşırı tüylenme diken oluşumu ve üst koruyucu dokuda mantar meydana gelmektedir.
UV-A Işıkları (315-400 nm)	Bitki üzerinde farklı karakterlerde sürgünlerin oluşmasına ve bunun sonucunda yeni çeşitlerin elde edilmesine neden olmaktadır. Bu ışınımlardan korunmak için bitkilerde; aşırı tüylenme, diken oluşumu ve üst koruyucu dokuda mantar meydana gelmektedir.
Mor Işık	Bitkilerde fotosentezi sağlamaktadır.
Mavi Işık	Bitkilerin bodur kalmasını sağlamaktadır.
Yeşil Işık	Bitkilerde fotosentezi, fototropizmi, kloroplast değişimini ve mantar dokusu oluşumunu sağlamaktadır.
Kırmızı Işık	Bitkilerin hayatsal faaliyetlerini devam ettirebilmeleri için gerekli olmaktadır.
Sarı Işık	Bazı bitkilerde seksüel gelişmeyi kuvvetlendirmektedir.

1.7.2. Hayvansal üretimde aydınlatma ve önemi

Kümes ve ahırların aydınlatılmasında ışık akısı önemli bir parametredir. Yetiştiriciliği yapılan hayvanlar üzerinde ışık kalitesi ve aydınlatma süresi dikkate alınmamaktadır. Asıl amaçlanan ise; hayvanların yemlik ve sulukları kolayca bulabilmeleri, barınak içerisinde rahatça dolaşabilmelerine imkan verecek yeterli bir aydınlatmanın sağlanabilmesi olarak ifade edilmektedir (Yıldız vd., 2010). Uygun şekilde aydınlatılmış hayvan barınaklarında günlük olağan işlerin daha iyi yapıldığı, işçilerin daha verimli çalıştığı ve sonuç olarak hayvanlara daha iyi bakıldığı gözlenmiştir (Yağcıoğlu, 1996).

Tarımsal işletmelerde diğer koşulların (nem, sıcaklık ve havalandırma) yanı sıra aydınlatmanın da yeterli olması durumunda; çalışanların performansları yükselmektedir. Çünkü böyle bir ortamda, çalışanların fizyolojik fonksiyonları olumlu etkilenmektedir. Aydınlatmanın yeterli olduğu işletmelerde, çalışanlar, yetiştiriciliği yapılan canlıya karşı da daha dikkatli ve hassas davranabildikleri için işletmede verim artmaktadır. Ayrıca yeterli aydınlatma ile karşılaşılacak iş kazalarının da önüne geçilebilmektedir.

Eğer aydınlatma şiddeti fazla olursa; hem işletmenin enerji tüketimi artar hem de hayvanların hareketlilik düzeylerinin artması sonucu, metabolik enerjilerinin önemli bir bölümünü hareket enerjisi olarak harcamak zorunda kalırlar. Tam tersi, eğer aydınlık şiddeti az ise bu seferde hayvanlar yemlik ve suluklara kolay ulaşamazlar ve sonuçta yem ve su tüketimlerindeki azalmaya bağlı olarak, verimde azalma meydana gelmektedir (Yıldız vd., 2010).

2. KAYNAK ÖZETLERİ

Türkiye’de FAR değeri açısından özellikle kış aylarında bulutluluk oranı yüksek olan yörelerde yüksek ışınımsal aydınlık gereken bitkilerin yetiştirilmesinde az da olsa bir eksiklik olduğu görülmektedir. Bitkilerin normal bir gelişim gösterebilmesi için günlük enerji ihtiyacı 1,2-1,7 MJ m⁻² değerleri arasında olmalıdır. Günlük toplam FAR değeri ile bitkinin fotosentez için ihtiyaç duyduğu ışınım bilinmeden, fotosentezi artırmak için aydınlatma uygulamalarının gerekli ya da gereksiz olduğu söylenilememektedir (Yağcıoğlu, 2009).

LED ışık kaynakları diğer elektrikli yapay ışık kaynaklarına göre birçok üstünlüğü bulunmasının yanı sıra, fotosentez yapan canlıların gereksinimlerine uygun dalga boylarında (renklerde) yapay aydınlatma olanağı vermeleri ile de 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, temin edilme kolaylığı, küçük olmaları nedeniyle her yere kolay takılabilmeleri ve buldukları ortamı diğer lambalarda olduğu gibi aşırı derecede ısıtmamaları gibi özellikleriyle de öne çıkmaktadırlar (Koç vd., 2009).

LED ışık kaynaklarının morötesinden (UV) kızılötesine (IR) kadar uzanan ve görünür ışık bölgesini de kapsayan geniş bir aralıkta üretimi söz konusu olabilmektedir. Araştırmacılar için oldukça iyi olanaklar sunan bu durum, özellikle araştırma çalışmalarının son yıllarda büyük bir artış göstermesine, görünür ve morötesi LED tabanlı imaj elde etme çalışmalarından LED ışığıyla gerçekleştirilen büyüme düzenleyicilere kadar değişim göstermektedir (Miyashita et al., 1995; Jao and Fang, 2003; Lawrance et al., 2005; Shimizu et al., 2005; Kondo et al., 2008).

Brazaityé et al., (2009), sera koşullarında farklı LED kombinasyonlarının domatesin büyümesi, gelişmesi ve verimi üzerine etkisini araştırmışlardır. Domates fideleri phytotron odalarında yetiştirilmiştir. Deneylerde, 447(L1), 638(L2), 660(L3), 669(L4) ve 731(L5) nm LED’lerden oluşan beş yüksek güçlü katı hal (solid-state) aydınlatma sistemi kullanılmıştır. Bunun yanında farklı dalga boylarında ek LED’ler yer almaktadır. Bunlar sırasıyla L1 için ek LED kullanılmazken, L2 için 380 nm dalga boyuna sahip ek LED, L3 için 520 nm dalga boyuna sahip ek LED, L4 için

595 nm dalga boyuna sahip ek LED, L5 için 622 nm dalga boyuna sahip ek LED kullanılmıştır. Araştırmacılar, hiçbir ışık kombinasyonunun erken domates verimi üzerinde önemli bir etkisinin olmadığı; ana LED kombinasyonlarına ek olarak kullanılan sarı ışığın ise domates verimini düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Yeh and 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 (MHL) ve akkor telli lambalardır. Doku kültürü ve büyüme odası endüstrisinde en popüler ışık kaynağı TFL'dir. Ancak, TFL kullanımı bir doku kültürü laboratuvarında toplam elektriğin % 65'ini tüketmektedir. Sonuç olarak, bu sanayiler sürekli olarak daha verimli ışık kaynakları aramaktadırlar.

Kommareddy and Anderson (2004), LED lambalarının da bulunduğu çeşitli ışık kaynaklarının etkinliğini karşılaştırmak için algler üzerine yaptıkları çalışmada akkor telli lamba, Gro-lux, flüorışıl lamba ve dalga boyu 643 nm ve 663 nm'lik LED lambalarından oluşan paneller kullanmışlardır. Denemede ışık yoğunluklarının ölçülmesi için ışık kaynaklarının 2,4 m uzağına bir algilayıcı yerleştirmişlerdir. Araştırmacılar alglerin fotosentez yapabilecekleri en uygun dalga boyu aralığı olan 400-500 nm ve 600-700 nm dalga boyları aralıklarını 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 optimum dalga boyu olan 600-700 nm'lik aralıkta tüketilecek enerji bakımından da en ucuz kaynak olduğunu belirlemişlerdir.

Bula ve ark. (1991), 21 günlük periyotta, $325 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ Fotosentetik Foton Flux'a sahip LED aydınlatma sisteminde lahana bitkisinin (*Lactuca sativa L.*) 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 karakteristikleri, soğuk beyaz flüorışıl lamba koşullarında büyüyen bitkilerinkinden farklı olarak bulunmamıştır. Bitkisel aydınlatma için LED sistemlerinin elektrik enerjisi dönüşüm verimliliği tahminleri flüorışıl lamba için yayımlanan değerlerin iki katı olduğunu bildirmişlerdir Yeh and Chung (2009),

LED'lerin kullanım ömrü 1000 ve 8000 saat olan akkor telli ve flüorışıl lambalara göre 100000 saat gibi çok uzun bir kullanıma sahip olduğunu belirtmişlerdir. Buna ek olarak LED'ler, konvansiyonel ışık kaynaklarına göre kıyaslandığında boyutları küçük, belirli dalga boylarına sahip, ısı üretimlerinin 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 kaynaklarıdır.

Yeh and Chung (2009), klorofil moleküllerinin mavi ve kırmızı dalga boylarını daha iyi soğurduğunu ifade etmişlerdir. Yeşil ve sarı dalga boyları yansıdıkları veya aktarıldıkları için fotosentezde önemli değildir. Bu, bitkilere verilen dalga boylarının kısıtlanması ve beyaz ışık ile bitkilerinin büyümelerinin gerçekleştirilmesi anlamına gelmektedir. LED'ler, beyaz ışığın içinde bulunan diğer dalga boylarının kullanımlarını ortadan kaldırarak bitki büyüme lambalarının gereksinim duyduğu güç miktarını azaltırlar. Fotosentetik metabolizmayı en iyi etkileyen ışık, kırmızı ve mavi ışıktır. Bu ışık nitelikleri özellikle ototrofik büyüme alışkanlıkları ile ilişkili gelişimsel özelliklerin iyileştirilmesinde etkilidir.

Tennessee et al., (1994), büyüme odasında farklı iki koşulda (LED ve ksenon ark lambası) kudzu (*Pueraria lobata*) yapraklarının fotosentezini, stoma iletkenliği ve izopren emisyonunu karşılaştırmışlardır. Kırmızı LED ışığının stomayı yeterince açıp açmadığını belirlemek için stoma iletkenliği ölçülmüştür. LED'ler 0-1500 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ FAR aralığında, eşit kırmızı ışık alanı (maksimum emisyon: 656±5nm) 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 FAR koşullarında (1000 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$), LED veya ksenon ark lambaları kullanıldığı durumlara göre benzer olduğu saptanmıştır. Yüksek CO₂ seviyelerinde, beyaz ve kırmızı ışığın arasında istatistikî 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 araştırmalarında, güvenilirliği, tekrarlanabilirliği ve taşınabilirliği artırılmış LED'e dayalı fotosentez lambalarının kullanılması gerektiği sonucuna varılmıştır.

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

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

Berkovich et al., (2005), yapay aydınlatma koşullarının, bitkilerin ışığa verdikleri tepkilerin belirlenmesi için en iyi yöntem olduğunu bildirmişlerdir. Bu yaklaşım, farklı emisyon spektrumlarında ve değişen ışık yoğunluğunda 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 süper parlak LED'lerin bitki büyümesi için gerekli olan FAR değerlerinin üretilmesinde yeterli olduğunu ifade etmişlerdir.

Pinho et al., (2007), camlı sera koşullarında marul (*Lactuca sativa* var. *crispa* L., 'Frillice') bitkisinin LED tabanlı tamamlayıcı aydınlatma sistemlerinde (LED1 ve LED2) büyüme performansını incelemişlerdir. Kontrol bitkileri geleneksel yüksek basınçlı sodyum (HPS) lambaları altında yetiştirilmiştir. LED1 sisteminde maksimum dalga boyu emisyonu 630 ve 460 nm olan kırmızı-turuncu (RO) ve mavi LED'ler kullanırken, LED2 sistemine ek olarak 594 nm ek sarı bileşen eklenmiştir. Sonuçlar, marul büyüme parametrelerinin tamamlayıcı spektral uyarlanmış LED aydınlatma sistemi ile geliştirilebileceğini işaret etmiştir. Kırmızı-turuncu LED'lerin biyokütle birikiminin artırılmasında etken olduğu ve sarı fotonların çok az ilavesinin biyokütle birikiminin artırılmasını teşvik ettiği ve bitkide yaprakların sayısını arttırdığı bildirilmiştir. Araştırmacılar marul bitkisinin büyümesi açısından mavi fotonlar ile sarı-yeşil fotonların arasında bir ilişkinin olduğunu ileri sürmüşlerdir.

Moreno (2004), farklı dizilişlere sahip LED ışık kaynaklarının aydınlatma homojenliğine etkisini incelemişlerdir. Çalışmada radyometrik analiz deneysel çalışma sonuçları, model çalışmasıyla karşılaştırılmıştır. Düz bir yüzeyde, ışık kaynağının yaratmış olduğu ışınımsal aydınlık (W/m^2) değerinin dağılımı incelenmiştir. Yan yana iki LED dizilişi, daire LED dizilişi ve doğrusal LED dizilişi modeli de kullanılmıştır. Denemeler belirli yükseklikler için gerçekleştirilmiştir. Deneme ile model sonuçlarının uyum içinde olduğu gözlenmiştir. Deneme sonuçlarından yan yana iki LED dizilişli sistemde yüzey üzerinde ölçülen ışınımsal aydınlık değerinin merkezden dışa doğru azaldığı gözlenmiştir. Benzer gözlem doğrusal LED dizilişli sistem incelendiğinde, ışınımsal aydınlık değerinin merkezden dışa uzaklaştıkça azaldığı ve ışınımsal aydınlık değerinin aydınlatma yüzeyinin çok büyük bir kısmında homojen olduğu ve sadece kenarlarda farklılık olduğu tespit edilmiştir.

Wu et al., (2009) güç LED'lerini (100W) 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 US\$ olarak

hesaplanmıştır. Diğer taraftan cıva buharlı lamba aydınlatma sisteminin kurulum maliyeti 18 milyon US\$ olarak bulunmuştur. LED aydınlatma sistemlerinin kurulum maliyetinin yüksek olmasının, LED lambaları ve güneş enerjisi panellerinden kaynaklandığını bildirmişlerdir. Fakat LED aydınlatma sistemlerinde %75 enerji tasarrufu sağlanabildiğinden dolayı, güç üretimi ve elektrik taşıma hatlarının maliyeti çok büyük bir oranda azalmaktadır. Şebeke ve güneş enerjisi destekli LED aydınlatma sistemlerinin geri ödeme sürelerinin sırasıyla 2,2 ve 3,3 yıl olarak hesaplanmıştır.

Bu çalışmada LED ışık kaynakları kullanılarak oluşturulan farklı lamba tasarımlarının FAR, yerleşim geometrisi, sığla balsamı (*Liquidambar styraciflua* L.,) bitkisinin doku kültürü ile üretiminde uygulanabilirliği ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemleri ile karşılaştırmalı ekonomik analizleri yapılarak kullanım olanakları araştırılmıştır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Materyal

Bu araştırma, Süleyman Demirel Üniversitesi, Ziraat Fakültesi, Tarım Makinaları Bölümü Araştırma laboratuvarında yürütülmüştür. Araştırma materyalini farklı renk (dalga boyu) ve güçteki LED ışık kaynakları oluşturmaktadır.

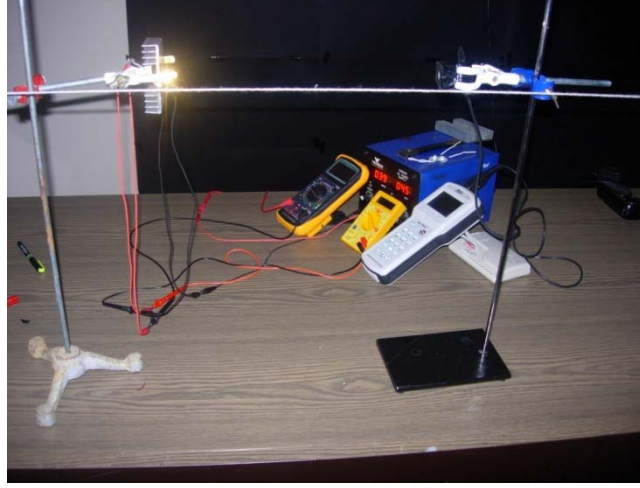
Çalışma amaçları doğrultusunda 1 ve 3 W gücündeki mavi, beyaz, turuncu, sıcak beyaz, kırmızı ve yeşil renk LED ışık kaynakları seçilmiştir. Seçilen LED'lerin üretici firma tarafından verilen teknik özellikleri Çizelge 3.1.'de sunulmuştur.

Çizelge 3.1. 1. aşamada kullanılan LED'lerin teknik özellikleri (Anonymous, 2011c)

LED Lamba	Renk	Işıma Açısı (°)	Işık Akısı (lm)	Akım (mA)	Gerilim (V)
 Edixeon marka 1W güç LED'i	Beyaz 5000-8000 Kelvin (K)	140	40	350	2.8-4.0
	Sıcak Beyaz 2800-3800K	140	22	350	2.8-4.0
	Kırmızı 620-630 nm	120	26	350	2.0-2.75
	Turuncu 585-595nm	120	30	350	2.0-2.75
	Yeşil 515-535 nm	140	35	350	2.8-4.0
	Mavi 460-475 nm	140	10	350	2.8-4.0
 Edixeon marka 3W güç LED'i	Beyaz 5000-8000 K	140	60	700	3.4-4.9
	Sıcak Beyaz 2800-3800K	140	45	700	3.4-4.9
	Kırmızı 620-630 nm	120	50	700	2.0-3.0
	Turuncu 585-595nm	120	55	700	2.0-3.0
	Yeşil 515-535 nm	140	75	700	2.8-4.0
	Mavi 460-475 nm	140	20	700	3.4-4.9

Çalışmada kullanılmak üzere seçilen LED'lerin FAR değerlerinin CIE 127-2007 standardına (CIE, 2007) göre belirlenmesi amacıyla bir test düzeneği

oluşturulmuştur. Araştırmada kullanılan test düzeneği Şekil 3.1.'de verilmiştir. Test düzeneği bir adet FAR sensörü, ölçümü yapılacak LED ve iki adet ölçüm standından oluşmaktadır.



Şekil 3.1. LED'lerin FAR değerlerinin belirlenmesinde kullanılan test düzeneği

CIE 127-2007 standardına göre ölçümlerin yapılabilmesi için FAR sensörü ve ölçüm yapılacak LED arasındaki mesafenin ve karşılıklı olarak konumlarının ayarlanması gerekmektedir. Bu nedenle, FAR sensörü ve LED'i konumlandırmak için iki adet laboratuvar tipi ölçüm standı kullanılmıştır. FAR ölçümleri tam karanlık koşulun ($0 \mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$) sağlanabildiği laboratuvar ortamında gerçekleştirilmiştir.



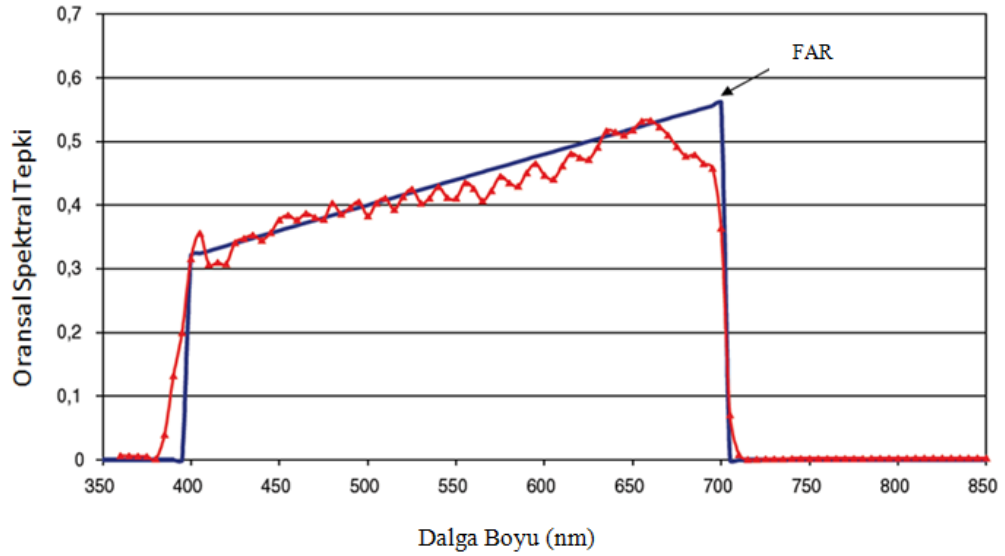
Şekil 3.2. FAR sensörü (LP 471PHOTO, DELTA OHM)

LED'lerden gelen ışınımı $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ (FAR) değeri olarak veri kaydediciye aktaran sensör Şekil 3.2.'de görülmektedir. Kullanılan FAR sensörünün teknik özellikleri ise Çizelge 3.2.'de verilmektedir.

Çizelge 3.2. FAR sensörünün teknik özellikleri (Anonim, 2011b)

FAR Ölçüm Aralığı ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	$0.1 \times 10^3 \dots 1.999$	$\dots 199.9$	$\dots 1999$	9.99×10^3
Çözünürlük	0.01	0.1	1	0.01×10^3
Dalga Boyu	400...700 nm			
Kalibrasyon Belirsizliği	< %5			
Çalışma Sıcaklık Aralığı ($^{\circ}\text{C}$)	0...50			

FAR ölçüm hassasiyeti, sensörün tepkisel eğrisinin fotosentez spektrum aralığına (400-700 nm) benzerliği ile doğru orantılıdır. Sensör ölçüm aralığı fotosentez spektrum aralığına yakın oldukça, yapılan ölçümlerin hassasiyeti artmaktadır. Şekil 3.3.'de sensörü üreten firmanın verdiği tepkisel eğri sunulmuştur (Anonim, 2011b). Anlaşılabacağı üzere, denemede kullanılan FAR sensörünün tepkisel eğrisi 400-700 nm aralığında fotosentez spektrum aralığı ile örtüşmektedir.



Şekil 3.3. FAR sensörünün tipik tepkisel eğrisi (Anonim, 2011b)

Araştırmada LED'ler ile ilgili ölçümlerde gerekli olan çalışma akım ve gerilim değerlerinin şebekeden kaynaklanan voltaj ve akım düzensizliklerinden korunmasını sağlanmak için kullanılan DC güç kaynağı Şekil 3.4.'de gösterilmiştir.



Şekil 3.4. DC güç kaynağı

Araştırmada kullanılan veri kaydedici Şekil 3.5.'te gösterilmektedir. Veri kaydedici sensörlerden gelen verileri toplama, depolama (yaklaşık 32.000 veriyi kaydetme) ve kaydedilen verileri bilgisayara aktarma gibi özellikleri bulunmaktadır. Veri kaydediciye aynı anda üç sensör daha bağlanabilmektedir. Böylece aynı anda üç ölçüm yapabilmektedir.



Şekil 3.5. DELTA OHM 9847K veri kaydedici

3.2. Yöntem

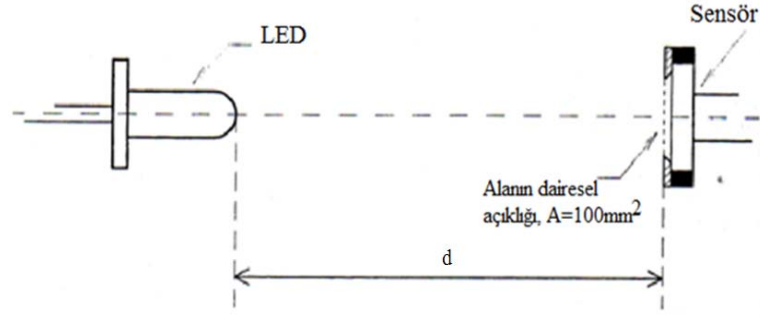
Bu araştırmada LED ışık kaynakları ile oluşturulan lambaların bazı tarımsal aydınlatma uygulamalarında kullanılabilirliği belirlenmeye çalışılmıştır.

Çalışmada 4 aşamalı bir iş planı çerçevesinde gerçekleştirilmiştir;

1. **aşama**: Seçilen LED ışık kaynaklarının FAR değerlerinin belirlenmesi
2. **aşama**: 1 W gücündeki 9 adet mavi ve kırmızı LED'ten oluşturulan aydınlatma sistemlerinin FAR dağılımlarının belirlenmesi
3. **aşama**: sığla balsamı (*Liquidambar styraciflua* L.) bitkisinin doku kùltürü ile üretiminde FAR isteklerine uygun LED aydınlatma sistemlerinin yerleşim geometrisinin belirlenmesi
4. **aşama**: sığla balsamı (*Liquidambar styraciflua* L.) bitkisinin doku kùltürü ile üretimi FAR değerlerine uygun LED ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinin ekonomik olarak karşılaştırması

3.2.1. 1. Aşama: Seçilen LED ışık kaynaklarının FAR değerlerinin belirlenmesi

Çalışma kapsamında seçilen LED'lerin FAR ölçümleri CIE 127-2007 standardına göre (CIE, 2007) gerçekleştirilmiştir. CIE standardında “durum A” ve “durum B” koşullarının oluşturulması gerektiği bildirilmektedir. Benzer LED'ler arasında veya farklı LED üreticilerinin benzer ürünleri arasında karşılaştırma yapabilmek için LED'lerin FAR değerleri hem “durum A” hem de “durum B”ye göre belirlenmiştir. şekil 3.6.'da FAR değerlerinin ölçümü için şematik gösterim verilmiştir. İlgili standartta sensör ile FAR ölçümü yapılan LED arasındaki mesafe durum A için 316 mm, durum B için 100 mm olarak verilmiştir. FAR sensörünün yüzey alanının dairesel açıklığı 100 mm² olacak şekilde düzenleme yapılmıştır (şekil 3.6.).



Şekil 3.6. FAR değerlerinin ölçümü için CIE standart durumlarının şematik gösterimi (durum A için $d=316$ mm, durum B için $d=100$ mm) (CIE, 2007)

LED'lerin FAR ölçümünü yapabilmek için aynı anda iki adet multimetre ile hem akım hem de gerilim değerleri okunarak, üretici firmanın belirlediği optimum çalışma koşullarında LED'ler sırayla çalıştırılmıştır. 1W ve 3W'lık LED'lerin FAR ölçümü için multimetrede sırasıyla 350 mA ve 700 mA değerleri sabitleninceye kadar beklenmiş olup, tamamen karanlık ortamın oluşturulduğu koşullarda FAR ölçümü yapılmıştır. Deneme süresince özellikle akım değişimlerinin olmamasına dikkat edilmiştir. FAR ölçüm verilerinin kaydedilmesi için devreye bağlanan dijital multimetrelerde okunan akım ve gerilim değerlerinin, ölçümü yapılan LED'in katalog değerlerine en yakın olduğu zamana kadar beklenilmiştir. Devrede ölçülen akım ve gerilim değerleri kullanılarak güç hesaplaması yapılmıştır.

Ölçüm sırasında içeriye ışık girmemesine ve LED'in deneme süresince optimum sıcaklıkta kalmasına dikkat edilmiştir. LED'in sıcaklık kontrolü bir alüminyum soğutucu plaka tarafından sağlanmıştır. Denemede, hem 1 W hem de 3 W'lık LED'lerin mavi, beyaz, turuncu, sıcak beyaz, kırmızı ve yeşil renklerinin FAR değerlerinin ölçümleri 3 tekrarlı olarak yapılmıştır.

Denemede üzerinde durulan özellik bakımından elde edilen veriler, faktöriyel düzende varyans analizi tekniğiyle "durum A" ve "durum B" için analiz edilmiştir. Denemede renk faktörünün mavi, beyaz, turuncu, sıcak beyaz, kırmızı ve yeşil olmak üzere altı serisi, güç faktörünün de 1W ve 3W olmak üzere iki seviyesi mevcuttur. Alt gruplardaki gözlem adedi sayısı (tekerrür) 3'tür. Grup ortalamaları arasındaki farklılıkların belirlenmesinde 'TUKEY TESTİ' kullanılmıştır.

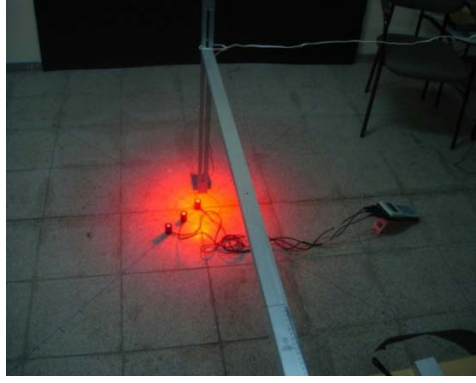
3.2.2. 2. Aşama: 1 W gücündeki 9 adet mavi ve kırmızı LED'ten oluşturulan aydınlatma sistemlerinin FAR dağılımlarının belirlenmesi

Tarımda geleneksel yapay ışık kaynaklarının dağılım düzgünlüğü önemlidir. Işık kaynağının dağılım düzgünlüğü, ışık kaynağı alanının aydınlatma düzlemi mesafesine oranının ayarlanması ile elde edilebilir. Sera gibi kompakt çalışma alanlarına sahip ortamlarda ışık kaynağının tekdüze dağılımının sağlanması alan sınırlaması nedeni ile zordur. Sera koşullarında fide ve bitki üretiminde bitki ihtiyaçlarının karşılanmasında aydınlatma homojenliği için ışık absorpsiyonunun tekdüzeliği gereklidir. Bu nedenle aydınlatma elemanlarının tasarımı ve dizaynı aydınlatma homojenliğinin sağlanması açısından önemlidir (Hsu, 2011).

LED aydınlatma sistemlerinin FAR dağılımlarının belirlenmesi amacıyla Şekil 3.7.'de verilen test düzeneği oluşturulmuştur. Test düzeneğinde şu elemanlar bulunmaktadır;

- a) Aydınlatma sistemi (9 adet LED ve LED'lerin bağlandığı standart baskılı devre kartı)
- b) Aydınlatma sistemi yükseklik ayar düzeni
- c) Tüm sistemleri üzerinde taşıyan dikdörtgen alüminyum profil kol
- d) FAR sensörü
- e) Güç kaynağı
- f) Multimetre

Baskılı devre kartı (soğutuculu) üzerine monte edilmiş 9 adet kırmızı ve 9 adet mavi LED'ten oluşan aydınlatma sistemleri sırasıyla Şekil 3.8. ve Şekil 3.9.'da verilmiştir. LED aydınlatma sistemlerinde mavi veya kırmızı LED'ler içte bulunan ve bir kenarı 3.1 cm olan eşkenar üçgenin köşelerine ve dışta bulunan ve çapı 6.4 cm olan daireye 6 adet yerleştirilmiştir. LED'lerin aydınlatma sistemini oluşturan ve LED'lerin dizildiği baskılı devre kartının yerleşim geometrisi üretici firma tarafından sağlanmıştır (Anonymous, 2011d).



Şekil 3.7. LED aydınlatma sistemlerinin FAR dağılımlarının belirlenmesinde kullanılan test düzeneği

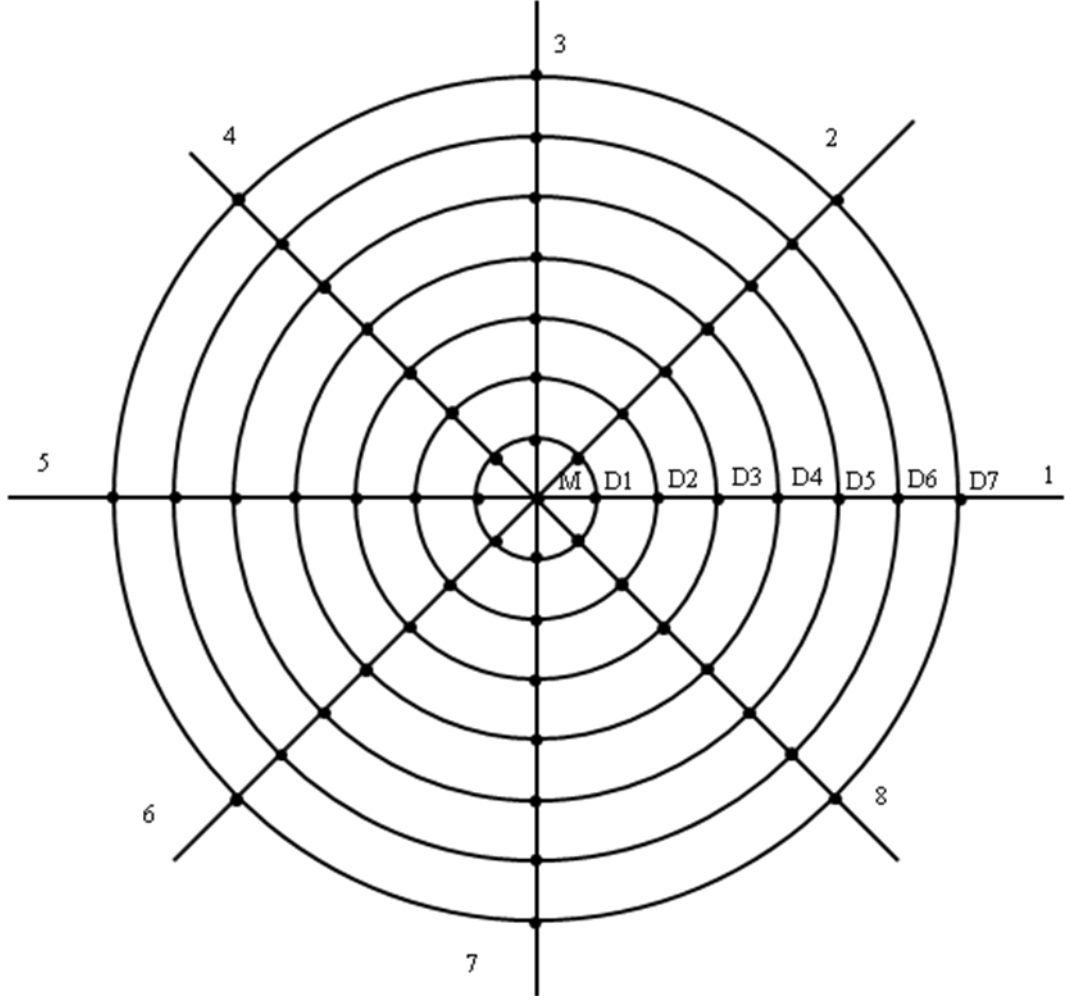


Şekil 3.8. Baskılı devre kartı üzerine yerleştirilmiş 9 adet kırmızı LED'ten oluşan aydınlatma sistemi



Şekil 3.9. Baskılı devre kartı üzerine yerleştirilmiş 9 adet mavi LED'ten oluşan aydınlatma sistemi

Ölçümler iki farklı renkteki (kırmızı ve mavi) LED lambaların, FAR sensöründen dikey olarak 10, 20 ve 30 cm yükseklikteki konumlarında gerçekleştirilmiştir. FAR ölçümlerinin yapılacağı noktaların belirlenmesi amacıyla öncelikle lambanın yerleştirildiği nokta merkez (M) kabul edilerek 5, 10, 15, 20, 25, 30 ve 35 cm yarıçaplarında iç içe daireler çizilmiş ve D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7 şeklinde tanımlanmıştır. Son olarak çizilen daireler 45'er derecelik açı ile 8 eşit parçaya bölünmüş ve ölçüm noktaları işaretlenerek belirlenmiştir. Bu yolla, FAR ölçümleri bir adet M noktasında olmak üzere her bir daire üzerinde 8 ayrı noktada FAR sensörü yerleştirilerek yapılmıştır. Ölçümler sonucunda elde edilen veriler Microsoft Excel programında dairesel radar grafik fonksiyonu kullanılarak görselleştirilmiştir. Veriler arasındaki farklılıkların daha net olarak gösterilebilmesi amacıyla eksenler logaritmik olarak ölçeklendirilmiştir. Ölçüm eksenleri 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 olarak numaralandırılmıştır (Şekil 3.10.).



Şekil 3.10. LED'lerin FAR değerlerinin dağılımlarının belirlenmesi için bir merkez ve iç içe dairelerden oluşan ölçüm noktaları

3.2.3. 3. Aşama: sığla balsamı (*Liquidambar styraciflua* L.) bitkisinin doku kültürü ile üretiminde FAR isteklerine uygun LED aydınlatma sistemlerinin yerleşim geometrisinin belirlenmesi

Çalışmanın bu bölümünde FAR ihtiyacı bilinen bir üretimde FAR değerinin homojen olarak dağıtılabilmesi için LED aydınlatma sistemlerinin yerleşim geometrisi belirlenmiştir. Tarımsal alanda kontrollü koşullarda gerçekleştirilen doku kültürü çalışmalarında aydınlatma sistemlerinin gerekliliği doku kültürü ile ilgili çalışmalarda vurgulanmıştır (Yeh and Chung, 2009). *Liquidambar styraciflua* L., sığla balsamı bitkisinin doku kültürü ile üretiminde en düşük FAR değerinin 16 saatlik fotoperiyot uygulamasında $50 \pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olduğu bildirilmiştir (Lee et al., 1985). Çalışmanın bu aşamasında doku kültüründe ihtiyaç duyulan FAR değerinin

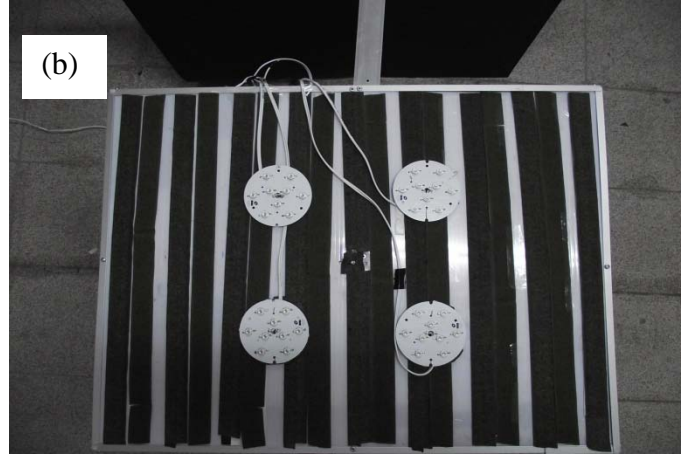
homojen bir şekilde dağıtılabilmesi için farklı yerleşim geometrilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir.

LED aydınlatma sistemlerinin yerleşim geometrisinin belirlenmesinde kullanılan test düzeneği Şekil 3.11.'de verilmiştir. Test düzeneği şu elemanlardan oluşmaktadır;

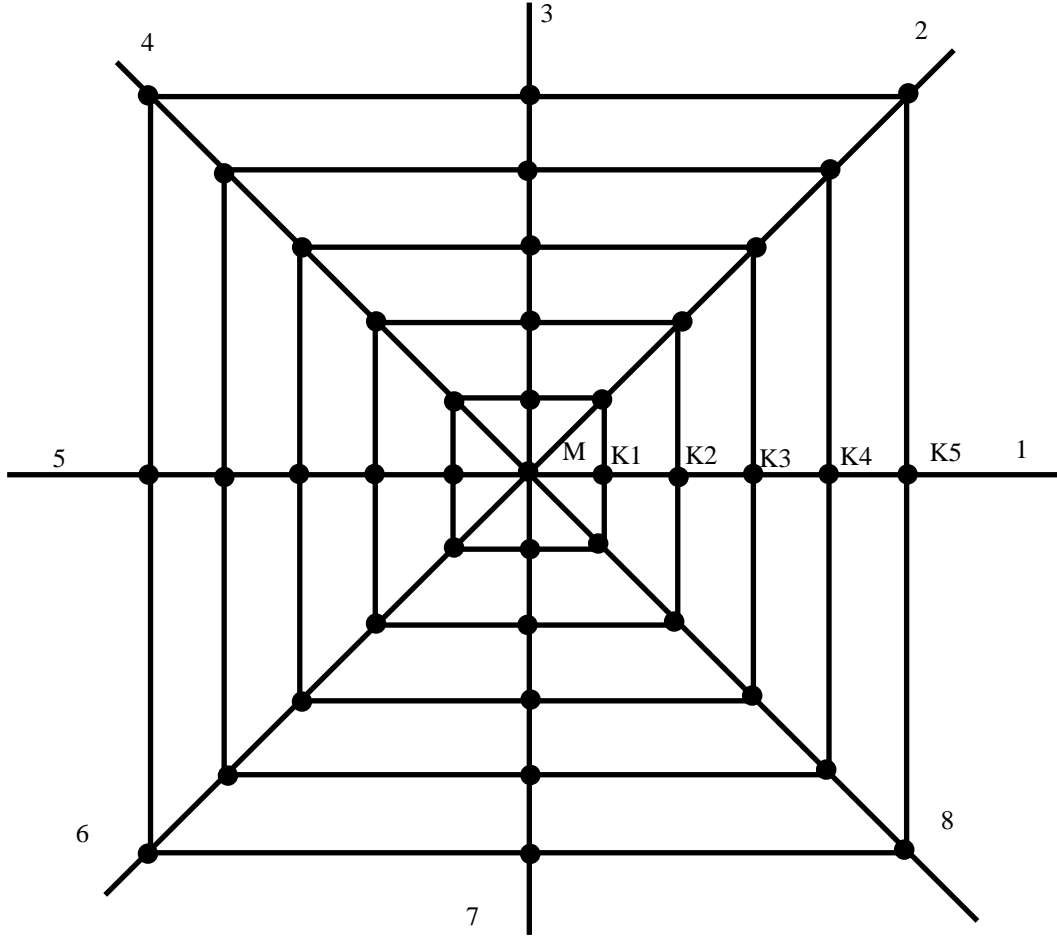
- a) LED aydınlatma sistemi
- b) LED aydınlatma sistemlerinin yerleştirildiği yapışkan yüzeyli platform
- c) Ayarlı LED aydınlatma sistemi platformtaşıma sistemi
- d) Tüm sistemleri taşıyan dikdörtgen alüminyum profil kol
- e) FAR sensörü
- f) Güç kaynağı
- g) Multimetre

LED ile ölçüm düzlemi arasındaki mesafenin belirlenmesi amacıyla ön denemler yapılmış, mesafenin 30 cm olması durumunda FAR değerinin tabanda $0,49 \text{ m}^2$ lik alanda yaklaşık olarak $50 \mu\text{mol m}^{-2} \text{ s}^{-1}$ olduğu saptanmıştır. Bunun yanında 1. aşamada yapılan denemelerden, gerekli olan FAR değerini kırmızı LED'lerin sağlaması nedeni ile 9 adet kırmızı LED'ten oluşan aydınlatma sistemi seçilmiştir.

FAR değerleri, aydınlatma düzlemine çizilen geometri üzerinde belirlenen noktalarda ölçülmüştür (Şekil 3.12.). FAR ölçümlerinin yapılacağı zemin üzerine kenar uzunluğu 20, 40, 60, 80 ve 100 cm olan kareler iç içe çizilmiştir. Geometri üzerinde, M: merkez ve K1, K2, K3, K4 ve K5 sırasıyla, kenar uzunlukları 20, 40, 60, 80 ve 100 cm olan kareleri göstermektedir. FAR ölçümleri bir adet merkezde ve her bir karede sekiz adet olacak şekilde yapılmıştır. Ölçüm eksenleri 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 ve 8 olarak numaralandırılmıştır (Şekil 3.12.).



Şekil 3.11. LED aydınlatma sistemlerinin yerleşim geometrisinin belirlenmesinde kullanılan test düzeneği



Şekil 3.12. LED aydınlatma sistemlerinin FAR değerlerinin dağılımlarının belirlenmesi için ölçüm noktalarının geometrisi

Aydınlatma sistemlerinin yerleşim geometrisinin FAR dağılımlarına etkisini belirlemek için birçok geometrik şekil kullanılabilir, fakat çalışmayı sınırlandırmak için kare, daire, üçgen, dikdörtgen ve paralelkenar gibi geometrik şekiller dikkate alınmıştır. Her bir geometrik yerleşim sonucu elde edilen FAR değerlerinin homojenliğini belirlemek için ölçülen FAR değerlerinin $50 \pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ değerini baz alarak kök ortalama karesel hata, (Root Mean Square Error, RMSE) değeri saptanmıştır (Ekinci, 2001).

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n [y_i - x_i]^2}{n}} \quad (3.1)$$

Eşitlikte,

RMSE = Kök ortalama karesel hata ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$),

y = i. istenen FAR değeri ($50 \pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$),

x = i. ölçülen FAR değerleri ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$),

n= Ölçüm sayısıdır.

RMSE değeri, ölçülen FAR değerlerinin istenen FAR değerinden sapma miktarını göstermektedir. Ayrıca, ölçülen FAR değerlerinin dağılım homojenliğini belirlemek için FAR değerlerinin standart sapmaları hesaplanmıştır.

3.2.4. 4. Aşama: Sığla balsamı (*Liquidambar styraciflua* L.,) bitkisinin doku kültürü ile üretimi FAR değerlerine uygun LED ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinin ekonomik olarak karşılaştırması

3. aşamada en homojen FAR dağılımı sağlayan LED aydınlatma sisteminin (9 adet 1 W güçteki kırmızı LED'lerden oluşmaktadır) yerleşimi belirlenmiştir. Bu tasarım, yaklaşık olarak aynı FAR düzeyini ($50 \pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sağlayan ve doku kültürü çalışmalarında sıklıkla tercih edilerek kullanılan flüorışıl lamba ile ekonomik yönden karşılaştırılmıştır. Bu nedenle, tek bir flüorışıl lambanın 20 cm yükseklikte sağlayabileceği FAR değerlerinin dağılımı, Şekil 3.13.'de verilen düzenek kullanılarak belirlenmiştir.



Şekil 3.13. Flüorışıl lambanın belirli yükseklikte sağlayabileceği FAR değerlerinin dağılımını belirlemek için kullanılan test düzeneği

Çalışmada flüorışıl lamba için yansıtıcı kullanılmamış olup lambanın bağlandığı yüzey alüminyum folyo ile kaplanmıştır. LED aydınlatma sistemi için kullanılan geometri flüorışıl lambanın (OSRAM L36W/840, Cool White) FAR değerlerinin dağılımlarını belirlemek amacıyla da kullanılmıştır. LED aydınlatma sisteminin güç kaynağı ile beraber ve tek bir flüorışıl lambanın (balast ile beraber) şebekeden çektiği güç Wattmetre ile ölçülmüştür. Aynı FAR değerlerini sağlayan LED aydınlatma sistemi ile flüorışıl lambaların ekonomik analizinde, ekonomik ömür (yıl), LED satın alma bedeli (TL), ek ekipman (LED güç kaynağı, fan, baskılı devre kartı ve kanatlı alüminyum soğutucu) fiyatı (TL), flüorışıl aydınlatma sistemi (Balast + Starter + Armatür+Tüp) satın alma fiyatı (TL), elektrik fiyatı (TL/kWh), reel faiz oranı parametreleri kullanılmıştır. Her iki sistemin yatırım ve işletme maliyeti hesaplanmıştır. LED aydınlatma sisteminde yatırım maliyeti hesaplanırken, LED ve ek ekipman satın alma fiyatları dikkate alınmıştır. Ekonomik parametrelerden yatırımın net bugünkü değeri (NBD) hesaplanmıştır. Bu parametre, uluslararası literatürde yaygın olarak kullanılan ve paranın zaman değerini dikkate alan önemli bir göstergesidir. NBD değeri pozitif olan bir proje yatırım açısından caziptir (Yurdakul, 1998; Boukis vd., 2009).

$$NBD = \sum_{t=0}^m \frac{CF}{(1+i)^t} \quad (3.2)$$

Eşitlikte,

NBD= Yatırımın net bugünkü değeri (TL),

CF=t. yıldaki net nakit akışı (TL/yıl),

i= reel faiz oranı (0,09/yıl),

m=dönem sayısı,

t=süre (yıl)

Ekonomik analizlerde, yatırım gideri olarak LED aydınlatma sistemlerinin flüorışıl sistemlere göre maliyet farkı kullanılırken, kâr değeri olarak LED sistemlerinin flüorışıl sistemlere göre enerji tüketim farkının parasal karşılığı değerlendirilmiştir.

4. ARAŞTIRMA BULGULARI VE TARTIŞMA

4.1. LED'lerin FAR Ölçümleri

Çalışmanın 1. aşamasında 1 ve 3 W güçteki mavi, beyaz, turuncu, sıcak beyaz, kırmızı ve yeşil renklerdeki LED'lerin FAR değerleri CIE 2007 standardına bağlı olarak “durum A” ve “durum B” için belirlenmiştir (Çizelge 4.1 ve 4.2).

Çizelge 4.1.'de “durum A” için iki farklı güçte (G1, (1W) ve G3, (3W)) ve 6 farklı renkte (LED1 (Kırmızı), LED2 (Beyaz), LED3 (Mavi), LED4 (Yeşil), LED5 (Turuncu), LED6 (Sıcak beyaz)) LED'lerin FAR ölçüm sonuçları verilmiştir. “Durum A” ya göre yapılan deneylerde FAR sensörü ile LED arasındaki mesafe 316 mm olarak alınmıştır. 1W gücündeki LED'lerin FAR değerleri $2,207 \pm 0,039$ ile $0,752 \pm 0,050 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ arasında değişirken, 3W gücündeki değerleri ise $5,443 \pm 0,351$ ile $1,305 \pm 0,051 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ arasında değişmiştir (Çizelge 4.1.).

Ölçümü yapılan hem 1W hem de 3W güce sahip LED'lerde en yüksek FAR değerleri kırmızı renkte belirlenirken en düşük FAR değeri turuncu renkte bulunmuştur. Bunun nedeni olarak, FAR sensörleri kırmızı renge karşı daha hassas olmalarından kaynaklandığı düşünülmektedir (Vatandaş vd., 2010).

FAR özelliği bakımından yapılan varyans analizi sonucunda renk×güç interaksyonu istatistiksel açıdan önemli bulunmuştur ($P < 0.01$) (Çizelge 4.1 ve 4.2). Bunun sonucu olarak renkler arasındaki farklılık irdelenirken her bir güç düzeyi kendi içinde, güçler arasındaki farklılık belirlenirken de her bir renk ayrı ayrı incelenmelidir. Nitekim, ortalamalar arasındaki farklılıklar bu durum göz önüne alınarak ‘Tukey Testi’ ile belirlenmiş ve Çizelge 4.1 ve 4.2’de harflendirilmiştir.

Çizelge 4.1'deki veriler ışığında, G1'de LED1'in, LED2 hariç diğer bütün renklerden daha yüksek FAR değerlerine sahip olduğu ($P < 0.01$) ve nümerik olarak LED2'den daha yüksek FAR değerine sahip olmasına rağmen bu farkın önemli olmadığı söylenebilir. G1'de LED2 ve LED6 benzer FAR değerlerine sahip olduğu bulunmuş olup bu değerlerin LED3, LED4 ve LED5'den farklı olduğu belirlenmiştir ($P < 0.01$). G1'de LED3, LED4 ve LED5 benzer FAR değerlerine sahip olup aralarındaki fark önemli bulunmamıştır ($P < 0.01$). G3'de LED1 diğer renklerden

daha yüksek FAR değerine sahip olmuştur ($P<0.01$). G3’de LED2 ve LED3 benzer FAR değerlerine sahip olduğu bulunmuş olup bu değerlerin LED4, LED5 ve LED6’dan farklı olduğu bulunmuştur ($P<0.01$). G3’de LED4 ve LED5 benzer FAR değerlerine sahip olup LED6’dan farklı olduğu bulunmuştur ($P<0.01$). Her bir renk için G3’ün FAR değerleri G1’inkinden daha yüksek bulunmuştur ($P<0.01$).

Çizelge 4.1. CIE 2007 “durum A”ya göre LED’lerin ölçülen FAR değerleri

	FAR değerleri ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	
	G1 (1W LED)	G3 (3W LED)
LED1 (Kırmızı)	2,207±0,039Ab	5,443±0,351Aa
LED2 (Beyaz)	1,955±0,029ABb	3,243±0,213Ba
LED3 (Mavi)	1,735±0,022Cb	3,240±0,071Ba
LED4 (Yeşil)	0,822±0,012Cb	1,725±0,013Da
LED5 (Turuncu)	0,752±0,050Cb	1,305±0,051Da
LED6 (Sıcak beyaz)	1,631±0,017Bb	2,543±0,082Ca

*Büyük harfler her bir güçte renkler arası farklılığı, küçük harfler her bir renkte güçler arası farklılığı göstermektedir.

Çizelge 4.2’de durum B için iki farklı güçte (G1, (1W) ve G3, (3W)) ve 6 farklı renkte (LED1 (Kırmızı), LED2 (Beyaz), LED3 (Mavi), LED4 (Yeşil), LED5 (Turuncu), LED6 (Sıcak beyaz)) LED’lerin FAR ölçüm sonuçları verilmiştir. Durum B’ye göre yapılan deneylerde FAR sensörü ile LED arasındaki mesafe 100 mm olarak alınmıştır. 1W gücündeki LED’lerin FAR değerleri 22,933±0,203 ile 7,683±0,320 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ değişirken 3 W gücündeki değerleri ise 58,030±3,340 ile 15,770±0,189 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ arasında değişmiştir (Çizelge 4.2). Ölçümü yapılan 1W gücündeki LED’lerde en yüksek FAR değeri kırmızı LED için belirlenirken en düşük FAR değeri yeşil LED için bulunmuştur. 3 W gücündeki LED’ler için benzer durum olduğu belirlenmiştir. LED’lerin FAR değerlerinin ölçüm sonuçlarının LED aydınlatma sistemlerinin tasarımlarında bilinmesi gereken bir parametre olduğu bildirilmiştir (Koç vd., 2009; Vatandaş vd., 2010).

Analiz sonuçları G1’de LED1’in, LED2 ve LED3 hariç diğer bütün renklerden daha yüksek FAR değerlerine sahip olduğu ($P<0.01$) ve nümerik olarak LED2 ve LED3’ten daha yüksek FAR değerine sahip olmasına rağmen bu farkın önemli olmadığını göstermiştir ($P>0.01$). G1’de LED2, LED3 ve LED6 benzer FAR değerlerine sahip olup bu değerlerin LED4 ve LED5’den daha yüksek olduğu bulunmuştur ($P<0.01$). G3’de LED1 diğer renklerden daha yüksek FAR değerine sahip olmuştur ($P<0.01$). G3’de LED2 ve LED3 benzer FAR değerlerine sahip olduğu bulunmuş olup bu değerlerin LED4, LED5 ve LED6’dan farklı olduğu bulunmuştur ($P<0.01$). G3’de LED4 ve LED5 benzer FAR değerlerine sahip olup LED6’dan farklı olduğu bulunmuştur ($P<0.01$). Durum B’de her bir renk için G3’ün FAR değerleri G1’inkinden daha yüksek bulunmuştur ($P<0.01$).

Çizelge 4.2. CIE 2007 durum B’ye göre LED’lerin ölçülen FAR değerleri

	FAR değerleri ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)	
	G1 (1W LED)	G3 (3W LED)
LED1 (Kırmızı)	22,933±0,203Ab	58,030±3,340Aa
LED2 (Beyaz)	20,057±0,284ABb	33,800±1,930Ba
LED3 (Mavi)	17,840±0,284ABb	33,767±0,674Ba
LED4 (Yeşil)	7,683±0,320Cb	17,547±0,224Da
LED5 (Turuncu)	9,807±0,500Cb	15,770±0,189Da
LED6 (Sıcak beyaz)	16,447±0,106Bb	26,200±0,569Ca

*Büyük harfler her bir güçte renkler arası farklılığı, küçük harfler her bir renkte güçler arası farklılığı göstermektedir.

4.2. LED Aydınlatma Sistemlerinin FAR Dağılımları

1W güçte 9 adet kırmızı ve mavi LED’lerden oluşan LED aydınlatma sistemlerinin farklı ölçüm yüksekliklerinde (10, 20 ve 30 cm), FAR ölçümlerinin ölçüm düzleminde oluşturulan geometriye bağlı (Şekil 3.10.) olarak dağılımı Şekil 4.1.-4.6’da verilmiştir. Ölçüm düzlemindeki geometri, “radar” grafiklerine benzerlik gösterdiğinden verilerin gösterimi için tercih edilmiştir. Grafiklerde, Merkez (0

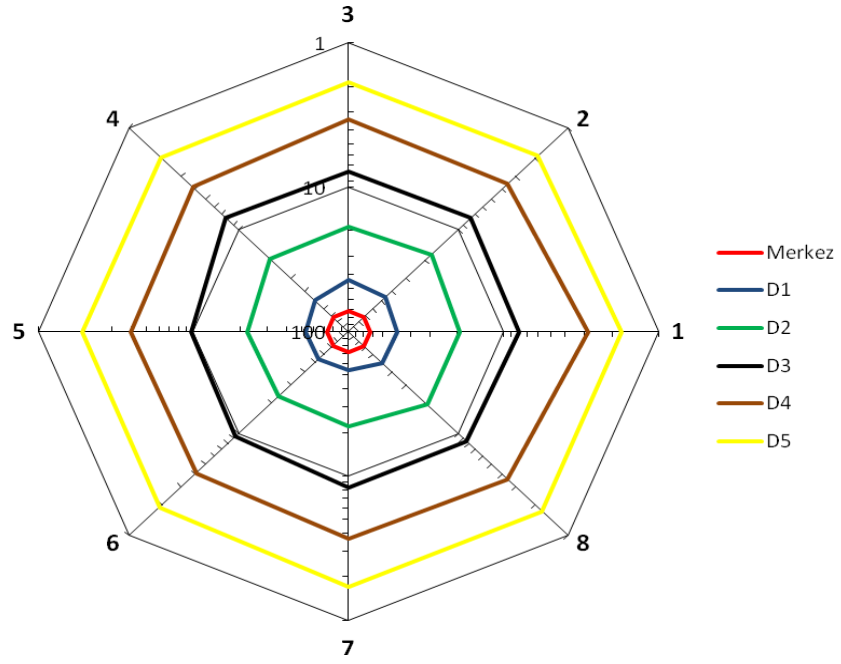
ölçüm noktası) ve D1, D2, D3, D4, D5, D6, D7 sırasıyla 5, 10, 15, 20, 25, 30, 35 cm yarıçaplı daireleri göstermektedir. FAR ölçümleri bir adet merkezde ve her bir daire üzerinde sekiz adet olacak şekilde yapılmıştır. Veriler arasındaki farklılıkların daha net olarak gösterilebilmesi amacıyla eksenler logaritmik ölçeklendirilmiştir.

Kırmızı LED aydınlatma sisteminin farklı ölçüm yüksekliklerinde ölçüm geometrisi üzerindeki FAR ölçüm sonuçları Çizelge 4.3. ve Şekil 4.1.- 4.3.'te verilmiştir. FAR değerleri çalışma yüksekliklerine bağlı olarak 0-260 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) arasında değişmiştir (Çizelge 4.3.). FAR değerlerinin daireler üzerindeki değerleri standart sapmaları ile beraber verilmiştir. Merkez noktada tek bir ölçüm yapıldığı için standart sapması bulunmamaktadır. Merkez ölçüm noktasında, ölçülen FAR değerinin yükseklik arttıkça azalmış olup, ölçüm yüksekliği 3 kat artarken ölçülen FAR değeri 8,10 kat azalmıştır. Benzer bir şekilde, örneğin, kırmızı LED aydınlatma sistemi ölçüm yüksekliği 10 cm olması durumunda, “Merkez” ölçüm noktasından en dış daireye (D7) doğru FAR değerlerinin azaldığı tespit edilmiştir. Diğer ölçüm yüksekliklerinde de benzer eğilim belirlenmiştir. Yüksek FAR değerlerinde standart sapmanın daha yüksek olduğu gözlenmiştir. FAR değeri 10 cm ölçüm yüksekliğinde D4 üzerindeki noktalarda $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olarak ölçülürken, benzer durum 20 cm yükseklikte D6'da ölçülmüştür. 30 cm yükseklikte yapılan çalışmada FAR değeri D8'de $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olarak ölçülmüş olup geometride yer verilmemiştir.

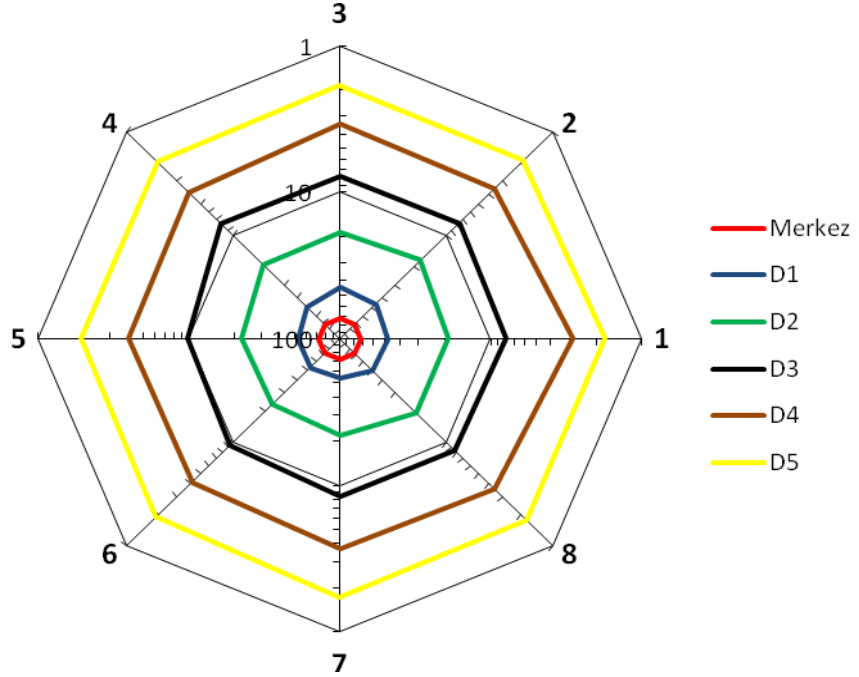
Çizelge 4.3. Kırmızı LED aydınlatma sisteminde ölçüm yüksekliğine bağlı olarak FAR değerlerinin değişimi

	FAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
	Kırmızı LED aydınlatma sistemi ölçüm yüksekliği (cm)		
	10	20	30
Merkez	260,00	72,40	32,09
D1	82,64±14,98	49,65±3,49	27,54±0,79
D2	14,00±1,74	20,21±2,03	16,89±0,86
D3	3,59±0,50	8,34±0,78	9,23±0,52
D4	0,00±0,00	3,62±0,38	5,12±0,42
D5	0,00±0,00	1,84±0,20	2,86±0,16
D6	0,00±0,00	0,00±0,00	1,71±0,11
D7	0,00±0,00	0,00±0,00	1,03±0,05

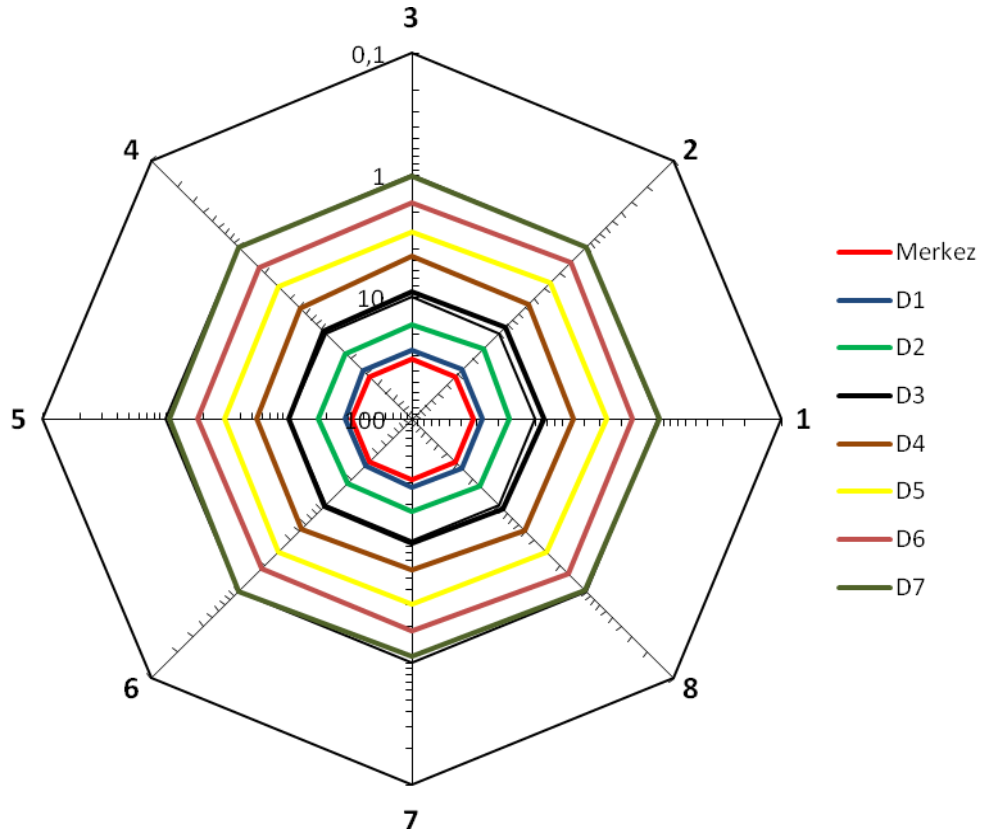
Kırmızı LED aydınlatma sisteminin farklı ölçüm yüksekliklerinde (10, 20 ve 30 cm) ölçüm düzlemi geometrisi üzerindeki FAR ölçümlerinin görsel dağılımı Şekil 4.1.-4.3.'de verilmiştir. Grafiklerde, Merkez ve dairelerde yapılan ölçümler farklı renklerde verilmiş olup FAR değerleri logaritmik ölçekte sunulmuştur. Şekil 4.1.-4.3. incelendiğinde, FAR değerlerinin dağılımının merkezde yüksek iken kenarlara doğru azaldığı ve bir şemsiye görüntüsü verdiği gözlenmiştir. Bu durum, farklı dizilişlere sahip LED ışık kaynaklarının aydınlatma homojenliğine etkisinin incelendiği çalışmada ışınımsal aydınlık değerlerinin merkezden dışa doğru azaldığı Moreno (2004) tarafından yapılan çalışmada belirlenmiştir. Diğer taraftan aynı daireler üzerindeki yapılan ölçümlerde standart sapma değerleri görülmektedir. FAR ölçümlerindeki standart sapmanın LED'lerin optik ve geometrik eksenlerinin farklı olmasından (CIE, 2007) ve/veya baskılı devre kartı üzerindeki LED'lerin diziliş geometrisinden kaynaklanmış olabileceği öngörülmektedir.



Şekil 4.1. Kırmızı LED aydınlatma sisteminin 10 cm ölçüm yüksekliğinde FAR değerlerinin ölçüm geometrisi üzerindeki dağılımı



Şekil 4.2. Kırmızı LED aydınlatma sisteminin 20 cm ölçüm yüksekliğinde FAR değerlerinin ölçüm geometrisi üzerindeki dağılımı



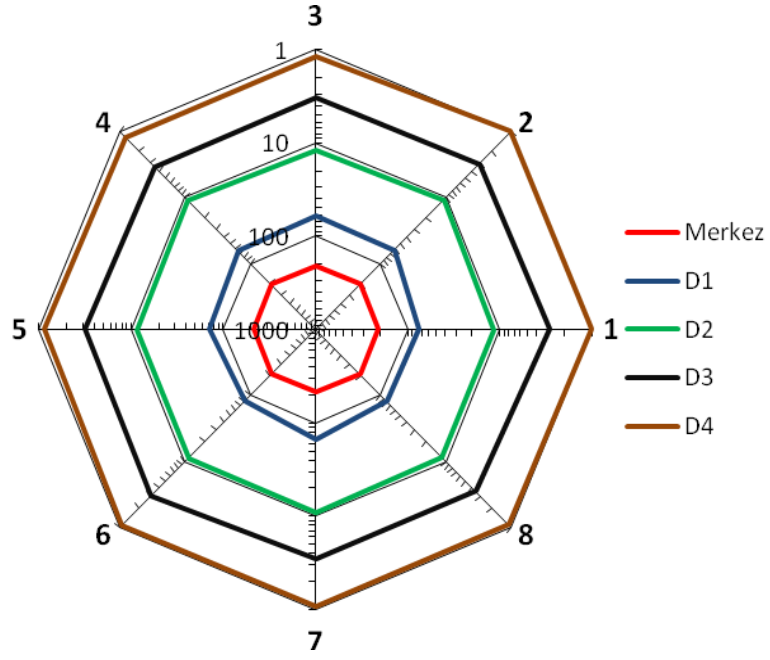
Şekil 4.3. Kırmızı LED aydınlatma sisteminin 30 cm ölçüm yüksekliğinde FAR değerlerinin ölçüm geometrisi üzerindeki dağılımı

Mavi LED aydınlatma sisteminin farklı ölçüm yüksekliklerinde ölçüm geometrisi üzerindeki FAR ölçüm sonuçları Çizelge 4.4. ve Şekil 4.4.-4.6.'da verilmiştir. FAR değerleri ölçüm yüksekliklerine bağlı olarak 0-211 ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) arasında değişmiş olup kırmızı LED aydınlatma sistemine göre FAR değeri daha düşük bulunmuştur (Çizelge 4.4.). Merkez ölçüm noktasında, ölçülen FAR değerinin yükseklik arttıkça azalmış olup ölçüm yüksekliği 3 kat artarken ölçülen FAR değeri 8,08 kat azalmıştır. FAR değerleri, hem ölçüm yüksekliğin artması ile hem de merkez noktadan en dış daireye doğru gidildikçe azaldığı tespit edilmiştir. Aynı zamanda yüksek FAR değerlerinde standart sapmanın daha yüksek olduğu gözlenmiştir. FAR değeri 10 cm ölçme yüksekliğinde D5 üzerindeki noktalarda $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olarak ölçülürken, benzer durum 20 cm yükseklikte D7'de ölçülmüştür. 30 cm yükseklikte yapılan çalışmada FAR değeri D8'de $0 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olarak ölçülmüş olup, geometride yer verilmemiştir.

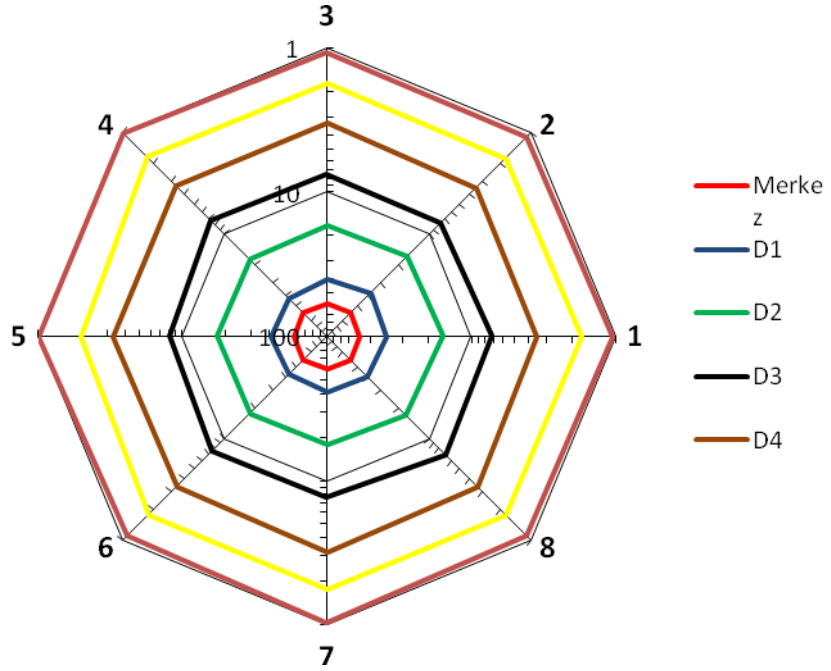
Çizelge 4.4. Mavi LED aydınlatma sisteminde ölçüm yüksekliğine bağlı olarak FAR değerlerinin değişimi

	FAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)		
	Mavi LED aydınlatma sistemi ölçüm yüksekliği (cm)		
	10	20	30
Merkez	211,00	59,50	26,1
D1	71,38±8,65	40,35±1,64	21,49±0,78
D2	11,37±0,42	17,02±0,63	13,79±0,53
D3	3,22±0,20	7,45±0,40	7,78±0,42
D4	1,11±0,09	3,36±0,11	4,45±0,23
D5	0,00±0,00	1,77±0,08	2,67±0,22
D6	0,00±0,00	1,06±0,04	1,65±0,11
D7	0,00±0,00	0,00±0,00	1,10±0,07

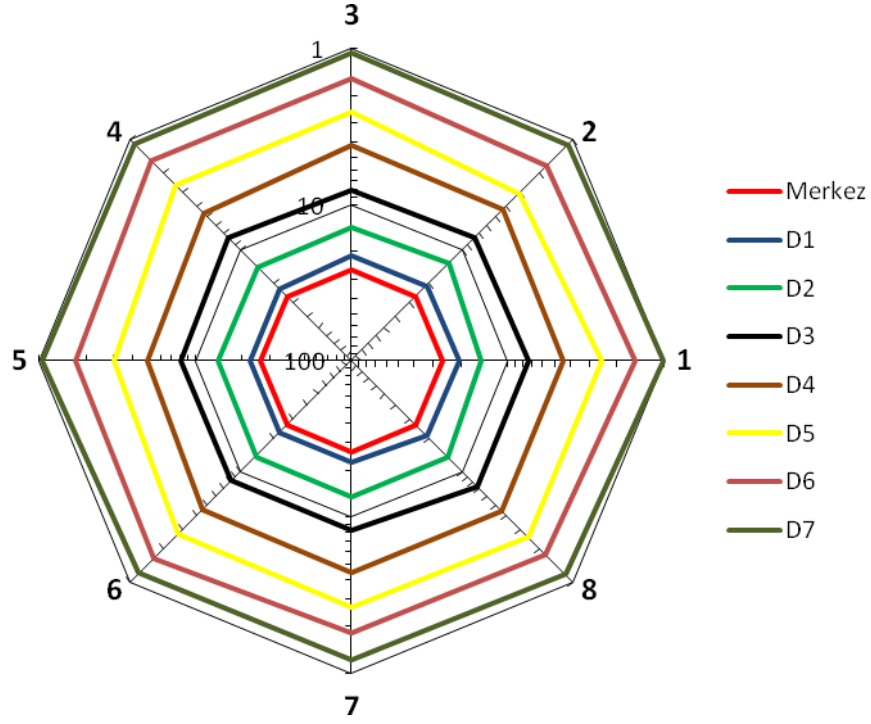
Mavi LED aydınlatma sisteminin farklı ölçüm yüksekliklerinde (10, 20 ve 30 cm) ölçüm düzlemi geometrisi üzerindeki FAR ölçümlerinin görsel dağılımı Şekil 4.4.-4.6.'da verilmiştir. Şekil 4.1.-4.3. incelendiğinde, FAR değerlerinin dağılımının merkezde yüksek iken kenarlara doğru azaldığı ve bir şemsiye görüntüsü verdiği gözlenmiş olup kırmızı LED'lerin FAR değerlerinin dağılımı ile paralellik göstermektedir.



Şekil 4.4. Mavi LED aydınlatma sisteminin 10 cm ölçüm yüksekliğinde FAR değerlerinin ölçüm geometrisi üzerindeki dağılımı



Şekil 4.5. Mavi LED aydınlatma sisteminin 20 cm ölçüm yüksekliğinde FAR değerlerinin ölçüm geometrisi üzerindeki dağılımı



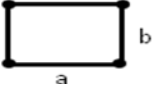




Şekil 4.6. Mavi LED aydınlatma sisteminin 30 cm ölçüm yüksekliğinde FAR değerlerinin ölçüm geometrisi üzerindeki dağılımı

4.3. LED Aydınlatma Sistemlerinin Yerleşim Geometrisi

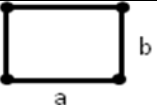
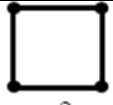


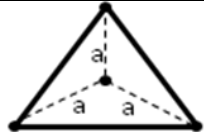
Çalışmanın bu aşamasında doku kültüründe ihtiyaç duyulan FAR değerinin homojen bir şekilde dağıtılabilmesi için farklı LED aydınlatma sistemlerinin yerleşim geometrilerinin belirlenmesi hedeflenmiştir. Aydınlatma sistemlerinin yerleşim geometrisinin FAR dağılımlarına etkisini belirlemek için kare, dikdörtgen, daire, üçgen, paralelkenar gibi geometrik yapılar dikkate alınmıştır. Daha öncede belirtildiği gibi LED aydınlatma sistemi 9 adet 1 W güçte kırmızı LED'lerden oluşmaktadır. FAR değerleri, aydınlatma düzlemine (laboratuvar zemini) çizilen geometri üzerinde belirlenen noktalarda ölçülmüş olup, FAR ölçümlerinin yapılacağı beton zemin üzerine uzunluğu 20, 40, 60, 80 ve 100 cm olan kareler iç içe çizilmiştir. Ölçümlerde, K5 üzerindeki ölçümler istenilen FAR değerinden çok düşük olduğu için buradaki veriler iptal edilmiştir. Geometri üzerinde, M: merkez ve K1, K2, K3 ve K4 sırasıyla, kenar uzunlukları 20, 40, 60, 80 cm olan kareleri göstermektedir. FAR ölçümleri bir adet merkezde ve her bir karede sekiz adet olacak şekilde

yapılmıştır. LED aydınlatma sisteminin farklı yerleşim geometrileri sonucunda aydınlatma düzleminde elde edilen FAR değerleri Çizelge 4.5.' te verilmektedir. Çizelge 4.5.'te ikinci ve üçüncü satırda geometrik şekiller (dikdörtgen, kare, daire, paralelkenar ve eşkenar üçgen) karakteristik uzunluklar, uzunluk büyüklükleri ve LED aydınlatma sistemlerinin yerleşim noktaları (şekiller üzerinde siyah noktalar) verilmiştir. Aynı çizelgede birinci ve ikinci sütun aydınlatma düzlemindeki ölçüm eksenini ve ölçüm karesini tanımlamaktadır. Deneme sonuçları, tüm yerleşim geometrilerinde FAR değerlerinin merkezden en dış kareye doğru azaldığını göstermiştir. Örneğin, karakteristik kenar uzunluğu 20 cm olan kare yerleşim geometrisinde, merkezde ölçülen FAR değeri $107 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ iken, 1. ölçüm ekseninin 4. karesinde FAR değeri $27 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Her bir LED yerleşim geometrisine ait FAR değerlerinin RMSE ve standart sapma değerleri hesaplanmış ve hesaplama sonucunda en düşük RMSE ve standart sapma değeri, karakteristik kenar uzunluğu 40 cm olan kare yerleşim geometrisinde sırasıyla 12,65 ve 12,35 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak LED aydınlatma sisteminin tasarımında kare yerleşim planını dikkate almak FAR değerlerinin istenen FAR değerinden uzaklığı ve homojenliği bakımından uygun olacaktır. Buna ek olarak en uygun yerleşim geometrisini belirlemek çok sayıda farklı ölçülerde geometrik şekil kullanılabilir. Bu çalışmada, ele alınan geometriler arasında en uygun sonucu kare yerleşim planı vermiştir.

Çizelge 4.5. LED aydınlatma sisteminin farklı yerleşim geometrileri sonucunda aydınlatma düzleminde elde edilen FAR değerleri

		FAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)											
Geometrik → şekil		 Dikdörtgen		 Kare			 Daire			 Paralelkenar		 Eşkenar üçgen	
Ölçüm ekseni	Ölçüm karesi	a=20 cm b=15 cm	a=40 cm b=20 cm	a=20 cm	a=30 cm	a=40 cm	R=20 cm	R=30 cm	R=40 cm	a=20 cm b=23 cm	a=30 cm, b=23 cm	a=15 cm	a=20 cm
Merkez	M	135	87	107	87	60	160	126	99	128	95	131	105
1	K1	107	80	100	80	58	120	101	86	103	72	102	91
	K2	80	80	76	71	61	83	79	77	88	62	77	78
	K3	50	63	49	50	50	47	52	58	63	45	47	54
	K4	29	38	27	30	34	27	29	36	38	28	26	30
2	K1	110	79	97	71	60	126	110	95	101	76	105	89
	K2	79	63	70	60	54	81	80	81	77	70	53	73
	K3	45	50	37	37	40	46	53	56	50	49	33	40
	K4	32	20	19	25	29	19	30	32	26	41	14	24
3	K1	114	80	91	81	59	128	112	99	109	96	108	90
	K2	77	60	60	63	53	82	81	85	75	76	73	65
	K3	42	36	35	40	38	45	48	57	43	49	41	36
	K4	25	21	20	23	24	22	24	30	22	26	21	21
4	K1	106	77	84	66	48	108	95	82	87	80	99	87
	K2	74	70	57	55	47	69	67	65	57	69	74	71
	K3	46	52	35	39	41	39	41	43	34	47	45	48
	K4	25	32	19	23	29	21	23	24	18	27	25	29
5	K1	115	85	87	67	47	116	98	79	88	79	108	93
	K2	88	89	63	56	42	78	73	64	61	67	84	81
	K3	56	75	39	41	34	46	47	46	40	50	52	58
	K4	31	47	22	25	24	24	27	27	21	30	29	34

Çizelge 4.5.'in devamı

		FAR ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)											
Geometrik → şekil		 Dikdörtgen	 Kare	 Çember			 Paralel kenar		 Eşkenar üçgen				
Ölçüm ekseni	Ölçüm karesi	a=20 cm b=15 cm	a=40 cm b=20 cm	a=20 cm	a=30 cm	a=40 cm	R=20 cm	R=30 cm	R=40 cm	a=20 cm b=23 cm	a=30 cm, b=23 cm	a=15 cm	a=20 cm
6	K1	107	78	60	69	44	85	80	71	93	80	100	87
	K2	82	72	50	58	43	68	50	59	81	69	74	71
	K3	52	57	42	44	41	60	43	42	50	43	46	46
	K4	31	38	38	27	34	15	30	26	27	25	26	28
7	K1	120	77	104	79	55	134	108	84	102	75	111	92
	K2	89	70	88	75	56	102	86	72	80	74	85	75
	K3	56	61	59	59	53	60	58	54	53	61	55	54
	K4	31	42	35	39	39	34	34	34	31	43	32	34
8	K1	103	84	82	60	54	100	90	81	90	85	101	88
	K2	79	75	73	57	60	80	73	72	54	60	71	71
	K3	49	59	71	38	60	39	48	53	36	49	47	46
	K4	31	37	47	21	46	24	26	32	19	23	27	27
RMSE		38,62	22,75	29,33	20,09	12,65	45,23	34,88	26,76	33,17	23,07	35,82	27,39
Standard sapma		33,16	20,65	26,77	20,01	12,35	39,00	29,99	23,29	30,58	21,57	32,65	25,48

4.4. Flüorışıl Lambanın Aydınlatma Düzlemindeki FAR Değerlerinin Dağılımları

Bir önceki bölümde en homojen FAR dağılımını sağlayan LED aydınlatma sisteminin yerleşim geometrisi belirlenmiştir. Bu tasarım, yaklaşık aynı FAR düzeyini ($50\pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) sağlayan ve doku kültürü çalışmalarında sıklıkla kullanılan flüorışıl lamba ile karşılaştırılmıştır. Bu nedenle, tek bir flüorışıl lambanın 20 cm ölçüm yüksekliğinde aydınlatma düzleminde sağlayabileceği FAR değerlerinin dağılımı Çizelge 4.6.'da verilmiştir. Tek bir flüorışıl lambanın aydınlatma düzlemindeki FAR değerlerinin dağılımlarını belirlemek için kullanılan geometri LED aydınlatma sistemi için kullanılan geometri ile aynı olduğu belirtilmelidir. Flüorışıl lambanın ilgili ölçümlerde ek olarak bir uzunluğu 100 cm olan kare üzerinde de (K5) ölçüm yapılmıştır. Deney sonuçları, FAR değerlerinin merkezden en dış kareye doğru azaldığını göstermiştir. Örneğin, merkezde ölçülen FAR değeri $57 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ iken, 1. ölçüm eksenin 5. karesinde FAR değeri $33 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olarak ölçülmüştür. Diğer taraftan, aydınlatma düzlemi üzerindeki 1. ve 5. ölçüm eksenleri üzerindeki FAR değerlerinin daha homojen dağıldığı ve istenilen FAR değerlerinin yaklaşık olarak K4 ve K5'te ölçülen FAR değerleri ile sağlandığı ve bunun dışındaki ölçüm eksenlerinde ise K3'te ölçülen FAR değerleri ile sağlandığı söylenebilir.

Çizelge 4.6. Flüorışıl lamba aydınlatma sisteminin aydınlatma düzleminde ölçülen FAR değerleri

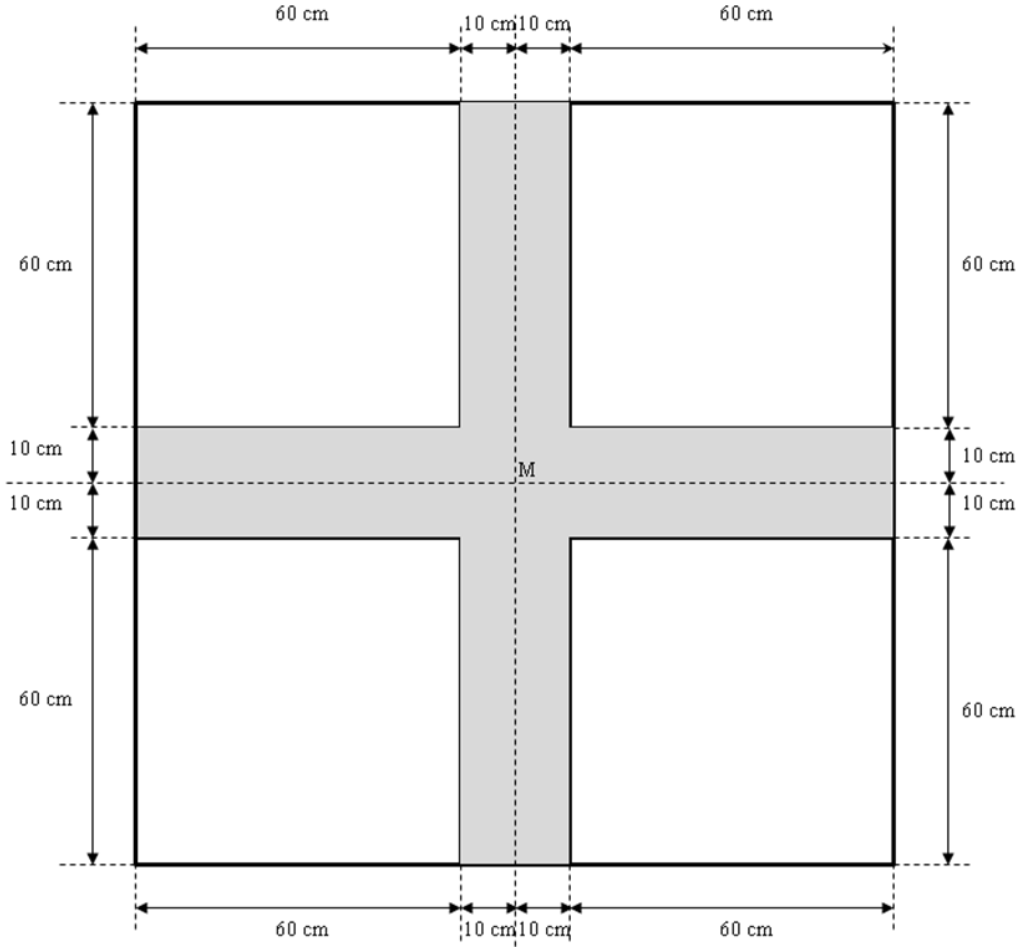
Ölçüm eksenini	Ölçüm Karesi	FAR değeri ($\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$)
Merkez	M	57
1	K1	57
	K2	56
	K3	53
	K4	46
	K5	33
2	K1	52
	K2	44
	K3	33
	K4	22
	K5	13
3	K1	51
	K2	35
	K3	23
	K4	15
	K5	9
4	K1	52
	K2	45
	K3	35
	K4	23
	K5	14
5	K1	57
	K2	56
	K3	54
	K4	48
	K5	38
6	K1	54
	K2	42
	K3	32
	K4	21
	K5	13
7	K1	55
	K2	44
	K3	31
	K4	18
	K5	12
8	K1	56
	K2	43
	K3	32
	K4	20
	K5	12

4.5. LED ve Flüorışıl Lamba Aydınlatma Sistemi Tasarımının Oluşturulması

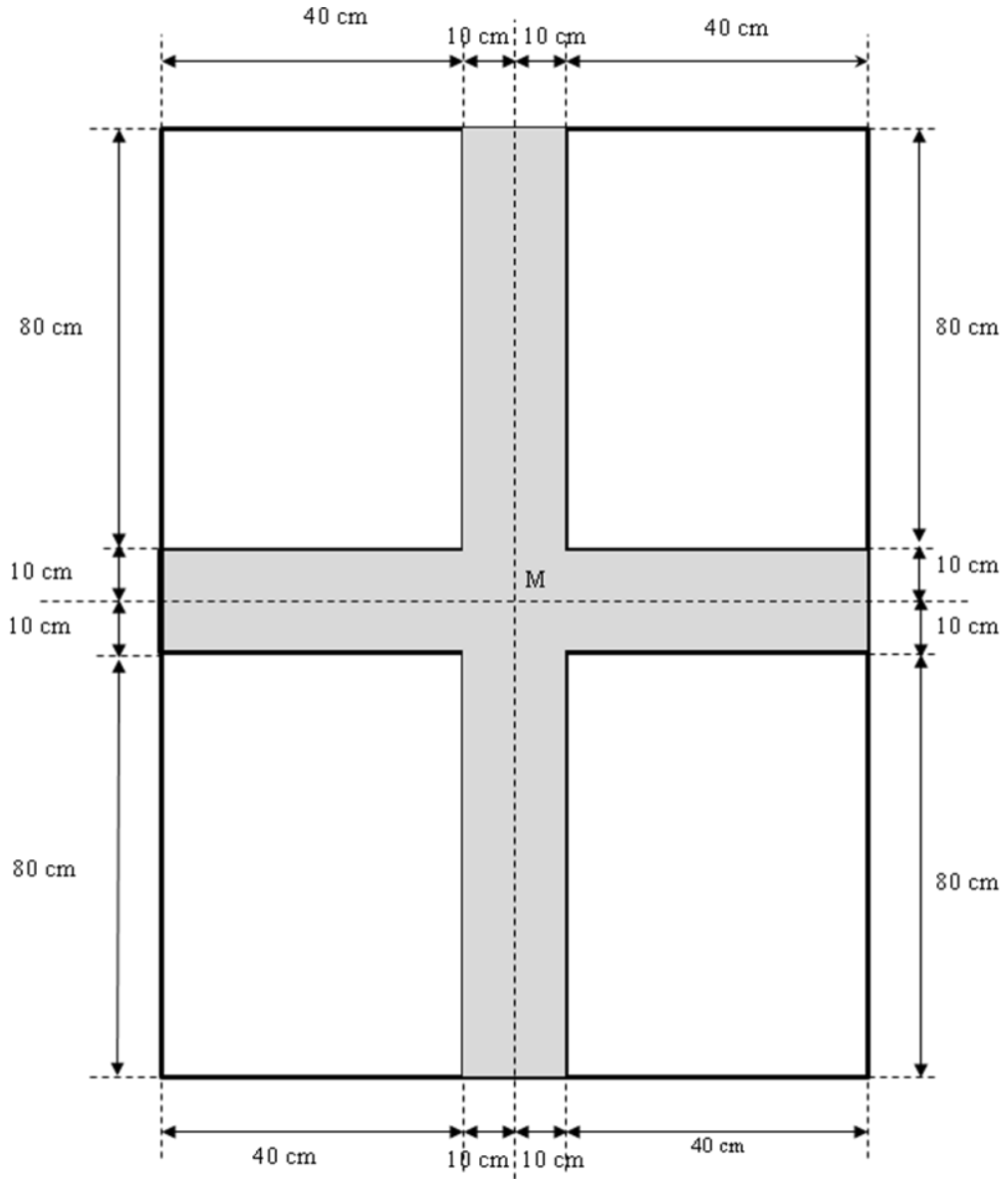
Çalışmanın bu bölümünde, ekonomik analiz için gerekli olan LED ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinden oluşan modül geometrisinin tasarımı oluşturulmuştur. Daha öncede belirtildiği gibi bu tasarımın, FAR düzeyini ($50\pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) belirli bir alanda sağlayacak kapasitede olması gerekmektedir. Bunun yanında istenilen FAR değerlerinin mümkün olduğunca homojen dağılması gerekmektedir.

LED aydınlatma sistemi tasarımında karakteristik kenar uzunluğu 40 cm olan kare yerleşim geometrisi dikkate alınmıştır. Ölçüm geometrisi üzerinde ise M, K1, K2, K3 tamamen alınmış olup K4 karelerinin kesiştirilmesi istenen FAR değerinin sağlanması ve daha ekonomik bir aydınlatma için uygun görülmüştür (Çizelge 4.5). LED aydınlatma sistemi için oluşturulan modül tasarım geometrisi (aydınlatma düzlemindeki FAR değerlerinin dağılım alanı) Şekil 4.7’de verilmiştir. Her bir LED aydınlatma modülü, 4 adet ve kenar uzunluğu 0,7 m olan karelerden oluşmaktadır. Kesişme bölgesi boyalı olarak verilmiştir. Modülünün toplam alanı ise $1,96 \text{ m}^2$ olup bu değer ekonomik analizde kullanılmıştır. Çizelge 4.5 incelendiğinde karakteristik uzunluğu 40 cm olan kare yerleşim geometrisinde K4 değerlerinin kesişmesi halinde kesişme alanındaki FAR değerleri istenen FAR değerinin üzerinde gerçekleşmektedir.

4 adet flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinden oluşan modülün tasarım geometrisi Çizelge 4.6’yı kullanarak belirlenmiştir (Şekil 4.8). Çizelge 4.6 incelendiğinde, flüorışıl lambanın FAR değerlerinin 1. ve 5. ölçüm ekseninde K5’te, bunun dışındaki ölçüm eksenlerinde ise K3’te kesişim yapıldığında istenen FAR değerinin sağlandığı belirlenmiştir. Böylece her bir flüorışıl lamba aydınlatma modülünün ölçüleri $0,9\text{m}\times 0,5 \text{ m}$ olup alanı ise $0,45 \text{ m}^2$ dir. Kesişme bölgesi boyalı olarak verilmiştir. Dört flüorışıl lambadan oluşan modülün toplam alanı ise $1,80 \text{ m}^2$ dir.



Şekil 4.7. Doku kültürü için 4 adet LED aydınlatma sistemlerinden oluşan modülün tasarım geometrisi



Şekil 4.8. Doku kültürü için 4 adet flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinden oluşan modülün tasarım geometrisi

4.6. Doku Kültüründe LED Uygulamasının Ekonomik Analizi

Ekonomik analizde kullanılan LED ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinin ve ekipmanların teknik özellikleri ve piyasa değerleri Çizelge 4.7’de verilmiştir. Sistem ve ekipmanların fiyatları tedarikçi firmalardan temin edilmiştir. LED’lerin şebekeden çektiği güç, LED güç kaynağı ile beraber bir wattmetre ile ölçülmüştür. Diğer taraftan, flüorışıl lambanın çektiği güç ise balast ile beraber ölçülmüştür.

Çizelge 4.7. Ekonomik analizde kullanılan LED ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinin ve ekipmanlarının teknik özellikleri ve piyasa değerleri (Anonim, 2011c; Anonymous, 2011e; Anonymous, 2011d)

	LED Aydınlatma Sistemi	Flüorışıl Lamba Aydınlatma Sistemi	
Nominal Güç (W)	1 (tek LED için) Fiyatı: 1,91 TL	36 (soğuk beyaz ve tek flüorışıl lamba için) Fiyatı: 3,5 TL	
Şebekeden Çektiği Gerçek Güç (W)	1 (tek LED için)	50 (tek flüorışıl lamba + balast için)	
Ekonomik Ömür (h)	75000	15000	
Güç Kaynağı	700 mA, 48 V, 33,6 W. (18 adet 1W gücündeki LED'ler için). Fiyatı: 24,48 TL	-	
Baskılı Devre Kartı	9 seri bağlantılı 1W gücündeki LED'ler için kullanılmıştır. Fiyatı: 4,89 TL.	-	
Soğutucu Fan	24V ve 600mA (144 adet 1W gücündeki LED'ler için) Fiyatı: 11,47 TL.	-	
Kanatlı Alüminyum Soğutucu	10x12 cm boyutlarında alüminyum plaka (36 adet 1W gücündeki LED'ler için). Fiyatı: 5,35TL.	-	
Manyetik Balast	-	0,43 A ve 40 W	(Balast + Starter + Armatür). Fiyatı: 16 TL
Starter	-	FST-101 4-65W	
Armatür	-	1240x95x53mm	

Çizelge 4.8'de LED ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinin ekonomik analiz sonuçları verilmiştir. Aynı FAR değerlerini sağlayan LED aydınlatma sistemi ile flüorışıl lambaların ekonomik analizinde, ekonomik ömür (yıl), satın alma bedeli (TL), ek ekipman (LED güç kaynağı, fan, baskılı devre kartı, kanatlı alüminyum soğutucu) fiyatı (TL), flüorışıl aydınlatma sistemi (Balast + Starter + Armatür+Tüp) satın alma fiyatı (TL), elektrik fiyatı (TL/kWh), reel faiz oranı parametreleri kullanılmıştır. Her iki sistemin yatırım ve enerji maliyeti hesaplanmıştır. Ekonomik

analizlerde, yatırım gideri olarak LED sistemlerinin flüorışıl sistemlere göre olan maliyet farkı kullanılırken kar değeri olarak LED sistemlerinin flüorışıl sistemlere göre olan enerji tüketim farkının parasal karşılığı değerlendirilmiştir. Ekonomik parametrelerden NBD hesaplanmıştır. Hesaplamalar 13 yıl üzerinden yapılmış olup reel faiz oranı 0,09 olarak alınmıştır. 13 yıllık LED kullanım süresince her bir flüorışıl lamba tütünün beş kez değiştiği varsayılmıştır.

Dört LED aydınlatma sisteminden oluşan modülün toplam alanı 1,96 m² olup bu değer ekonomik analizde temel alınmıştır. Analizde 1,96 m²'nin 1, 3, 5, 13, 26 ve 51 katları olan 1,96, 5,98, 9,80, 25,48, 50,96, 99,96 m² lik alanlar üzerinden hesaplamalar yapılmıştır (Çizelge 4.8). Her bir alan için toplam LED ve ek ekipman sayısı ve flüorışıl lamba sayısı hesaplanmış ve bu değerlerden LED ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinin toplam yatırım maliyeti hesaplanmıştır. Benzer bir şekilde her bir alan için toplam LED ve flüorışıl lamba üzerinden toplam enerji tüketimleri hesaplanmıştır. Burada LED aydınlatma sistemi modülü tasarım alanın (1,96 m²), flüorışıl lamba aydınlatma sisteminin modülü tasarım alanından (1,8m²) büyük olduğu belirtilmelidir.

NBD hesaplanırken, LED aydınlatma sisteminin flüorışıl aydınlatma sistemi yerine kurulması durumunda yatırımın karlılığına bakılmıştır. Bu nedenle, LED aydınlatma sistemi ile flüorışıl aydınlatma sisteminin yatırım giderleri arasındaki fark ve yıllık flüorışıl aydınlatma sistemi ile yıllık LED aydınlatma sistemi enerji giderleri arasındaki farka bağlı olarak hesaplanmıştır. Ekonomik analiz sonuçları, NBD'nin 1,96, 5,98, 9,80, 25,48, 50,96, 99,96 m² lik alanlar için sırasıyla 283,07, 1468,04, 2839,49, 7240,26, 13768,45 ve 27253,83 TL olduğunu göstermiştir. Sonuç olarak, her bir tasarım alanı için yatırımın cazip olduğu söylenebilir. Nitekim, Wu vd. (2009)'nin yaptıkları çalışmanın sonuçları, bu çalışmanın sonuçlarını destekler niteliktedir.

Çizelge 4.8. LED ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinin ekonomik analiz sonuçları

	Aydınlatma Tasarım Alanı (m ²)								
	1,96			5,98			9,80		
	Adet	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)	Adet	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)	Adet	Birim Maliyeti (TL)	Toplam Maliyet (TL)
LED	144	1,91	275,44	439	1,91	839,70	720	1,91	1377,18
LED'ler İçin Güç Kaynağı	8	24,48	195,87	24	24,48	587,60	40	24,48	979,33
LED'ler İçin Baskılı Devre Kartı	16	4,90	78,35	49	4,90	239,94	80	4,90	391,73
LED'ler İçin Soğutucu Fan	1	11,48	11,48	3	11,48	34,43	5	11,48	57,38
LED'ler İçin Kanatlı Alüminyum Soğutucu	4	5,36	21,42	8	5,36	42,85	20	5,36	107,11
LED Aydınlatma Sistemi Yatırım Giderleri			582,55			1744,50			2912,74
Flüorışıl Aydınlatma Sistemi (Balast + Starter + Armatür+Tüp) Yatırım Giderleri	4	16,00	64,00	13	16,00	208,00	22	16,00	352,00
Elektrik Birim Fiyatı (TL/kWh)	0,32			0,32			0,32		
LED Aydınlatma Sistemi Enerji Tüketimi (kWh)	0,05			0,14			0,23		
Flüorışıl Aydınlatma Sistemi Enerji Tüketimi (kWh)	0,06			0,20			0,35		
Yıllık LED Aydınlatma Sistemi Enerji Gideri (TL/Yıl)	264,90			807,58			1324,51		
Yıllık Flüorışıl Aydınlatma Sistemi Enerji Gideri (TL/Yıl)	367,92			1195,74			2023,56		
Yatırımın Net Bugünkü Değeri (TL)	283,07			1468,04			2839,49		

Çizelge 4.8.'in devamı

	Aydınlatma Tasarım Alanı (m ²)								
	25,48			50,96			99,96		
	Adet	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)	Adet	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)	Adet	Birim Maliyet (TL)	Toplam Maliyet (TL)
LED	1872	1,91	3580,67	3744	1,91	7161,34	7344	1,91	14047,24
LED'ler İçin Güç Kaynağı	104	24,48	2546,25	208	24,48	5092,51	408	24,48	9989,15
LED'ler İçin Baskılı Devre Kartı	208	4,90	1018,50	416	4,90	2037,00	816	4,90	3995,66
LED'ler İçin Soğutucu Fan	13	11,48	149,19	26	11,48	298,39	51	11,48	585,30
LED'ler İçin Kanatlı Alüminyum Soğutucu	52	5,36	278,50	104	5,36	556,99	204	5,36	1092,56
LED Aydınlatma Sistemi Yatırım Gideri			7573,11			15146,23			29709,90
Flüorışıl Aydınlatma Sistemi (Balast + Starter + Armatür+Tüp) Yatırım Gideri	57	16,00	912,00	113	16,00	1808,00	222	16,00	3552,00
Elektrik Birim Fiyatı (TL/kWh)		0,32			0,32			0,32	
LED Aydınlatma Sistemi Enerji Tüketimi (kWh)		0,59			1,18			2,31	
Flüorışıl Aydınlatma Sistemi Enerji Tüketimi (kWh)		0,90			1,78			3,50	
Yıllık LED Aydınlatma Sistemi Enerji Gideri (TL/Yıl)		3443,73			6887,46			13510,02	
Yıllık Flüorışıl Aydınlatma Sistemi Enerji Gideri (TL/Yıl)		5242,86			10393,74			20419,56	
Yatırımın Net Bugünkü Değeri (TL)		7240,26			13768,45			27253,83	

5. SONUÇ

LED teknolojisindeki hızlı gelişim, kullanım alanlarının artmasını ve daha yaygın hale gelmelerini sağlamıştır. Tarımsal üretimde kullanılan geleneksel aydınlatma araçlarının arasında LED ışık kaynaklarının birçok avantajları bulunmaktadır. Bunlar arasında düşük enerji tüketimleri, yüksek ışık verimliliğine sahip olmaları ve tarımsal üretim için uygun dalga boyu karakteristiklerine sahip olmaları dikkat çekmektedir. Nitekim bu çalışmada, farklı renklerdeki LED ışık kaynaklarının FAR değerlerinin belirlenmesi yapılarak 9 adet LED kullanılarak tasarlanan lambanın sığla balsamı (*Liquidambar styraciflua* L.) bitkisinin doku kültürü ile üretiminde gerekli olan FAR değerlerini sağlayacak şekilde yerleşim geometrisi belirlenerek bu amaçla kullanım olanakları araştırılmıştır. Ayrıca, flüorışıl lamba ile FAR değerleri aynı şekilde dikkate alınarak tasarım gerçekleştirilmiş ve ekonomik olarak karşılaştırmalı analiz edilmiştir.

Çalışmanın birinci aşamasında, 1 ve 3 W güçteki mavi, beyaz, turuncu, sıcak beyaz, kırmızı ve yeşil renklerdeki LED'lerin FAR değerleri, belirlenmiştir. Ölçümü yapılan 1W gücündeki LED'lerde en yüksek FAR değeri kırmızı, en düşük FAR değeri ise turuncu ve yeşil renkli LED'ler için bulunmuştur. 3 W gücündeki LED'ler için benzer durum olduğu belirlenmiştir. FAR özelliği bakımından yapılan varyans analizi sonucunda renk×güç interaksiyonu istatistiksel olarak önemli bulunmuştur ($P<0.01$).

Çalışmanın ikinci aşamasında, 1W güçte 9 adet kırmızı veya mavi LED'lerden oluşan LED aydınlatma sistemlerinin farklı ölçüm yüksekliklerinde, FAR ölçümlerinin ölçüm düzleminde oluşturulan geometriye bağlı olarak dağılımları incelenmiştir. Çalışmanın sonuçları, FAR değerlerinin dağılımının merkezde yüksek iken kenarlara doğru azaldığı ve bir şemsiye görüntüsü verdiği gözlenmiştir.

Çalışmanın üçüncü aşamasında, FAR ihtiyacı ($50\pm 5 \mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$) bilinen *Liquidambar styraciflua* L., sığla balsamı bitkisinin doku kültürü ile üretiminde en düşük FAR değerinin 16 saatlik fotoperiyot uygulamasında FAR değerinin homojen olarak dağıtılabilmesi için LED aydınlatma sisteminin yerleşim geometrisi belirlenmiştir. Aydınlatma sistemlerinin yerleşim geometrisinin FAR dağılımlarına

etkisini belirlemek için kare, daire, üçgen ve paralelkenar gibi geometrik yapılar dikkate alınmıştır. Çalışmada her bir LED yerleşim geometrisine ait FAR değerlerinin RMSE ve standart sapma değerleri hesaplanmış ve hesaplama sonucunda en düşük RMSE ve standart sapma değerleri karakteristik kenar uzunluğu 40 cm olan kare yerleşim geometrisinde sırasıyla 12,65 ve 12,35 $\mu\text{mol m}^{-2} \text{s}^{-1}$ olarak tespit edilmiştir. Sonuç olarak LED aydınlatma sistemlerinin tasarımında kare yerleşim planının dikkate alınmasının, FAR değerlerinin istenen değerlerden uzaklığı ve homojenliği bakımından uygun olduğu kanısına varılmıştır.

Çalışmada ekonomik analizde kullanılmak üzere tek bir flüorışıl lambanın aydınlatma düzlemindeki FAR değerlerinin dağılımı incelenmiştir. Aydınlatma düzlemi üzerindeki 1. ve 5. ölçüm eksenleri üzerindeki FAR değerlerinin daha homojen dağıldığı ve istenilen FAR değerlerinin yaklaşık olarak K4 ve K5'te ölçülen FAR değerleri ile sağlandığı ve bunun dışındaki ölçüm eksenlerinde ise K3'te ölçülen FAR değerleri ile sağlandığı söylenebilir.

Ekonomik analizde kullanılmak üzere, LED ve flüorışıl lamba aydınlatma sistemlerinden oluşan modül geometrisinin tasarımı oluşturulmuştur. Dört LED aydınlatma sisteminden oluşan modülün toplam alanı ise 1,96 m^2 ve karakteristik uzunluğu 40 cm olan kare yerleşim geometrisinde K4 değerlerinin kesişmesi halinde kesişme alanındaki FAR değerlerinin istenenin üzerinde gerçekleştiği sonucuna varılmıştır. Diğer taraftan, flüorışıl lambanın FAR değerlerinin 1. ve 5. ölçüm ekseninde K5'te, bunun dışındaki ölçüm eksenlerinde ise K3'te kesişim yapıldığında istenen FAR değerini sağlandığı belirlenmiştir.

Doku kültürü yetiştiriciliğinde kullanılmak üzere tasarlanan LED aydınlatma sistemlerinin ekonomik analiz sonuçları, NBD'nin 1,96, 5,98, 9,80, 25,48, 50,96, 99,96 m^2 lik alanlar için sırasıyla 283,07, 1468,04, 2839,49, 7240,26, 13768,45 ve 27253,83 TL olduğunu göstermiştir. Böylece, her bir tasarım alanı için yatırımın cazip olduğu söylenebilir. Sonuç olarak çalışmada belirtilen özgül koşullar altında mevcut flüorışıl lamba aydınlatma sistemleri yerine LED sistemlerinin kullanılmasının önemli bir enerji tasarrufu sağlayacağı ve işletme maliyetlerini azaltması olanaklıdır.

Yapılan tasarımlar kullanılarak doku kültürü ile farklı bitkilerin üretimi gerçekleştirilerek karşılaştırmalı araştırmaların yapılması elde edilen bilginin artırılmasını sağlayacaktır. Ayrıca, bitki üretiminde hedef bitkinin istekleri göz ardı edilmeden farklı renklerden oluşturulacak lamba tasarımlarının uygulamalı olarak incelenmesi gereklidir.

6. KAYNAKLAR

- Anonim, 2011a. <http://emo.org.tr>. Erişim Tarihi: 01 Mayıs 2011.
- Anonim, 2011b. www.deltaohm.com. Erişim Tarihi: 25.04.2011.
- Anonymous, 2005. Lighting Systems for Agricultural Facilities. ASABE Standards, ASAE EP 344.3, USA.
- Anonymous, 2011a. <http://lasp.colorado.edu>. Erişim Tarihi: 01.05.2011.
- Anonymous, 2011b. <http://www.beltal.com>. Erişim tarihi: 24.12.2011.
- Anonymous, 2011c. <http://www.edison-opto.com.tw/>. Erişim Tarihi:15.08.2011.
- Anonymous, 2011d. <http://www.daluce.ru/>. Erişim Tarihi: 01 Mayıs 2011.
- Anonymous, 2011e. <http://www.meanwell.com/>. Erişim Tarihi: 01 Mayıs 2011.
- Avercheva, O. V., Berkovich, Y. A., Erokhin, A. N., Zhigalova, T. V., Pogosyan, S. I., Smolyanina, S. O. 2009. Growth and photosynthesis of chinese cabbage plants grown under light-emitting diode-based light source. Russian journal of plant physiology, Vol. 56, No. 1, pp. 14–21.
- Berkovich, Y. A., Krivobok, N. M., Smolyanina, S. O., Erokhin, A. N. 2005. Kosmicheskie oranzherei: nastoyashchee budushchee (Space Greenhouses: Now and inFuture), Moscow.
- Boukis I., Vassilakos N., Karellas S., Kakaras E., 2009. Techno-economic analysis of the energy exploitation of biomass residues in Heraklion Prefecture—Crete. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 13(2), 362-377.
- Brazaitytė, A., Duchovskis, P., Urbonaviciūtė, A., Samuolienė, G., Jankauskienė, J., Kazenas, V., Kasiuleviciute-Bonakere, A., Blinikas, Z., Novickovas, A., Breive, K., 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. Sodininkystė ir Daržininkystė, 2009. 28(1).

- Bula RJ, Morrow RC, Tibbitts TW, Barta DJ, Ignatius RW, Martin TS. 1991. Light-emitting diodes as a radiation source for plants. HortScience. 1991 Feb;26(2):203-5.
- CIE, 2007. International Commission on Illumination. Technical Report Measurement of LEDs. CIE 127: 2007, 2nd Edition. ISBN: 978 3 901 906 58 9.
- Ekinci, K. 2001. Theoretical And Experimental Study On The Effects Of Aeration Strategies On The Composting Process. Phd Dissertation, The Ohio State University, Columbus, Ohio.
- Gustafson, R.,J. 1988. Fundamentals of Electricity for Agriculture. 2nd edition ASAE. USA
- Günay, A. 2005. Sebze Yetiştiriciliği. İzmir, Meta Basım Evi, Cilt I, sf 502. İzmir.
- Hsu, Yi-Cheng. 2011. An optimum design and fabrication of lens on luminous uniformity and light extraction of high-power light-emitting diode. Optical review, Vol. 18, No. 1 (2011) 27–33.
- Jao, R.C., Fang, W., 2003. An adjustable light source for photo-pyhto related research and young plant production. Applied Engineering in Agriculture, 19(5): 601-608.
- Koç, C., Vatandaş, M., Koç, A.B. 2009. Led aydınlatma teknolojisi ve tarımda kullanımı. 25. Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi. 153-158 sayfa.
- Kommareddy, A., 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., Kuramoto, M., Ogawa, Y., Minami, Y., 2008. A double image acquisition system with visible and uv leds for citrus fruit. ASABE Publication Number 701P0508cd.
- Lawrance, K.C., Park, B., Heitschmidt, G., Windham, W.R., 2005. Led lighting for use in multispectral and hyperspectral imaging. ASAE Annual International Meeting, Paper Number: 053073.

- Lee, N., Wetzstein, H.Y., Sommer, H. E. 1985. Effects of quantum flux density on photosynthesis and chloroplast ultrastructure in tissue-cultured plantlets and seedlings of liquidambar styraciflua l. Towards improved acclimatization and field survival. *Plant Physiology* 1985 July; 78(3): 637–641.
- Miyashita, Y., Kitaya, Y., Kozai, T., and Kimura, T., 1995. Effects of red and far-red lighth on the growth and morphology of potato planters in vitro: using lighth emitting diode as a lighth source for micropropagation. *Acta Horticulturae* 393: 189-194.
- Moreno, I. 2004. Configurations of LED arrays for uniform illumination. 5th Ilberoamerican Meeting On Optics And 8th Latin American Meeting On Optics, Lasers, And Their Applications, SPIE vol, 5622 (SPIE, Bellinham, WA 2004) 02777 786X/04/\$15 doi 10.1117/12.592183.
- Mpelkas, C. C. 1991. Horticultural Light Sources. *Sylvania Engineering Bulletin* 0-352. Sylvania Lighting, Danvers, MA.
- Musayev, E. 2002. LED – LED sisteminin araştırılması ve uygulamaları. ELECO'2002 Elektrik – Elektronik - Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu. http://www.emo.org.tr/etkinlikler/eleco/etkinlik_bildirileri_detay.php?etkinlikkod=43&bilkod=1339. Erişim Tarihi: 16.10.2010.
- Pinho, P., Lukkala, R., Särkkä, L., Tetri, E., Tahvonen, R., Halonen, L. 2007 evaluation of lettuce growth under multi-spectral-component supplemental solid state lighting in greenhouse environment. *International Review of Electrical Engineering (I.R.E.E.)*, Vol. 2, N. 6.
- Shimizu, H., Ma, Z., Tazawa, S., Douzono, M., Runkle, E., Heins, R., 2005. The application of blue lighth as a growth regulator. ASAE International Meeting, Paper Number: 054152.
- Tenessen, DJ, Singasaas, E.L., Sharkey, T.D. 1994. Light-emitting diodes as a light source for photosynthesis research. *Photosynth Res*, 39:85–92.
- Ünal, A., 2009. Aydınlatma Tasarımı ve Proje Uygulamaları. Birsen Yayınevi, Umut Matbaası, 613 sayfa. İstanbul.

- Vatandaş, M., Koç, A. B., Koç, C., Uysal, Ö. 2010. Bitkisel üretimde ışık ölçümü. 26. Tarımsal Mekanizasyon Ulusal Kongresi. Sayfa numarası: 393-399.
- Wassink, E. C., Stolwijk, J. A. J., 1956. Effects of light quality on plant growth. 373-400.
- Weir, J. 1975. Artificial lighting for commercial horticulture. *Lighting Research and Technology*. 7(4): 209- 225.
- Wu, M.S., Huang, H.H., Huang, B.J., Tang, C.W.ve Cheng, C.W. 2009. Economic feasibility of solar-powered led roadway lighting. *Renewable Energy* 34 (2009) 1934–1938.
- Yağcıoğlu, A., 1996. Tarımsal Elektrifikasyon (Genişletilmiş 2. Basım). EÜZF Yayınları. No: 488.
- Yağcıoğlu, A., 2009. Sera Mekanizasyonu. Ege Üniversitesi Basımevi, 562, 383 sf. Ege Üniversitesi Yayınları.
- Yanagi, T., 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. p. 19.
- Yavuzcan, G., 1994. Tarımsal Elektrifikasyon. Ankara Üniversitesi Ziraat Fakültesi Yayınları: 1342, (5. Baskı) Ankara.
- Yeh, N., 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.
- Yıldız, Y., Karaca, C., Dağtekin, M., 2010. Hayvan Barnaklarında Çevre Denetimi. Hasat Yayıncılık Ltd. Şti., Bilnet Matbaacılık, 256 sayfa. İstanbul.
- Yurdakul, O., 1998. Proje Hazırlama ve Değerlendirme. Ç.Ü. Ziraat Fakültesi Genel Yayın No:147, Ders Kitapları Yayın No: A-48. Adana.

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Önder UYSAL

Doğum Yeri ve Yılı : BOLU 04.08.1984

Medeni Hali : Bekâr

Yabancı Dili : İngilizce



Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise: Yıldırım Beyazıt Anadolu Lisesi 1999-2002

Lisans: Ankara. Ü. Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları Bölümü 2003-2007

Yüksek Lisans: S.D.Ü. Fen Bil. Enstitüsü, Tarım Makinaları Anabilim Dalı

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl:

S.D.Ü. Ziraat Fakültesi Tarım Makinaları Bölümü 2009...

Yayımları (SCI ve diğer makaleler)

- 1- Vatandaş, M., Koç, A B., Koç, C., Uysal, Ö., 2010. Bitkisel Üretimde ışık Ölçümü. Tarımsal Mekanizasyon 26. Ulusal Kongresi, 22-23 Eylül 2010, S. 393-399, Hatay.
- 2- Koç, C., Koç, A B., Uysal, Ö., Vatandaş, M., 2010. LED Lambalarının Mikroalg Üretimi İçin Fotobiyoreaktörlerde Işık Kaynağı Olarak Kullanımı. Tarımsal Mekanizasyon 26. Ulusal Kongresi, 22-23 Eylül 2010, S. 363-369, Hatay.
- 3- Yılmaz, D., Uysal, Ö., Akman, H E., 2010. Isparta İlindeki Bazı Soğuk Hava Depolama ve Paketleme İşletmelerinin Mekanizasyon Düzeyinin Belirlenmesi. Tarımsal Mekanizasyon 26. Ulusal Kongresi, 22-23 Eylül 2010, S. 153-159, Hatay.
- 4- Akman, H E., Uysal, Ö., Yılmaz, D., 2010. Isparta Bölgesinde Yetiştirilen Bazı Elma Çeşitlerinin Su ile Taşınmasında Önemli Bazı Parametrelerinin Belirlenmesi. Tarımsal Mekanizasyon 26. Ulusal Kongresi, 22-23