



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

MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

**M1 VE M2 AYDINLATMA SINIFI YOLLAR İÇİN YÜKSEK
ENERJİ VERİMLİ LED'Lİ YOL AYDINLATMA
ARMATÜRÜNÜN OPTİK TASARIMI**

DOKTORA TEZİ

Duygu YİĞİT ÜNLÜ

DANIŞMAN

Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

AKSARAY, 2020

Aksaray Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü'nün 162318601 numaralı Doktora öğrencisi Duygu YİĞİT ÜNLÜ tarafından hazırlanan “**M1 VE M2 AYDINLATMA SINIFI YOLLAR İÇİN YÜKSEK ENERJİ VERİMLİ LED'Lİ YOL AYDINLATMA ARMATÜRÜNÜN OPTİK TASARIMI**” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından OY BİRLİĞİ/OY ÇOKLUĞU ile Makine Mühendisliği Anabilim Dalında DOKTORA TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Danışman: Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Mustafa Bayrak

Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Prof. Dr. Yüksel Kaplan

Niğde Ömer Halis Demir Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Doç. Dr. Yunus Uzun

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Üye: Dr. Öğretim Üyesi Muhammet Çelik

Aksaray Üniversitesi

Bu tezin, kapsam ve kalite olarak Doktora Tezi olduğunu onaylıyorum

Tez Savunma Tarihi: 25/11/2020

Jüri tarafından kabul edilen bu tezin Doktora Tezi olması için gerekli şartları yerine getirdiğini onaylıyorum.

.....

Doç. Dr. Mehmet Ali HINIS

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

DOĞRULUK BEYANI

Doktora tezi olarak sunduđum bu çalıřmayı, akademik kurallara ve bilimsel etik, ahlak ve geleneklere aykırı dűőecek bir yol ve yardıma bařvurmaksızın yazdıđımı, yararlandıđım eserlerin kaynakçada gűőerilenlerden olduđuunu, çalıřmamda kullandıđım verilerin orijinalliđini ve hertűrlű intihalden uzak olduđuunu beyan ederim.

Enstitű tarafından belli bir zamana bağlı olmaksızın, tezimle ilgili yaptığım bu beyana aykırı bir durumun saptanması durumunda, ortaya çıkacak tűm ahlaki ve hukuki sonuçlara katlanacağımı bildiririm.

Duygu YİĞİT ÜNLÜ

TEŞEKKÜR

Doktora öğrenimim sürecinde çalışmalarımı yönlendiren ve çalışmalarımın gelişimine çok önemli katkılarda bulunan danışman hocam Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN'e teşekkürlerimi ve saygılarımı sunarım.

Çalışmanın analizlerinde kullandığım LightTools programını 60 gün süre ile ücretsiz kullanmama imkan veren Lighttec Fransa firmasına ve firma yetkilisi Laurence Perrimond'a minnettarlığımı belirtmek isterim. Programı öğrenme ve kullanma aşamasında destek olan Optik Sistem Mühendisi Halil İbrahim Kahvecioğlu'na ne kadar teşekkür etsem azdır. Çalışmalarımnda benden desteğini esirgemeyen değerli Öğr. Gör. Leyla Eroğlu'na ve Öğr. Gör. Yasin Bektaş'a da teşekkür ederim.

Hayatımın her döneminde bana destek olan aileme, bu süreçte en büyük destekçim olan eşim Hüseyin Ünlü'ye, canım annem ve biricik kızım Gökçe'ne sevgilerimi sunarım.

Bu tez, TEYDEB-1505 TÜBİTAK Üniversite-Sanayi İşbirliği Destek Programı kapsamında yürütülen 5160068 nolu "M1 ve M2 Aydınlatma Sınıfı Yollar İçin Yüksek Enerji Verimli, LED'li Yol Aydınlatma Armatür Tasarımı ve Özgün Prototip Modeller Geliştirilmesi" projesi ile desteklenmiştir. TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Duygu YİĞİT ÜNLÜ
AKSARAY, 2020

Kızım Gökçe'ye, eşim Hüseyin'e ve beni yetiştiren aileme...

İÇİNDEKİLER

TEŞEKKÜR	i
İÇİNDEKİLER	iii
ÖZET	v
ABSTRACT	vi
ŞEKİLLER DİZİNİ	vii
ÇİZELGELER DİZİNİ	x
SİMGELER VE KISALTMALAR	xi
1. GİRİŞ	1
1.1 Işığın Doğası	4
1.2 LED Işık Kaynaklarının Dünya Pazarına Girişi ve LED'lerin Gelişim Süreci	6
1.3 Akıllı Mikro-Çip Işıklı İyileştirmeler: Oldukça Yüksek Güçlü Çok-Çipli COB LED	11
1.4 LED'lerin Çalışma Prensibi	13
1.5 Aydınlatma Uygulamaları için LED Paketi Yapısı	17
1.5.1 Yüksek güçlü LED paketin temel elemanları ve sistem tasarımı	20
1.5.2 Beyaz ışık LED üretimi	22
1.6 LED'lerin Aydınlatmada Kullanımı	24
1.7 Aydınlatmada Kullanılan LED Türleri	28
1.8 LED Yol Aydınlatma Sistemleri Nedir, Nelerden Oluşur?	29
1.9 LED Işık Kaynaklarının Üstünlükleri	31
2. KAYNAK ÖZETİ	34
2.1 Yol Aydınlatması	34
2.2 LED'li Yol Aydınlatmasının Avantajları	37
2.3 Motorlu Trafikte Kullanılan Aydınlatma Sınıfları (M Sınıfı)	39
2.4 Yol Aydınlatma Seviyeleri için Endüstri Standartları	40
2.5 Yol Aydınlatma Tasarımı	43
2.5.1 Yol aydınlatma tesisat biçimleri (armatür sınıfları)	45
2.5.2 Aydınlatma parametreleri	48
2.5.3 Aydınlik düzeyine göre yol aydınlatması hesabı	52
2.5.4 Yönetmeliklere göre yol aydınlatma kalite büyüklükleri	53
2.5.5 LED aydınlatma renk tasarımı ve kontrolü	54
2.5.6 Yol aydınlatmasında LED renk sıcaklığı seçimi	55
2.6 Optik Elemanlar	58
2.6.1 Geometrik optikte ışın yaklaşımı	58
2.6.2 LED aydınlatmada kontrol aracı olarak mercekler	61
2.6.3 Işık dağılım eğrisi (polar fotometrik eğri)	65
2.6.4 Aydınlatmada enerji tasarrufu	67
3. MATERYAL VE YÖNTEM	69
3.1 Optik Modelleme ve Simülasyon	69
3.2 LightTools Aydınlatma Tasarım Yazılımı Hakkında	69
3.3 Çalışmada Kullanılan COB LED'in Seçimi ve Özellikleri	70
3.4 Optik Tasarım Süreci	74
3.4.1 Mercek özellikleri	77

3.4.2 Dialux kullanarak yol aydınlatma sisteminde direkler arası mesafenin optimizasyonu	86
3.4.3 M1 sınıfı için sınıf 2 kullanılarak elde edilen yol aydınlatma düzeni	87
3.4.4 M2 sınıfı için sınıf 5 kullanılarak elde edilen yol aydınlatma düzeni	88
4. ARAŞTIRMA BULGULARI	89
4.1 Tasarım Simülasyonu	89
4.1.1 LED-Mercek arası uzaklık 10 mm iken LightTools simülasyon sonuçları	89
4.1.2 LED-Mercek arası uzaklık 10 mm iken Dialux sonuçları	91
4.2 LED-Mercek Arası Uzaklık 12 mm iken Sonuçlar	92
4.3 LED-Mercek Arası Uzaklık 14 mm iken Sonuçlar	93
5. TARTIŞMA VE SONUÇ	97
KAYNAKLAR	100
EKLER	108
Ek 1a- LED-mercek arası uzaklık 10 mm iken M1'e ait Dialux raporu	109
Ek 1b- LED-mercek arası uzaklık 10 mm iken M2'ye ait Dialux raporu	113
Ek 2a- LED-mercek arası uzaklık 12 mm iken M1'e ait Dialux raporu	117
Ek 2b- LED-mercek arası uzaklık 12 mm iken M2'ye ait Dialux raporu	121
Ek 3a- LED-mercek arası uzaklık 14 mm iken M1 ve M2'ye ait Dialux raporu	125
Ek 3b- LED-mercek arası uzaklık 14 mm iken M1 ve M2'ye ait Dialux raporu	129
Ek 4- Akı özellikleri	133
Ek 5- Performans gurubunun parlaklığı	134
Ek 6- Çeşitli malzemeler için 25°C'de termal iletkenlik ve yayılım	135
Ek 7- EVATEG ölçüm sonuçları ve analiz raporu	136
Ek 7- Devam	137
ÖZGEÇMİŞ	138

DOKTORA TEZİ

M1 VE M2 AYDINLATMA SINIFI YOLLAR İÇİN YÜKSEK ENERJİ VERİMLİ LED'Lİ YOL AYDINLATMA ARMATÜRÜNÜN OPTİK TASARIMI

Duygu YİĞİT ÜNLÜ

**Aksaray Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Makine Mühendisliği Anabilim Dalı**

Danışman: Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

ÖZET

Bu çalışmada, M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için yüksek enerji verimli LED'li yol aydınlatma armatürünün optik tasarımı amaçlanmıştır. Bu çerçevede, M1 ve M2 aydınlatma sınıflarına sahip yollarda standart aydınlatma ihtiyacını karşılayacak yüksek enerji verimli COB LED'li yol aydınlatma armatürünün optik tasarımı ve simülasyon aşamaları sunulmuştur. SolidWorks ve LightTools programları ile aydınlatma aygıtının optik bölümü tasarlanmıştır. Tasarımda, ışık kaynağı olarak Cree XLamp CXA-1830 COB LED tercih edilmiştir. Optik tasarım aşamasında öncelikle mercek tasarımı üzerinde çalışmalar yapılmıştır. SolidWorks programı kullanılarak serbest yüzeyli merceğin ve konkav-konveks merceğin tasarımı yapılmıştır. Aydınlatma ihtiyacını daha iyi karşılaması sebebiyle konkav-konveks merceğin kullanılmasına karar verilmiştir. Farklı çalışmalar sonrasında satandartlara uygun ve aydınlatma ihtiyacını karşılayacak mercek+LED modül geliştirilmiştir. Tasarımı yapılan modüle ait ışık dağılım eğrisi uzantısı '.ldt' olan Eulumdat dosyası ile Dialux hesap programına aktarılmıştır.

Çalışmada kullanılan ışık kaynağına ait olan ve Dialux programından elde edilen aydınlatma parametreleri ile Uluslararası Aydınlatma Örgütü (CIE)'nin ve dört farklı firmanın power LED'li ışık kaynaklarına ait aydınlatma parametreleri karşılaştırılmıştır. CIE'nin kriterlerine göre yapılan karşılaştırmada; LED-mercek arası 10 mm ve 12 mm iken; L_m , U_o , U_l , TI , EIR değerlerinin tamamının sağlandığı görülürken 14 mm'de ise U_l değerinin sağlanmadığı tespit edilmiştir. Çalışma sonuçlarına göre LED-mercek arası en ideal aralığın tüm parametreleri sağlayan 12 mm olduğu belirlenmiştir. A, B, C ve D firmalarının L_m , U_o , U_l , TI , EIR değerleri ile yapılan karşılaştırmada ise B, C ve D firmalarının tüm parametreleri karşıladığı ancak A firmasının U_l değerini sağlayamadığı görülmüştür. Sonuç olarak, çalışmada tasarlanan armatür M1-M2 aydınlatma sınıfı yollar için gerekli kriterleri sağlamıştır. Çalışmada ayrıca, yüksek enerji verimli COB LED'li, alanında özgün ve prototip bir armatür modeli geliştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: LED, Aydınlatma, Optik Tasarım, LightTools, DIALux.

Kasım, 2020; 138 Sayfa

PhD. THESIS

OPTICAL DESIGN OF HIGH ENERGY EFFICIENT LED ROAD LIGHTING LUMINAIRE FOR M1 AND M2 LIGHTING CLASS ROADS

Duygu YİĞİT ÜNLÜ

**Aksaray University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Mechanical Engineering**

Supervisor: Prof. Dr. Necmettin ŞAHİN

ABSTRACT

In this study it was proposed that the optical design of a high energy efficient LED road lighting fixture for M1 and M2 class roads. In this framework, the optical design and simulation stages of a high energy efficient COB LED road lighting fixture that will meet the standard lighting requirement on roads with M1 and M2 lighting classes were presented. The optical part of the lighting device was designed with SolidWorks and LightTools programs. Cree XLamp CXA-1830 COB LED was preferred as the light source in the design. At the optical design stage, firstly studies were made on lens design. The free surface lens and concave-convex lens were designed using the SolidWorks program. It was decided to use a concave-convex lens for the reason that it meets the lighting needs better. After the different studies, a lens + LED module was developed to meet the standards and lighting needs. The light distribution curve extension of the designed module has been transferred to the Dialux calculation program with the Eulumdat file with ".ldt".

In the study, it was compared that the lighting parameters which was belonging to the lighting sources used in the study with The International Lighting Organization (CIE) and the lighting parameters of four different companies' power LED light sources. In the comparison according to the criteria of the CIE; while the distance between LED and lens is 10 mm and 12 mm; it was observed that all Lm, Uo, Ul, TI, EIR values were provided, however Ul value was not provided at 14 mm. According to the results of the study, it was determined that the ideal distance between the LED and the lens is 12 mm, which provides all the parameters. In the comparison of the Lm, Uo, Ul, TI, EIR values of A, B, C and D firms, it was seen that firms B, C and D met all parameters however, firm A could not provide the value of Ul. As a result, the fixture designed in the study provided the necessary criteria for the M1-M2 lighting class roads. It was also developed high energy efficient and with COB LED, an original and prototype luminaire model was developed.

Keywords: LED, Lighting, Optical Design, LightTools, DIALux.

November, 2020; 138 pages

ŞEKİLLER DİZİNİ

Şekil 1.1. Net elektrik tüketiminin aydınlatma sektöründe yıllara göre dağılımı.....	1
Şekil 1.2. LED’li armatürlerde oluşan arızalar	3
Şekil 1.3. Fotoelektrik etki.....	4
Şekil 1.4. Young deney düzeneğinin basitleştirilmiş gösterimi. a tek delikli plaka, b iki delikli plaka	5
Şekil 1.5. RGB ile beyaz ışık eldesi.....	8
Şekil 1.6. Mavi LED+Fosfor ile beyaz ışık eldesi	8
Şekil 1.7. SSL'nin gelişim süreci	9
Şekil 1.8. Armatürün ışık etkinliğini belirleyen bileşenler zinciri.....	10
Şekil 1.9. Çoklu-çip ultra yüksek güçlü COB LED.....	12
Şekil 1.10. LED’lerin iç işleyişi.....	15
Şekil 1.11. Güneş ışığı ve tipik LED spektrumu	16
Şekil 1.12. 4000 K renk sıcaklığında bağlı spektral güç dağılımı eğrisi	16
Şekil 1.13. Seramik bir PCB üzerine yerleştirilmiş LED lambalar.	18
Şekil 1.14. Düşük güç (sol) ve yüksek güç (sağ) LED paketi yapısı.....	19
Şekil 1.15. LED paketleme teknolojisi ve yapısının geliştirilmesi.....	20
Şekil 1.16. Uyumlu fosfor kaplama işlemi	22
Şekil 1.17. Mavi LED+Fosfor kullanarak beyaz ışık eldesi	23
Şekil 1.18. Beyaz bir LED’in ışık dağılım eğrisi.....	24
Şekil 1.19. Yüksek güçlü LED uygulamaları	26
Şekil 1.20. Birçok büyük ticari sektörde LED’in piyasa tahmini.....	26
Şekil 1.21. LED çip türleri.....	29
Şekil 1.22. Cree® XLamp® CXA1830 COB LED	29
Şekil 1.23. Sokak aydınlatması için LED karakterizasyonu ve seçiminin özellikleri.....	30
Şekil 1.24. LED armatür elemanları	31
Şekil 1.25. LED’li armatür tasarımına ait bir örnek, ön yüz (sol) ve arka yüz (sağ).....	31
Şekil 2.1. Işık kirliliğinin farklı bileşenlerini gösteren görüntü.....	35
Şekil 2.2. Işık kirliliği seviyesi	37
Şekil 2.3. YBSB (sol) ve LED’in (sağ) karşılaştırılması.	38
Şekil 2.4. Renk dönüşüm endeksi; doğal ışık altında yol görünümü (sol), YBSB (orta) ve LED (sağ).....	38
Şekil 2.5. Boyuna düzgünlük değeri.....	42
Şekil 2.6. Kenar aydınlık düzeyi oranı.....	42
Şekil 2.7. Yol aydınlatması temel modeli.....	44
Şekil 2.8. İki şeritli yol ile aydınlatma düzeni a) tek taraflı b) her iki tarafta paralel c) her iki tarafta çapraz.	47
Şekil 2.9. Işık miktarının farklı tanımları	51
Şekil 2.10. Parlaklık katsayısının bağlı olduğu açılar.....	52
Şekil 2.11. Renk sıcaklığı skalası	56
Şekil 2.12. Farklı renk sıcaklıkları.....	56

Şekil 2.13. Los Angeles LED sokak lambaları	57
Şekil 2.14. Geometrik optikte ışın yaklaşımı.....	58
Şekil 2.15. (a) Yansıma ve kırılma kanunu, (b) toplam iç yansıma kanunu (TIR) ve (c) saçılma kanunu.....	59
Şekil 2.16. Işınlara yüzeylerle etkileşimi ile LightTools modelleri	59
Şekil 2.17. LightTools’da tasarımı yapılan serbest yüzeyli mercekten kırılan ışınların görüntüsü.....	62
Şekil 2.18. Piyasadaki çeşitli LED ikincil mercekler.	62
Şekil 2.19. Konkav-konveks mercek örnekleri.....	63
Şekil 2.20. Üç merceğin radyasyon modelleri. (a) Lambertian mercek, (b) batwing mercek, (c) side emitting mercek.....	64
Şekil 2.21. C düzlemleri / γ açıları.....	65
Şekil 2.22. Bir armatürün ışık dağılımı.....	66
Şekil 2.23. Bir yol aydınlatma armatürü için polar ışık şiddeti diyagramı örneği.....	67
Şekil 3.1. Cree® XLamp® CXA1830 COB LED	71
Şekil 3.2. Durum sıcaklığı	72
Şekil 3.3. Bağlı spektral güç dağılımı.....	72
Şekil 3.4. Elektriksel özellikler.....	73
Şekil 3.5. Mekanik ölçüler.....	73
Şekil 3.6. LightTools karşılama penceresi.....	74
Şekil 3.7. LightTools programı aktivasyon alanı.....	74
Şekil 3.8. ‘System Navigator’ sekmesi.....	75
Şekil 3.9. Mevcut tasarım dosyaları.....	75
Şekil 3.10. ‘IES reader’ sekmesi.....	76
Şekil 3.11. LED’e ait fotometrik dosya.....	76
Şekil 3.12. LED’in LightTools görünümü.....	77
Şekil 3.13. Konkav-konveks mercek.....	77
Şekil 3.14. Merceğin SolidWorks programındaki görünümü.....	80
Şekil 3.15. R1 yüzeyine ait özellikler.....	80
Şekil 3.16. R2 yüzeyine ait özellikler.....	81
Şekil 3.17. Mercek özellikleri.....	81
Şekil 3.18. LED+mercek modülüne ait iskelet görünüm.....	82
Şekil 3.19. Merceğin LightTools’da görünümü.....	82
Şekil 3.20. LED+mercek modülüne ait görünüm.....	83
Şekil 3.21. LED+mercek modülüne ait yan yüzey görünümleri.....	83
Şekil 3.22. 5*4 LED+mercek modül.....	84
Şekil 3.23. 5*4 LED+mercek+Farfield Receiver.....	84
Şekil 3.24. Farfield Receiver özellikleri.....	85
Şekil 3.25. Konkav mercekte ışığın kırınımı.....	86
Şekil 3.26. Işın ile önizleme.....	86
Şekil 3.27. Yol üzerinde bulunan bir armatürün aydınlatma düzeneği.....	87
Şekil 3.28. M1-M2 sınıfları için yol aydınlatma düzeni.....	88
Şekil 4.1. LED-mercek arası 10 mm iken Polar diyagram	89

Şekil 4.2. Işık şiddeti grafiği (cd)	90
Şekil 4.3. M1-M2 yolları için Dialüx sonuçları.....	91
Şekil 4.4. Polar diyagram.....	92
Şekil 4.5. Dialüx sonuçları.....	92
Şekil 4.6. Polar diyagram.....	93
Şekil 4.7. Dialüx sonuçları.....	94
Şekil 4.8. A firmasına ait Dialüx sonuçları.....	95
Şekil 4.9. B firmasına ait Dialüx sonuçları.....	95
Şekil 4.10. C firmasına ait Dialüx sonuçları.....	96
Şekil 4.11. D firmasına ait Dialüx sonuçları.....	96



ÇİZELGELER DİZİNİ

Çizelge 1.1. Renkler ve dalga boyları arasında yaklaşık karşılık gelen ilişki	6
Çizelge 1.2. Motorlu trafik için yol aydınlatmasında kullanılan karakteristik ışık kaynaklarının araştırılması.....	10
Çizelge 1.3. LED paketinin teknik özelliklerinin gelişimi.	13
Çizelge 1.4. Üç teknoloji arasındaki en önemli farklılıklar.	25
Çizelge 2.1. M aydınlatma sınıflarının belirlenmesi- a.....	39
Çizelge 2.2. M aydınlatma sınıflarının belirlenmesi- b.	40
Çizelge 2.3. M aydınlatma sınıfı kriterleri.....	41
Çizelge 2.4. Armatür sınıfları.	46
Çizelge 2.5. Aydınlığın değiştiği özel durumlar.	49
Çizelge 2.6. Lamba türleri ve CRI değerleri.....	54
Çizelge 3.1. LED'in özellikleri.....	71

SİMGELER VE KISALTMALAR

AlGaAs	Alüminyum Galyum Arsenit
AlGaInP	Alüminyum Galyum İndiyum Fosfat
ARGE P	Araştırma-Geliştirme-Planlama
CAD	Bilgisayar Destekli Tasarım
CCT	İlişkili Renk Sıcaklığı
Cd	Kandela
CEN	Avrupa Birliği Standartları
CFL	Kompakt Floresan
CIE	Uluslararası Aydınlatma Komisyonu
COB	Paketlenmiş LED Dizini
CRI	Renk Oluşturma Endeksi
DC	Doğru Akım
E	Enerji
ECE	Avrupa Ekonomik Komisyonu
EE	Enerji Verimli
EMI	Elektromanyetik Işınım
ESD	Elektrostatik Deşarj
F_{T1}	Eşik Artışı
GaAsP	Galyum Arsenit Fosfat
GHG	Sera Gazı
HPM	Yüksek Basıncılı Civa
HPSV	Yüksek Basıncılı Sodyum Buharlı
I	Işık Şiddeti
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IESNA	Illuminating Engineering Society of North America
InGaAsP	İndiyum Galyum Arsenit Fosfat
INGaN	İndiyum Galyum Nitrür
ISO	İstanbul Sanayi Odası
K	Kelvin
kh	Ömür
knit	Yüksek Parlaklık
L	Parıltı
LED	Işık Yayan Diyot
LES	Işık Yayan Yüzey
LIDC	Işık Yoğunluğu Dağılım Eğrisi
Lm	Lümen
LPE	Sıvı Faz Epitaksi
YBS	Düşük Basıncılı Sodyum
LRC	Aydınlatma Araştırma Merkezi
Lx	Lüks
mA	Miliamper
M1,2	Aydınlatma Sınıfı
MH	Metal Halide
nm	Nanometre
ns	Nano Saniye
P	Güç
PC	Polikarbonat
PCB	Baskılı Devre Kartı

PMMA	Poli Metil Metakrilat
p-n	Pozitif-Negatif
RGB	Red Green Blue
R_a	Renk Dönüşüm Endeksi
R_{EI}	Kenar Aydınlık Düzeyi Oranı
SMD	Yüzeye Monte Cihaz
SSL	Katı Hal Aydınlatma
T_c	Kasa Sıcaklığı
TEDAŞ	Türkiye Elektrik Dağıtım Anonim Şirketi
TIR	Toplam İç Yansıma
T_j	Ek Yeri Sıcaklığı
T_k	İlişkili Renk Sıcaklığı
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TÜİK	Türkiye İstatistik Kurumu
U_o	Ortalama Parıltı Düzgünlüğü
U_i	Boyuna Parıltı Düzgünlüğü
V	Voltaj
W	Watt
°C	Santigrat
Φ	Işık Akısı
λ	Dalga Boyu
ρ	Yüzeyin Yansıtma Katsayısı
v	Frekans

1. GİRİŞ

Tüm dünyada ve Türkiye’de enerji kaynakları hızla tükenmekte olup enerji ihtiyacı her geçen gün artış göstermektedir. Bu nedenle enerji kaynaklarının etkin ve verimli kullanımı son derece önemlidir. Enerji kaynaklarının önemli bir kısmı elektrik üretmek amacıyla kullanılmaktadır. Elektrik enerjisinin önemli bir kısmının aydınlatma amacı ile alışveriş merkezleri, ofisler, konutlar, yol aydınlatması gibi değişik sektörlerde kullanıldığı görülmektedir. Doğru ve verimli bir aydınlatma sistemi tasarımı ile hem aydınlatma konforu yüksek seviyede tutulabilir hem de aydınlatmada kullanılan enerji tüketimi büyük oranda azaltılabilir.

Dünya aydınlatma pazarının büyüklüğü 2010 yılında 99 milyar dolar iken, 2018 yılında 119 milyar dolara yükselmiştir. Pazarda büyümenin 2022 yılına kadar yıllık ortalama %3 olacağı ve pazar büyüklüğünün 2022 yılında 141 milyar dolara ulaşacağı tahmin edilmektedir. Bu büyümenin temelini genel aydınlatma alanındaki gelişmelerin oluşturması beklenmektedir. Otomotiv aydınlatma sektöründeki gelişme sınırlı iken; televizyon, tablet, bilgisayar ve cep telefonu gibi arka plan aydınlatma pazarında da küçülme beklenmektedir. Türkiye, aydınlatma teçhizat teknolojisinde daha çok dışa bağımlı olmakla birlikte bölgesinde bir üretim merkezi olarak gelişme göstermeye devam etmektedir (İSO, 2019). Elektrik üretiminde yaygın bir şekilde kullanılan kömür, petrol ve doğalgaz gibi fosil kaynakların rezervleri hızla azalmaktadır ve maliyetleri oldukça yüksektir. Bu durum mevcut elektrik enerjisinin daha etkin kullanılmasına yönelik tüm dünyada ve Türkiye’de konu ile ilgili çalışmaların yoğunlaşmasını sağlamıştır. Türkiye’de harcanan elektrik enerjisinin 2010-2017 yılları arasında ortalama %15,6’sının yol aydınlatmalarını da kapsayan genel aydınlatma maksatlı kullanıldığı belirtilmiştir (Şekil 1.1).



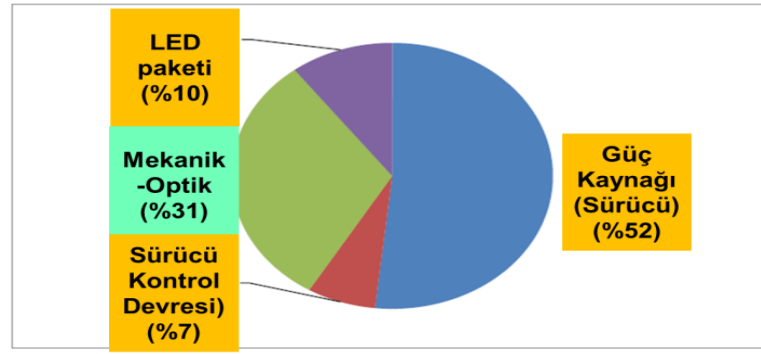
Şekil 1.1. Net elektrik tüketiminin aydınlatma sektöründe yıllara göre dağılımı (TÜİK, 2019).

Türkiye’de harcanan elektrik enerjisi oranı düşük görülmekte, aydınlatma alanında gerçekleştirilecek enerji verimli uygulamalar sayesinde bu oran daha da aşağı çekilebilir. Bu sayede emniyet ve konfor koşulları da göz önünde bulundurularak düşük enerji tüketimi ile daha iyi ve kaliteli yol aydınlatma hizmetleri sunulabilir (ECE/ENERGY/WP.4/2006).

Enerji verimliliği konusunda yoğun ve sürdürülebilir çalışmalar arasında daha kolay ve uygulanabilirliği yüksek olduğu için, yol ve sokak aydınlatma sistemlerinde yeni teknoloji LED’li yol aydınlatma armatürlerinin kullanılmasının büyük oranda enerji tasarrufu sağlayabileceği düşüncesi hakim olmuştur (Toy, 2015).

Aydınlatma pazarındaki en önemli gelişmenin LED’li aydınlatma sektöründeki büyüme olduğu görülmektedir. 2010 yılı itibariyle 13 milyar dolar ile toplam aydınlatma pazarında %13.1 pay alan LED’li aydınlatma araçlarının 2022 yılında 85.3 milyar dolara ve payının da %60’a ulaşması öngörülmektedir (İSO, 2019).

LED ışık kaynaklı armatürlerde güç kaynağı ve optik analizden kaynaklı problemler daha ön plana çıkmaktadır (Şekil 1.2). Uygun sürücü seçimi ile termal yönetim sağlanacak ve doğru optik analiz yapılarak verimli aydınlatma sistemi geliştirilmiş olunacaktır. Sağlamlık ve iyi bir optik performans elde etmede ürünün düşük sistem termal direnci oldukça değer kazanmıştır (Liu ve Luo, 2011). Optik analizde en sık kullanılan ve önemli bir malzeme olan merceğin görevi LED ışık kaynağından doğrudan gelen ışıkları aydınlatılmak istenen bölgeye homojen ve kayıpsız şekilde iletmektir. Bu durumda armatür verimliliğini etkileyen en önemli faktörün bölge dışına saçılan ışıklar olduğu anlaşılmaktadır. Bir başka ifade ile LED ışık kaynağından çıkan ışıkların aydınlatılması istenen bölgeye yüksek bir verimle ve homojen bir şekilde iletilmesini sağlayacak optik tasarım faaliyetleri armatür etkinlik faktörünü önemli derecede etkileyecektir. LED’li tümleşik lambalarda oluşan arızaların %31’i optik tasarım kaynaklıdır (LED Luminaire Lifetime, 2014).



Şekil 1.2. LED’li armatürlerde oluşan arızalar (LED Luminaire Lifetime, 2014).

Günümüzde geleneksel yol aydınlatma armatürlerinin yerini her geçen gün LED armatürler almaktadır. Hem enerji tasarrufu sağlayan hem de Uluslararası Aydınlatma Komisyonu (CIE) tarafından yapılan aydınlatma gereksinimlerini karşılayabilen geleneksel aydınlatma düzeni konumunda sabitlenmiş LED armatürlerin ışık dağılımını tasarlamak acil ve önemli bir konu olarak görülmektedir (Lai vd., 2011).

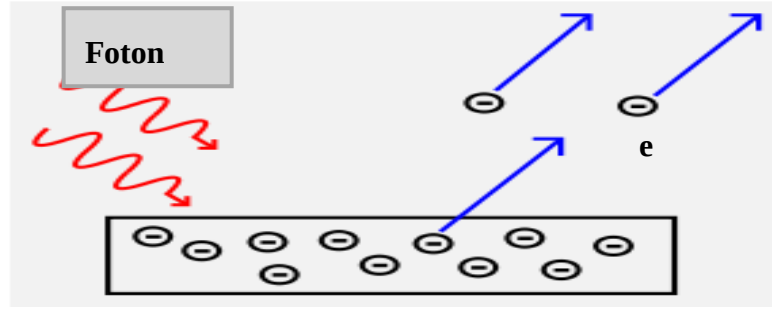
Buradan hareketle bu çalışmada, M1-M2 aydınlatma sınıfı yollar için yüksek enerji verimli LED’li yol aydınlatma armatürünün optik tasarımı amaçlanmıştır. Bunun için öncelikle aydınlatma ihtiyacını karşılayacak 120°’lik bir COB LED (chip on board light emitting diode) seçilmiştir. COB LED’lere LightTools programının kaynak kütüphanesinden ve Cree, Osram, Luminus gibi firmaların kurumsal sitelerinden erişim sağlanmaktadır. Çalışmada SolidWorks ve LightTools programları ile COB LED’den yayılan ışığa istenilen açıda yön verecek tercihen 160°’lik konkav-konveks bir mercek tasarlanmıştır. Mercek COB LED üzerine monte edilmiştir. LightTools programı üzerinde LED ile mercek arası uzaklık sırayla 10-12 ve 14 mm’ye ayarlanarak optik simülasyon çalışması yapılmış ve fotometrik değerler elde edilmiştir. LightTools’da elde edilen ışık dağılım eğrisinin uzantısı ‘.ldt’ olan Eulumdat dosyası ile Dialux hesap programına aktarılmıştır. Dağılım sonuçlarının LED’li yol aydınlatma tasarımına ilişkin usul ve esaslara göre aydınlatma sınıfı kriterlerini sağlayıp sağlamadığı test edilmiştir.

1.1 Işığın Doğası

Işık da diğer elektromanyetik ışınlamalar gibi foton adı verilen enerji paketlerinden oluşmaktadır. Fotonlar dalga ve parçacık özelliği gösterir ve bu durum fizikte dalga-parçacık ikilemi olarak adlandırılır. Işığı ve ışığın maddeyle etkileşimini inceleyen fiziğin alt dalına optik denilmektedir. Gökkuşağı, kuzey ışıkları gibi ışıqla ilgili olaylar optik olaylar olarak adlandırılır. Optik modern fiziğin önemli bir araştırma alanıdır (Wikipedia, 2020).

19. yüzyılın başlangıcından önce ışığın ya gözlenmekte olan cisim tarafından yayılan ya da gözlemcinin gözlerinden fıskıran bir parçacık sağanağı olduğu kabul edilmiştir. Işığın parçacık teorisinin baş mimarı olan Newton parçacıkların bir ışık kaynağından yayıldığını ve bu parçacıkların göze gelerek görme duygusu oluşturduğuna inanmıştır. Bu düşüncayı kullanarak Newton yansıma ve kırılmayı açıklamıştır (Serway ve Beincher, 2011).

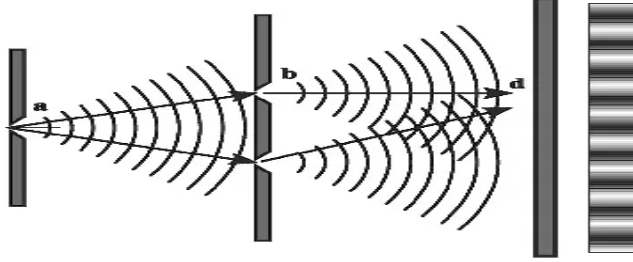
Einstein'ın fotoelektrik etki olarak bilinen ve ışığın parçacık teorisini destekleyen deneyinde ışık kaynağından çıkan fotonlar metal levhaya çarptıkça levhadan elektron sökmektedir (Şekil 1.3).



Şekil 1.3. Fotoelektrik etki (URL-1).

1678 yılında, Christiaan Huygens tarafından ışığın dalga teorisi geliştirilmiştir. Bu modelle ışığın yansıması, kırılması gibi olaylar dalga kuramıyla açıklanmıştır. Huygens'in teorisi 1807 yılında, ışığın bir levha üzerindeki çok küçük bir açıklıktan geçişi ve levhanın diğer tarafındaki ekrana serpilmesini gözlemleyen Thomas Young tarafından daha da ileri taşınmıştır. Young, aynı zamanda bir ışın demetinin bir başka ışın demeti ile girişim oluşturduğunu da fark etmiştir. Başta Young, Frensel olmak üzere çeşitli araştırmacılar tarafından yapılan ışığın kırınımı, girişimi ve

polarizasyonu deneyleri ile ışığın dalga özelliği kesinlik kazanmıştır (Crew, 2009). Dalga teorisini destekleyen Young deneyinde (Şekil 1.4) yarığa gönderilen ışık demetinin yarıktan geçtikten sonra dalgalar oluşturması durumunu ve sonrasında da iki yarıktan geçen dalgaların uyumlu birer ışık kaynağı gibi çalışması sonucu girişim yapması durumunu ve girişim neticesinde de ekranda karanlık ve aydınlık noktalar oluşması gözlenmiştir (URL-2).



Şekil 1.4. Young deney düzeneğinin basitleştirilmiş gösterimi. a tek delikli plaka, b iki delikli plaka (URL-2).

En önemli katkısı ise 1873'te ışığın yüksek frekanslı elektromanyetik dalga biçiminde olduğunu açıklayan Maxwell yapmıştır. Ayrıca Hertz ve diğer araştırmacılar bu dalgaların yansıma, kırılma ve dalgaların diğer bütün karakteristik özelliklerini sergilediklerini belirtmiştir. Bu gelişmeler karşısında ışığın ikili doğaya sahip olduğu dikkate alınmıştır. Işık bazı durumlarda dalga bazı durumlarda ise parçacık gibi davranmaktadır. Ancak iki özelliği de aynı anda gösterememektedir. Işığın madde içindeki yayılma hızı o maddenin kırıcılık indisini belirlemektedir (Serway ve Beincher, 2011).

İnsan gözünün frekans aralığı içinde hissedebileceği elektromanyetik dalga görünür ışık olarak bilinmektedir. Görünür ışığın frekans aralığı ise 380-780'nm olarak belirtilmiştir (Liu ve Luo, 2011). Genellikle renkler ve dalga boyları arasındaki yaklaşık ilişki Çizelge 1.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.1. Renkler ve dalga boyları arasında yaklaşık karşılık gelen ilişki (Liu ve Luo, 2011).

Görülebilir Işık			
Renkler	Dalga boyu (λ) (nm)	Frekans (ν) (THz)	Enerji (E) (eV)
Kırmızı	$622 < \lambda < 780$	$384 < \nu < 482$	$1.59 < E < 1.99$
Turuncu	$597 < \lambda < 622$	$482 < \nu < 502$	$1.99 < E < 2.08$
Sarı	$577 < \lambda < 597$	$502 < \nu < 520$	$2.08 < E < 2.15$
Yeşil	$492 < \lambda < 577$	$520 < \nu < 609$	$2.15 < E < 2.52$
Mavi	$455 < \lambda < 492$	$609 < \nu < 659$	$2.52 < E < 2.72$
Mor	$380 < \lambda < 455$	$659 < \nu < 789$	$2.72 < E < 3.26$

19. yüzyılın sonunda ve yirminci yüzyılın başlarında izafiyet teorisi ve kuantum teorisinin doğuşuyla ışık anlayışı daha da derinleşmiştir. Einstein LED'in ışık yaymasının fiziksel temeli olan bir kuantum ışık teorisini önermiştir. Ancak bu teoriye göre ışığın parçacık veya dalga özelliğinde olduğu genellemesi yapılamamaktadır. Örneğin LED çiplerinin ışık yayma prensibinin yorumlanmasında kuantum ışık teorisi benimsenirken LED'in aydınlatma optik tasarımında genellikle ışın teorisi benimsenmektedir. LED çipinin ışık yayma prensibi aktif bölgede elektron-boşluk çiftlerinin kendiliğinden ışıma rekombinasyonunun farklı dalga boylarında ışık üretmesi olarak tanımlanmaktadır (Liu ve Luo, 2011).

1.2 LED Işık Kaynaklarının Dünya Pazarına Girişi ve LED'lerin Gelişim Süreci

Aydınlatma ihtiyacı uzun yıllardır farklı şekillerde karşılanmıştır. Henüz geleneksel aydınlatma kaynakları keşfedilmeden önce bu ihtiyaç güneş ışığı, ateş ve mum ile giderilmiştir. Daha sonra akkor filaman floresan ve ilerleyen yıllarda ise LED teknolojisinin gelişmesi ile aydınlatma farklı anlamlar kazanmıştır. Her yeni teknolojinin keşfinde öne çıkan özellik ise ışık verimi olmuştur. Her teknoloji ışık verimini esas alarak ilerleme kaydetmiştir. Gelenekselden dijitale geçişte ışık kaynağının harcadığı enerji miktarında düşüş, ışık veriminde ise artış gözlenmiştir (Yılmaz vd., 2019).

LED'ler ışık yayan dijital olan ve bilgisayar çipleri ile aynı teknolojiye dayanan diyotlardır. Geleneksel aydınlatma ekipmanlarından farklı olarak yarı iletken malzemelerin bir araya getirilmesi ile oluşan elektronik çiplerdir. LED'lerin en önemli kısmını yarı iletken malzemeden oluşan ve ışık yayan LED çipi oluşturmaktadır. LED çipi noktasal bir ışık kaynağıdır. LED kılıfı içine yerleştirilmiş yansıtıcı eleman sayesinde ışığın belirli bir yöne doğru yayılması sağlanmaktadır (Erol ve Canbolat, 2010).

Elektrolüminesans olayı ilk olarak 1907 yılında İngiliz Mühendis Henry Joseph Round tarafından kristal dedektör ile deney yaptığı sırada keşfedilmiştir. Silisyum karbür kristalleri ile uğraşmakta olan Round kristalin belirli bölgelerine gerilim uyguladığında parıltılar gözlemlemiştir (URL-3).

Düşük yoğunluklu kırmızı ışık yayan ve gösterge ışıkları olarak kullanılan LED'ler ilk olarak 1920'li yıllarda Rusya'da icat edilmiştir. Ancak 1960'larda Amerika'da elektronik bileşen haline getirilerek kullanılmaya başlanmıştır. Yıllar içerisinde LED'ler hızlı bir şekilde gelişerek görünür duruma, ultraviyole ve kızılötesi dalga boylarına ulaşmıştır. Bu nedenle çeşitli aydınlatma uygulamalarında aydınlatma mesafesi 400 fit (150 metre) veya daha fazla mesafede LED'lerin kullanımı mümkün olmaya başlamıştır (DFI, 2014).

1965'te GaAsP malzemesinin kullanıldığı ilk ticari LED geliştirilmiştir. Çip yapısı sıradan bir diyota benzemekle birlikte sadece birkaç lümen kırmızı ışık yayabilmiş ve ışık verimliliği çok düşük olmuştur. Yarı iletken katkılama teknolojisinin gelişmesiyle birlikte 1985 yılında Japonya'dan Fujimoto sıvı faz epitaksi (LPE) yöntemiyle InGaAsP çift heteroyapı lazerlerini hazırlamıştır (Fujimoto vd., 1985). AlGaAs LED'lerin parlaklığı önceki LED'lerin parlaklığını aşmış ve daha sonra yüksek parlaklıkta LED'ler olarak adlandırılmıştır (Nishizawa vd., 1985). 1980'lerde yapılan araştırmalar temelde p-n eklem bölgesi ve kuantum verimliliğinin iyileştirilmesi üzerine yoğunlaşmıştır.

LED'ler 1985 yılına kadar elektronik göstergelerde ve hesap makinelerinde kullanılmıştır (Mottier, 2010). 1990'larda beyaz ışıklı LED'ler üç temel renk, mavi ve yeşil için InGaN ve kırmızı için AlGaInP yayıcısının birleşiminden meydana gelmiştir (Nakamura, 1997). Şekil 1.5'de kırmızı-yeşil-mavi (RGB) ile beyaz ışık

eldesi gösterilmiştir. Herhangi bir ışık renginin bu yöntemle üretilebilmesine rağmen yüksek maliyet ve bireysel çalışma voltajı kontrolü beyaz aydınlatma ortamı için hala ciddi bir problem olarak görülmektedir.



Şekil 1.5. RGB ile beyaz ışık eldesi (URL-4).

İlerleyen süreçlerde daha iyi bir yaklaşımla eklem bölgesinde yüksek güçlü mavi yayıcı ile fosfor kullanılmıştır (Bando vd., 1998; Schlotter vd., 1997). Şekil 1.6'da mavi yayıcı ile fosforun kullanımı gösterilmiştir. Fosfor dönüşüm esaslı beyaz LED'ler katı hal aydınlatmada (SSL) bir yenilik sunmuştur. Kompakt yapısı, kolay kurulum özelliği ve uzun ömürlerinden dolayı avantajlı olmuşlardır. Son zamanlarda beyaz LED'ler uygulama alanlarını oldukça genişletmiştir (Craford, 2005).



Şekil 1. 6. Mavi LED+Fosfor ile beyaz ışık eldesi.

1999 yılından sonra aydınlatma parametreleri hızla gelişen LED'ler günümüzde laboratuvar koşullarında dahi birim güç başına 1000-2000 lümen ışık akısı verebilecek düzeye gelmiştir (EVATEG 853-1, 2020).

LED'lerin ışık veriminin artması ve ısı dağılımının iyileştirilmesi yeni nesil ışık kaynaklarından biri olarak kullanılmasını beraberinde getirmiştir (Steigerwald vd., 2002; Nguyen vd., 2005). Dış aydınlatmada geleneksel ışık kaynakları ile kıyaslandığında LED'ler sadece yüksek enerji verimi değil aynı zamanda yüksek renk geri verim endeksi sağlamaktadır. Şekil 1.7'de LED paketleme teknolojisinin

yıllar içindeki değişimi gösterilmiştir. Gelişen ya da gelişmekte olan paketleme teknolojisi ile daha kompakt ve daha ucuz LED'ler ortaya çıkmıştır. Daha kompakt olması LED'leri daha uyumlu yaparken ucuz olması maliyeti oldukça düşürmüştür. LED ambalaj zaman içinde basit, düşük güçlü paketlemeden mevcut XLamp ve Rebel tipi paketlere dönüşmüştür (Liu ve Luo, 2011).



Şekil 1.7. SSL'nin gelişim süreci (Liu ve Luo, 2011).

LED'lerin ömrü genellikle uzundur ve 100.000 saate kadar çıkabilir. LED'ler genellikle dar bir bant aralığında ışık yayar böylece çoğu LED doymuş renkte ışık üretir (DenBaars, 2008).

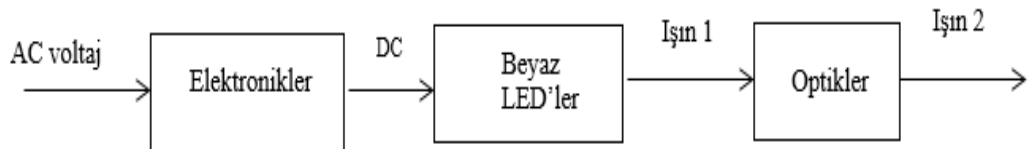
Diğer ışık kaynakları ile kıyaslandığında; LED'lerin daha uzun ömürlü, yüksek renk dönüşüm endeksli ve en önemlisi yüksek etkinlik faktörüne sahip olması gibi avantajları olduğu görülmüştür. LED'ler son yıllarda yol aydınlatmasında yaygın bir şekilde kullanılmaktadır (Jägerbrand, 2016). Motorlu trafik için yol aydınlatmasında kullanılan karakteristik ışık kaynakları ve aydınlatma parametreleri Çizelge 1.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 1.2. Motorlu trafik için yol aydınlatmasında kullanılan karakteristik ışık kaynaklarının araştırılması (Bommel, 2015).

Lamba tipi	lm/W	T _k	R _a	Ömür (s)	Şekil
Yüksek-basınçlı civa (YBC)	60	4500	40-60	15.000	Kompakt
Metal halide (MH)	100	4000	60-80	20.000	Çok kompakt
Yüksek-basınçlı sodyum (YBS)	120-140	2000	25	20.000	Kompakt-çok kompakt
Düşük basınçlı sodyum (DBS)	150-190	1700	0	15.000	Uzun doğrusal
Tübüler floresan	70-90	4000	80	15-20.000	Uzun doğrusal
Kompakt floresan (CFL)	70-75	4000	80	12-20.000	Doğrusal
LED (beyaz)	80-150	3000-6000	60-80	35-100.000	Nokta kaynak

Işık verimi lm/W ile ifade edilir ve bir ışık kaynağının şebekeden çektiği birim güç başına düşen ışık miktarını ifade eder.

LED'ler doğru akımda (DC) çalışırlar ancak doğrultucu yardımıyla alternatif akımda da (AC) kullanılabilirler. Şekil 1.8'de armatürün ışık etkinliğini belirleyen bileşenler zinciri verilmiştir. Santrallerde üretilen AC voltaj elektronikler yardımıyla DC'ye dönüştürülür, beyaz LED'e ulaşan DC gerilim sonucu LED ışık yayar. LED ışık kaynağından yayılan ışınlar çeşitli optik aygıtlar yardımıyla (mercek, reflektör vb.) açı ve yön değiştirerek aydınlatılmak istenen bölgeye düşürülür (Khan vd., 2015).



Şekil 1.8. Armatürün ışık etkinliğini belirleyen bileşenler zinciri (Khan vd., 2015).

LED'ler yaklaşık olarak 10 mA ve 1.5 V değerinden itibaren iletme geçerek ışık yaymaya başlarlar. Işık yayan diyotların yayım gücü zamanla orantılı olarak düşebilir. Diyot ekonomik olarak ömrünü yayım gücü normal gücünün yarısına düştüğünde tamamlamış olur. LED'in yaydığı ışık şiddeti üzerinden geçen akım ile

doğru orantılı olarak artar. Ancak bu artış akımın belli bir değerine kadar doğrusaldır, daha sonra bükülür. Eğer diyota verilen akım eşik değeri adı verilen doğrusallığın bozulduğu noktayı aşarsa, diyot aşırı ısınarak bozulur (Lenk ve Lenk, 2017; Schubert, 2006).

1960'ların sonlarında piyasaya sürülen LED'li lambalar bugün hala yol aydınlatmasında kullanılan birçok yüksek basınçlı civa lambasına verimli bir alternatif olarak geliştirilmiştir. O zamandan beri dünyanın her yerinde yol aydınlatma tesisatlarında yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. LED'li lambalar yaklaşık 2000 K renk sıcaklığı ve 25 Ra'lık bir renk geriverim endeksi ile sarı-beyaz ışık sağlarlar. Yol aydınlatması için renksel geriverimi oldukça kabul edilebilir olmakla birlikte iç mekan aydınlatma uygulamaları için yeterli olmaktan uzaktır (Bommel, 2015).

Yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar verimli bir ışık kaynağıdır (142 lm/W) ancak, lamba bir aydınlatma ekipmanı içerisine dahil edildiğinde ışık verimine etki eden bazı kayıplar ortaya çıkmaktadır. Bunlardan birincisi ballast kaybıdır. Diğer ise armatür gövdesi içerisindeki yansıtıcı yüzeylerden kaynaklı ışık kaybıdır. LED armatürler ile kıyaslandığında bu durum dezavantaj oluşturmaktadır. LED'li ışık kaynaklarında ışık kaynağı ve sürücü armatür gövdesi içine gömülüdür. Işık doğrudan aşağı yönlendirilir. LED teknolojisiyle donatılmış aydınlatma armatürlerinde ışık çıktısı sistem olarak ölçülür ve kayıplar bu ölçüme dahil edilir (Yılmaz vd., 2019).

1.3 Akıllı Mikro-Çip Işıklı İyileştirmeler: Oldukça Yüksek Güçlü Çok-Çipli COB LED

20. yüzyılın sonunda bir başka gelişime olarak COB LED'ler piyasaya sürülmüştür. Bu sayede, birkaç mikro-ledin (1 cm² lik yüzeye birkaç düzine kadar) küçük bir yüzey üzerine (birkaç cm² ye kadar) yerleştirilmesi mümkün olmuştur. Böyle bir çözüm ve mikro-çip ışıklı iyileştirmeler sayesinde COB LED'ler 20.000 lm değerini aşan ışık akısına ulaşmıştır. Bu gelişme LED'lerin yeni olası uygulamalarının geliştirilmesine önemli ölçüde katkı sağlamıştır. COB LED'de yüksek verimli mikro-çiplerin sayısı ve yoğunluğu büyüdükçe ışık kaynağının gücü de artmıştır. Bu durum küçük bir yüzeyden ısıyı dağıtma ihtiyacı ile alakalı ciddi bir mesele olan yapı

problemlerine sebep olabilmektedir (Seher vd., 2019; Ha ve Graham, 2012). Şekil 1.9'da COB LED'e ait bir görsel verilmiştir. Sarı bölge olan ve ışık yayan yüzey üzerinde çok sayıda mikro-çip yer almaktadır.



Şekil 1.9. Çoklu-çip ultra yüksek güçlü COB LED (Hsu vd., 2019).

COB LED'ler yapısı nedeniyle özel optik sistemlerin kullanılması ihtiyacını doğurmuştur (Ge vd., 2017; Hao vd., 2019). Katıhal COB LED'de işlem teknolojisi ve ışık parlaklığı güç yüzdesi artırılmıştır. Buna bağlı olarak optik performans da geliştirilmiştir (Hsu vd., 2019).

COB LED'lerin nispeten yeni bir ışık kaynağı olması, parlaklık testinin çok pahalı olması ve doğru ölçüm ekipmanı gerektirmesi bu konuyla ilgili sınırlı sayıda araştırma yapılmasına neden olmuştur. Asıl araştırmaların termal konulara odaklandığı görülmüştür (Wu vd., 2012; Ha ve Graham, 2012; Vakrilov vd., 2015).

Çizelge 1.3'de yıllara göre LED paketinin teknik özelliklerinin değişimi verilmiştir. Yıllar içerisinde etkinlik faktörü, renk geri verim endeksi, renk bütünlüğü, ekonomik ömür, paketleme verimliliği gibi özelliklerin artış gösterdiği; termal direnç ve lümen maliyetinin de düştüğü görülmüştür.

Çizelge 1.3. LED paketinin teknik özelliklerinin gelişimi (Liu ve Luo, 2011).

Yıllar	2008	2010	2012	2014	2016	2018	2020
Etkinlik Faktörü (lm/W)	100	130	150	170	180	190	200
Renk geriverim endeksi (Ra)	80	83	85	88	> 90	> 90	> 90
Renk bütünlüğü	>70%	>70%	>70%	>70%	>80%	>80%	>85%
Termal direnç (°C/W)	8	< 6	< 5	< 4	< 4	< 3	< 3
Ekonomik ömür (h)	30.000	40.000	50.000	70.000	90.000	90.000	100.000
Paketleme verimliliği	80%	84%	88%	90%	92%	94%	95%
Lümen maliyeti (¥/klm)	120	60	30	20	10	8	5

Dünyada aydınlatma yöneliminin yüksek güçlü LED tabanlı katı hal aydınlatmalara kayması ve LED’li armatürlerin geleneksel armatürlerin yerini alması beklenmektedir (Evans, 1997; Chen vd., 2008). Yıllar süren gelişmelerden sonra LED’ler iç aydınlatma, sokak aydınlatması, otomobil farları ve arka plan aydınlatması gibi alanlarda yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır (Craford, 2005; Lee ve Chen, 2016).

1.4 LED’lerin Çalışma Prensibi

SSL’de ışık p ve n adı verilen iki farklı yarı iletken malzemeden oluşan sandviç şeklinde bir katı hal malzeme içinde oluşturulur (Schubert 2006; van Driel ve Fan 2013). Bu şekilde ışık oluşumunun fiziksel olayına elektrolüminesans denir. Elektrolüminesans elektriksel ve optik bir olgudur ve malzemenin içinden geçen elektrik akımına tepki olarak ortaya çıkan ışık yayma durumudur. Malzemeye belirli safsızlıklar eklenerek malzemenin atomlarının ya fazladan elektron elde etmesine ya da elektron eksikliğine uğramasına katkılama işlemi denir. Katkılama işlemi malzemeyi daha iletken hale getirir ve bu malzemeye yarı iletken adı verilir. Yarı iletkenler zayıf elektrik iletkenliği olan malzemeden yapılmıştır. Ekstra elektronlu malzeme n-tipi bir yarı iletken, elektron eksikliği olan malzeme ise p tipi bir yarı iletken (Bommel, 2015).

P-tipi malzemede boşluk fazla iken n-tipi malzemede elektronlar fazladır. LED'e ileri besleme uygulandığı zaman n-tipi bölgedeki elektronlar p-n birleşim yüzeyinden geçerek p-tipi bölgedeki boşluklarla birleşmektedir. Elektron boşlukla birleşirken daha düşük enerji seviyesine düşmüş olur ve foton formunda enerji yayar (Şekil 1.10). Yayılan ışığın dalga boyu p-n eklem bölgesini oluşturan malzemeye bağlıdır. Isının %55-%80'i eklem bölgesinde oluşurken %20-%45 ise görülebilir ışıma olarak yayılır (Onaygil, 2016).

Yayılan fotonun enerjisi aşağıdaki eşitlikle belirlenir. Burada;

$$E = h \cdot \nu \quad (1.1)$$

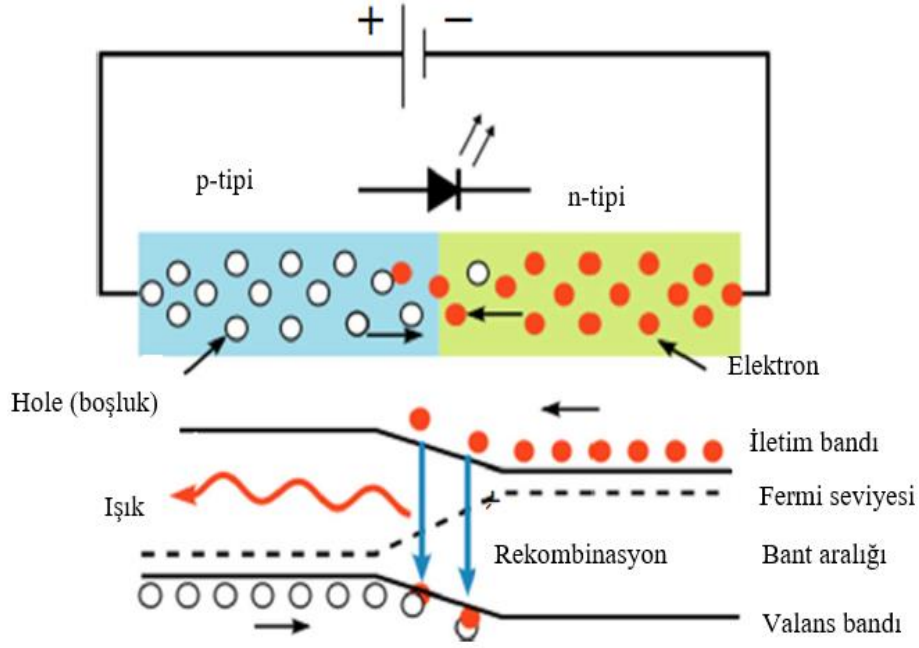
h Planck sabiti, ν ise fotonun frekansdır (birimi Hz =1/saniye). Bu enerji yaklaşık olarak yarı iletken malzemenin band genişliğine eşittir.

$$E = E_g \quad (1.2)$$

Yarı iletkenin band genişliği arttıkça yayımlanan fotonun frekansı yükselir. Fotonun frekansı ile dalgaboyu arasındaki ilişki ise;

$$\nu = c / \lambda \quad (1.3)$$

ile verilir. Burada c ışık hızıdır. Görünür ışık bölgesi mor ışık ile yani yaklaşık $\lambda = 380$ nm'de başlar ve kırmızı ışık ile yani yaklaşık 680 nm'de biter.

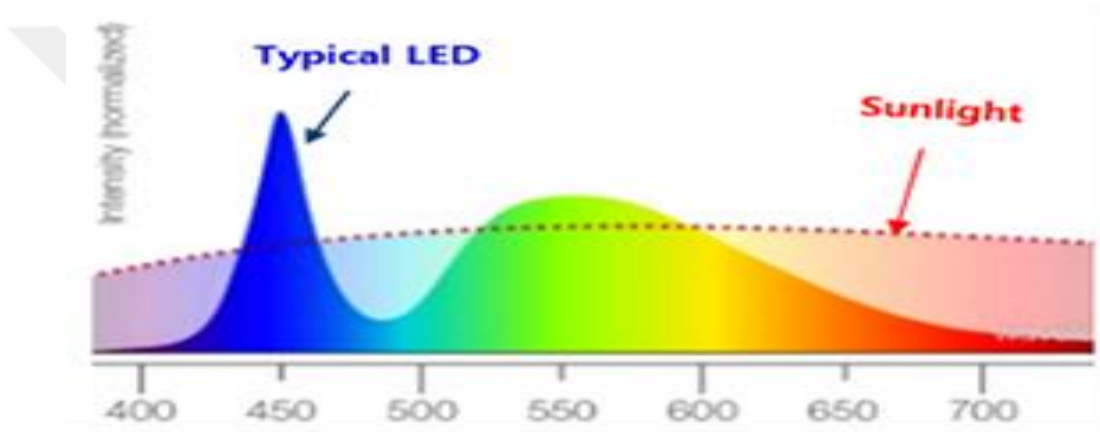


Şekil 1.10. LED'lerin iç işleyişi (Wikipedia, 2019).

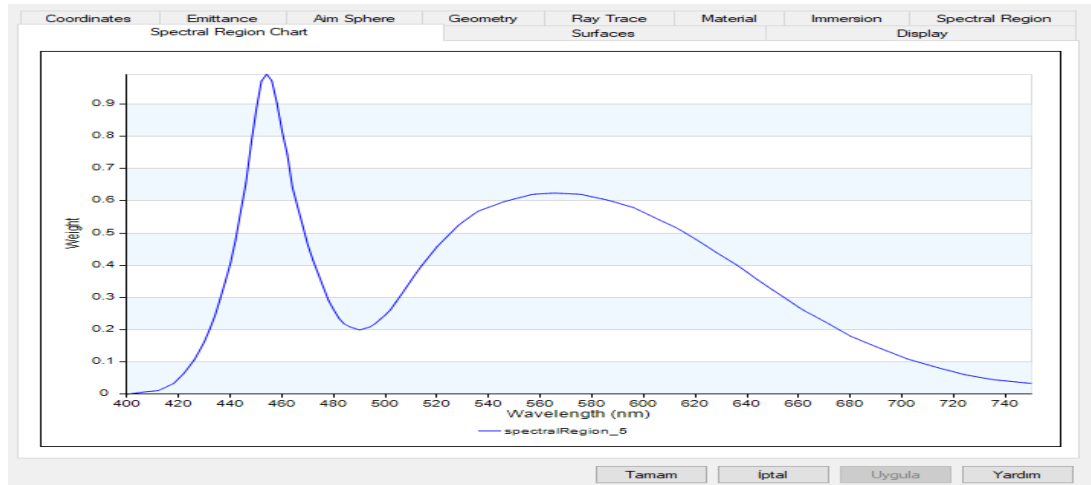
LED üretiminde kullanılan farklı malzemeler, farklı enerji seviyelerine sahip fotonlar üretecektir. Böylece ışığın dalga boyu ayarlanabilir. İlk zamanlarda LED endüstrisi, kızılötesi ışıktan yeşil ışığa kadar tüm dalga boylarını kapsayan herhangi dalga boyunda bir LED üretmek için $\text{GaAs}_{1-x}\text{P}_x$ yapıyı kullanmıştır. Tipik olanlar arasında kırmızı $\text{GaAs}_{0.6}\text{P}_{0.4}$ LED'i, turuncu $\text{GaAs}_{0.35}\text{P}_{0.65}$ LED'i, sarı $\text{GaAs}_{0.14}\text{P}_{0.86}$ LED'i kapsamaktadır. Galyum, arsenit ve fosfor kullanıldığında bu LED'ler genellikle üçlü LED olarak bilinmektedir (Liu ve Luo, 2011).

LED'in hangi renkte ışık yayması isteniyorsa galyum, arsenit, alüminyum, fosfat, indiyum, nitrit gibi kimyasal malzemelerden uygun oranda yarı iletken malzemeye katkı yapılır (GaAlAs , GaAs , GaAsP , GaP , InGaAlP , SiC , GaN). Böylece LED çipinin istenen dalga boyunda ışımaya yapması sağlanır. Örneğin kırmızı renk (660 nm) için GaAlAs , sarı renk (595 nm) için InGaAlP , yeşil renk (565 nm) için GaP , mavi renk (430 nm) için GaN kullanılır. LED çipinde kullanılan katkı maddesine bağlı olarak aynı renkli LED'lerin dalga boyu farklı olabilmektedir. Örneğin InGaAlP katkılı LED 640 nm dalga boyunda; GaAlAs katkılı LED 660 nm dalga boyunda; GaP katkılı LED ise 700 nm dalga boyunda kırmızı ışık yayar (Liu ve Luo, 2011).

Dünyanın atmosferine ulaşan güneş ışığı dalga boyuna göre ultraviyole ışınlar (100-400 nm), görünür ışınlar (380-780 nm) ve kızılötesi ışınlar (700 nm-1mm) ayrılmıştır. Yapay bir ışık kaynağının renkesel geri verimi o ışık kaynağının spektrumuna yani dalga boyu bileşenine bağlıdır. Işık kaynağı spektrumu gün ışığı spektrumuna ne kadar yakınsa o kaynağın renksel geriverimi de o derece yüksek olacaktır. Işık spektrumu ışığın hangi dalga boyunu enerji veya güç birimleri açısından ne kadar içerdiğini gösteren bir grafikdir (Şekil 1.11 ve Şekil 1.12). Renksel geriverim özellikle yumuşak renksel dönüşümlerin ve tonlamaların önemli olduğu mekanlarda önem kazanırken, renksel algılamamanın önemsiz olduğu mekanlarda göz ardı edilebilir (Mercan vd., 2013).



Şekil 1.11. Güneş ışığı ve tipik LED spektrumu (dalga boyu bileşeni) (URL-5).



Şekil 1.12. 4000 K renk sıcaklığında bağlı spektral güç dağılımı eğrisi ($I_f = 800$ mA, $T_j = 85^\circ\text{C}$).

1.5 Aydınlatma Uygulamaları için LED Paketi Yapısı

LED'ler yeni nesil ışık kaynaklarından biri olarak ışığın daha etkin kullanımından dolayı yüksek parlaklıkta aydınlatmada kullanılmak için tasarlanmıştır (Steigerwald vd., 2002). 1997'den bu yana ışık etkinliği, optik verimlilik ve renk kalitesi hızla artmış yalnızca ekran ve sinyal teknolojisinde değil, aynı zamanda LED cihazlarda da daha geniş uygulamalara izin vermiştir. LED teknolojisinin esas uygulama alanı hem malzemelerin hem de üretim süreçlerinin optimizasyonu; çip teknolojisi, fosfor teknolojisi ve paketleme teknolojisinin gelişmesiyle genel aydınlatmaya dönüşmüştür. Hem endüstriyel ülkelerde hem de gelişmekte olan ülkelere kabul edilebilir aydınlatma ve renk kalitesine sahip yüksek kaliteli uygulamalar için güvenilir, uzun vadede kararlı, ekonomik ve çevre dostu LED'ler geliştirmek için aşağıdaki hususlar dikkate alınmalıdır (Khan vd., 2015);

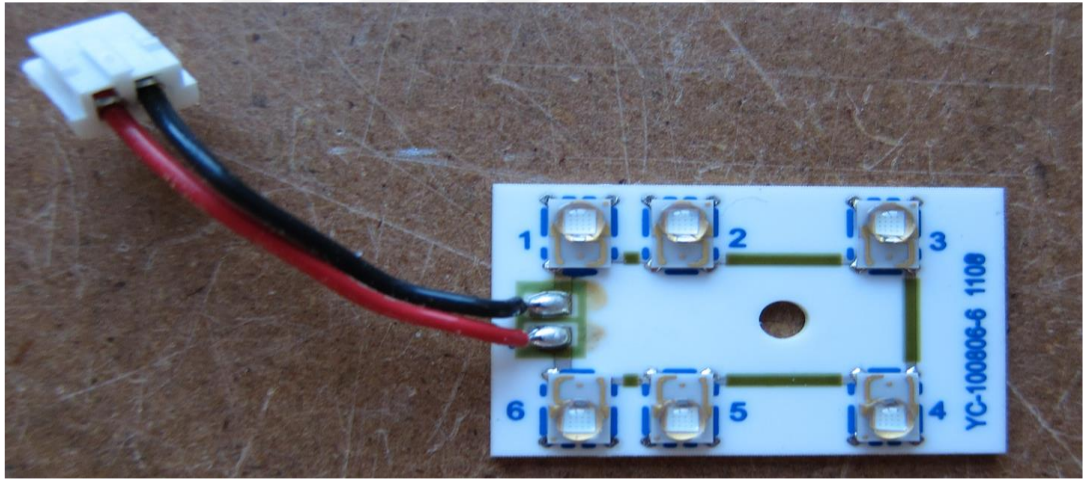
- LED sistemleri, zorlu hava ve ortam koşullarında 12 yıldan daha uzun bir ömre izin vermelidir. Bu süre sokak aydınlatması için yaklaşık 50.000 saatlik bir ömür anlamına gelir. Bu gereksinimleri karşılamak için, LED kalıbı, paketi ve LED ışık kaynağının elektronik, mekanik aksesuarlar, optikler ve armatür muhafazası gibi tüm bileşenleri en yüksek güvenilirlik için optimize edilmelidir.
- Bir LED armatür veya genel bir LED aydınlatma sisteminde; ışık verimliliği, aydınlatılan alandaki aydınlatma dağılımından ve renk kalitesi geleneksel sistemden daha iyi ise LED armatür geleneksel bir aydınlatma sisteminin yerine geçebilir. Bu nedenle, kuantum verimliliğinin, dönüşüm verimliliğinin ve kaynağı ışık şiddeti dağılımının optimizasyonu zorunludur.
- Bir aydınlatma tesisatı için fiyat ve yatırım kullanıcıların beklentilerini karşılamalıdır. Böylece güvenilirlik ve aydınlatma verimliliğinin iyileştirilmesine paralel olarak LED teknolojisindeki malzemelerin, fabrikasyon ekipmanlarının ve işlem sürecinin minimize edilmesi ve optimizasyonu öncelik verilmelidir.

Yukarıdaki hedeflere ulaşmak için yarı iletken endüstrisindeki LED optimizasyonunun esas odak noktalarından biri paketleme teknolojisidir. Genel olarak bir LED paketinin yapısı; plastik mercek, silikon yatak, InGaN LED çip, kaynak bağlantısı, soğutucu blok, altın tel ve anot-katot başı ve elektronik devre elemanlarını monte etmek için kullanılan baskılı devre kartı (PCB)'dan oluşur (Maeng ve Ko, 2015).

Seramik bir PCB üzerine yerleştirilmiş LED lambalar Şekil 1.13’de gösterilmiştir. Düşük güç ve yüksek güç LED paketinin genel yapısı oluşturulurken aşağıdaki işlem yolu izlenir (Khan vd., 2015);

- Gümüş bir yapıştırıcı ile bir alt tabaka (ESD (elektrostatik deşarj) korumalı bir alt montaj) üzerine monte edilen LED çip,
- Üretilen termal enerjiyi çip konumundan uzağa taşıyan ısı dağıtıcı olarak işlev gören seramik veya metal (silikon) olarak yüzey,
- Soğutucu üzerine monte edilmiş alt tabaka (seramik, bakır, alüminyum),
- Elektrik bağlantıları (gümüş, altın) için LED ara bağlantı bileşenleri olarak bağ teller,
- Çipi harici mekanik ve çevresel etkilere karşı koruma görevi olan silikon yatak,
- Birincil optik malzeme olarak plastik mercek.

Bu genel yapı bir LED paketinin geleneksel bir şekilde nasıl oluşturulacağı hakkında bir görüş sağlayabilir.

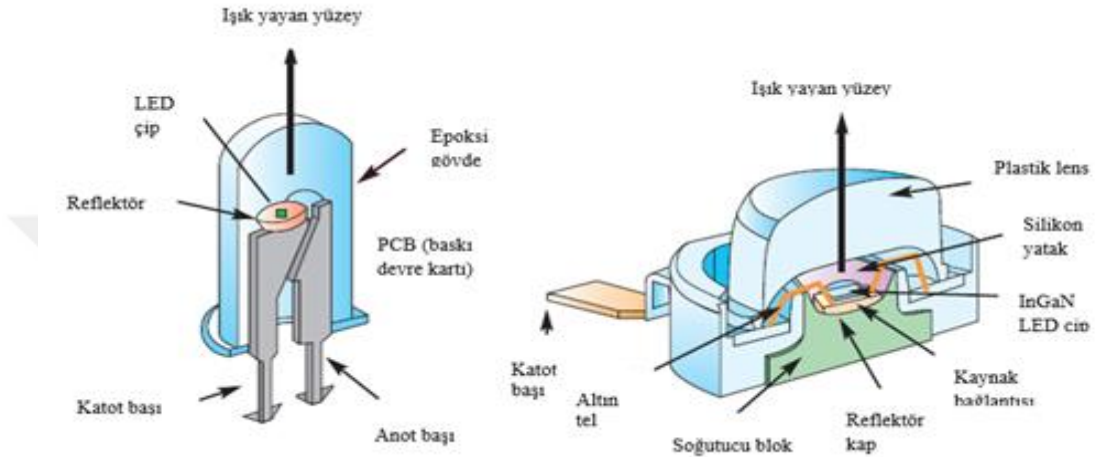


Şekil 1.13. Seramik bir PCB üzerine yerleştirilmiş LED lambalar (Cangeloso, 2012).

Seviye 0'dan seviye 3'e kadar LED sistemlerinin yapımında farklı bir işlem yolu izlenmektedir (Şekil 1.14). Bu işlem yolu aşağıda açıklanmıştır (Bommel, 2015);

- Seviye 0: LED çip.
- Seviye 1: LED paket. Elektrik bağlantısı, mekanik bağlantı ve koruma, ısı dağıtma cihazı ve temel optik bileşenlerle paketlenmiş çiptir.

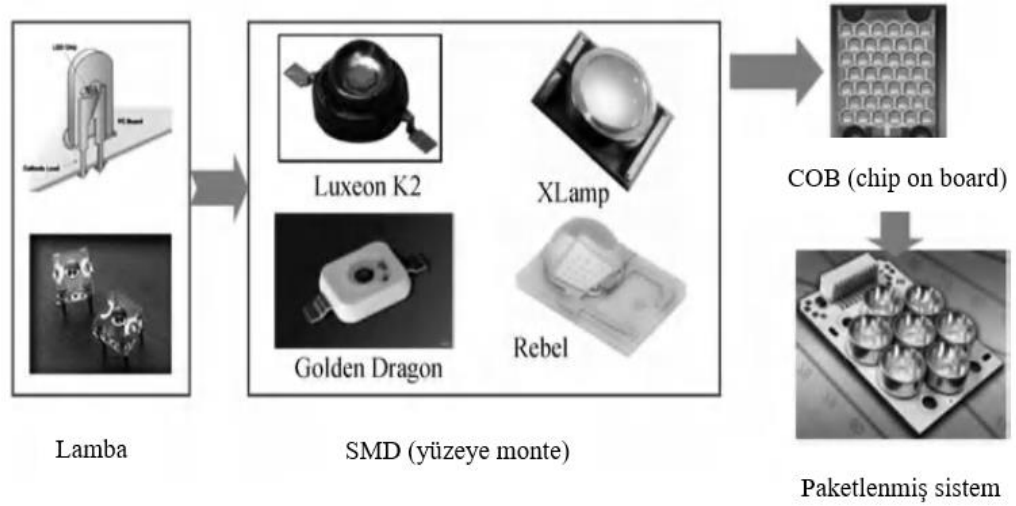
- Seviye 2: LED küme. Çoğu uygulama için tek bir LED'in ışık çıkışı yeterli olmadığından PCB'ye birden fazla LED monte edilir.
- Seviye 3: LED modül. LED küme, ısı emici, elektrikli sürücü ve bazen de optik bir cihaz içeren bir modüldür. LED modülü lamba görevi görür.
- Seviye 4: LED modül ile gövde ve ikincil optikten oluşan armatürdür.
- Seviye 5: Kontrol özelliklerini içeren LED aydınlatma sistemidir.



Şekil 1.14. Düşük güç (sol) ve yüksek güç (sağ) LED paketi yapısı (Boyce ve Raynham, 2009).

Yüksek güçlü LED'lerde montaj, ısıyı çipten uzağa iletecek şekilde tasarlanmıştır. Tüm cihaz, yüksek sıcaklığa, suya ve aside direnci yüksek olan ve ayrıca plastik bir reçine olan epoksi kılıf içinde saklanır. Standart epoksi reçinelerin termal iletkenliği, havaya göre daha iyidir ve bunlar ısıyı daha verimli bir şekilde dağıtırlar (Boyce ve Raynham, 2009).

Yüksek güçlü LED genellikle tek çip boyutunun 1mm*1mm'den az olmadığı ve sürücü akımı en az 350 mA olan LED modülünü ifade etmektedir. Ancak bazı durumlarda bu akım değerinin 100 mA değerine düşürülmesi uygundur. Yüksek güçlü LED'lerin icadı ile LED ısı dağıtımını sorunu daha ciddi hale gelmiştir. Çipin ısıyı çevreye hızlı bir şekilde iletilemezse çipin bağlantı sıcaklığı hızla yükselir. Aşırı yüksek sıcaklık çipin aktif tabakasında elektron-boşluk birleşme etkinliğinde büyük bir azalmaya yol açabilir ve iç kuantum verimliliğini etkileyebilir (Luo vd., 2016). Şekil 1.15'de düşük güçlü LED'den SMD'ye (yüzeye monte) ve sonrasında COB LED'e geçiş ve paketleme teknolojisindeki gelişim gösterilmiştir.



Şekil 1.15. LED paketleme teknolojisi ve yapısının geliştirilmesi (Liu ve Luo, 2011).

1.5.1 Yüksek güçlü LED paketin temel elemanları ve sistem tasarımı

İlk ışık yayan diyotun 1962'de Holonyak ve Bevacqua tarafından icat edildiğinden bu yana (Holonyak ve Bevacqua, 1962), LED'ler epitaksi büyümesi (Dupuis ve Krames, 2008), yonga tasarımı ve üretimi (Lee vd., 2007), paketleme yapıları, süreçleri ve malzemelerin hızlı gelişimi ile son yirmi yılda dikkate değer bir ilerleme kaydetmiştir. 1990'ların başında Nakamura safir substrat üzerinde mavi ve yeşil GaN bazlı LED'leri başarıyla büyötmüştür (Nakamura vd., 1993; Nakamura vd., 1991). 1995 yılında YAG'ın mavi LED çipine uygulandığı yöntemin bir parçası olarak beyaz ışık üretmek için Ce fosfor keşfedilmiş ve ilk olarak beyaz LED'ler ticarileşmiştir (Nakamura ve Fasol, 2013; Schlotter vd., 1997). Beyaz LED'ler yüksek verimli olma, küçük boyutlu, uzun ömürlü, dayanıklı olma, düşük güç tüketme, güvenilir olma gibi özelliklere sahiptir (Evans, 1997). Beyaz LED pazarı büyük boyutlu düz panel arka aydınlatma, yol aydınlatması, araç farı, müze aydınlatması ve konut aydınlatması gibi çeşitli uygulamalarda hızla büyümektedir (Steranka vd., 2002; Lee vd., 2008).

Beyaz LED'ler ile birlikte SSL'nin akkor lambalar, floresan lambalar ve yüksek basınçlı sodyum lambaların yerine dördüncü aydınlatma kaynağı olacağı genel olarak kabul edilmiştir (Tsao, 2002). Ortaya çıkan aydınlatma uygulamaları beyaz LED'lerin daha yüksek performans göstermesini sağlamış ve tüketiciler için kabul edilebilir bir aralıkta maliyeti azaltmıştır. LED'lerin performans/fiyat oranı (lm/\$)

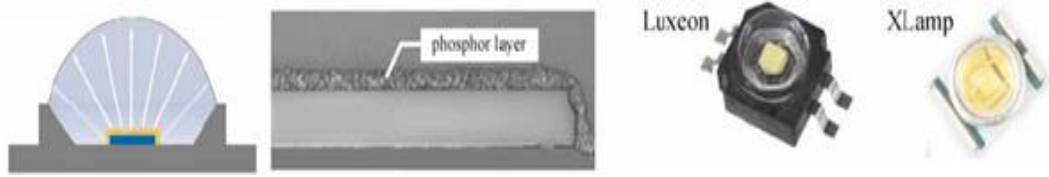
geleneksel lambalardan neredeyse on kat daha düşüktür. Bu durum genel aydınlatmada beyaz LED'lerin uygulama alanını kısıtlamaktadır. Performansı artırmak ve maliyeti azaltmak için daha fazla araştırmaya ihtiyaç olduğu görülmüştür. 2008 yılında Philips Lumileds ve Osram Opto yarı iletken laboratuvar sonuçlarını 350 mA sürücü akımında 1 mm² çip kullanarak 140 lm/W ışık verimliliği olarak açıklamıştır (LEDs Magazine, 2008). Paketleme endüstride hacimli üretim için gerçekleştirilen bu laboratuvar kaydının istikrarlı ve düşük maliyetle tutulması için kritik öneme sahiptir. Teorik olarak LED mükemmel koşullar verildiğinde 100.000 saat kadar çalışabilmektedir. Buna karşın LED çipi; ESD, nem, yüksek sıcaklık, kimyasal oksidasyon ve şoklama açısından hasara karşı hassastır. Paket LED çipini hasara karşı korur. Ayrıca paket yüksek ışık akısı sağlamak için ışık çıkışının arttırılmasından, LED'in güvenilirliği ve ömrünü arttırmak için üretilen ısıyı çipten uzaklaştırmaktan ve özel gereksinimler için rengi kontrol etmekten sorumludur (Haque vd., 2003). Beyaz LED paketindeki temel gereksinimler; yüksek ışık verimliliği, renk oluşturma endeksi (CRI), ilişkili renk sıcaklığı (CCT), mükemmel renk kararlılığı, düşük termal direnç, hızlı termal dağılım, yüksek güvenilirlik ve düşük maliyettir. Tüm bu gereksinimleri aynı anda karşılamak paket için basit bir iş değildir. Gelişmiş paket malzemeleri ve teknikleri yüksek performanslı LED'ler için gereklidir, ancak bu durum maliyeti yükseltmektedir. Elmas, süper termal iletkenliğe (2000 W/mK) sahiptir. Ancak, elmasın da yüksek maliyeti termal dağılım için kullanılmasını imkansız kılmaktadır. Ambalaj tasarımı bu tezatlıkları dengelemeli ve en uygun hedefleri garanti etmelidir. Beyaz LED paketi temel olarak optik, termal bilim, malzeme, mekanik, elektronik, paketleme süreci ve ekipmanla ilgilidir. Bu önemli faktörler beyaz LED'lerin nihai performansını belirlemektedir. Genel olarak malzeme, süreç ve ekipman beyaz LED paketinin gelişmesinde önemli faktör olarak görülmektedir. Örneğin; silikonların ortaya çıkması yüksek güçlü LED'lerin epoksi kılıf içeren geleneksel LED'lerden daha uzun süre kullanılmasını sağlamıştır.

Optik; ışık verimliliği, CCT ve CRI ile ilişkilidir. Işık verimliliği, LED'in diğer aydınlatma kaynaklarından daha fazla enerji tasarrufu potansiyeli olup olmadığını belirleyen doğrudan bir kriter olduğu için optikteki temel konulardan biridir. Işık verimliliğini arttırmak için LED üzerinde kullanılan genel yöntemler; paketleme, uygun fosfor kaplama, serbest biçimli mercek ve yüksek şeffaf, yüksek kırılma

endeksli kılıflar ile kaplama, optimize edilmiş reflektör kullanma işlemleridir. Fosfor, malzemede ışık veriminin iyileştirilmesinde önemlidir. Beyaz LED'lerin ışık verimliliği 100 lm/W değerini aştığı için beyaz LED'leri çeşitli uygulamalarda kullanılabilir hale getiren CCT ve CRI optikte daha önemli bir hale gelmiştir (Narendran ve Deng, 2002). Bu iki faktör aydınlatma konusunda daha rahat ve daha gerçek bir görüş sağlayabilir. Beyaz LED'ler geleneksel lambalardan daha uzun ömür sunsa da enerji tasarrufu konusunda nispeten yüksek maliyete sahiptir ve güvenilirlik konusunda da daha kesin önerilere ihtiyacı bulunmaktadır.

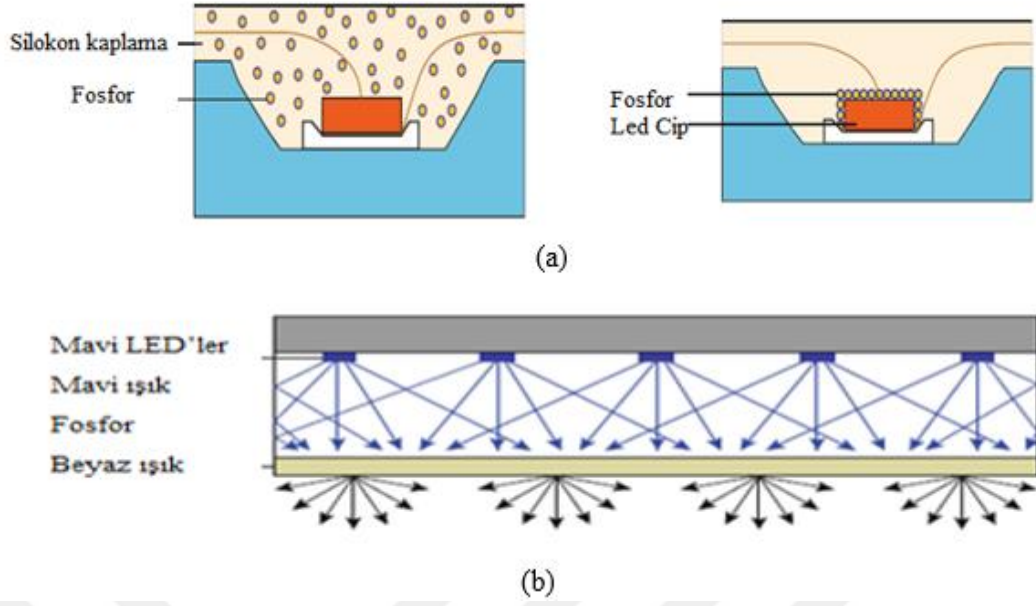
1.5.2 Beyaz ışık LED üretimi

LED'ler ile beyaz ışık üretmenin temelinde iki farklı olay söz konusudur (Pelsan, 2019). Bunlardan ilki; üç renkli kırmızı, yeşil, mavi LED kullanarak birleşimlerinden beyaz ışık elde etmektir. İkincisi ise kısa dalga boylu (mavi veya ultraviyole) ışın yayan LED'leri fosfor tabakası ile kaplayarak beyaz ışık elde etmektir (Şekil 1.16).



Şekil 1.16. Uyumlu fosfor kaplama işlemi (Liu vd., 2009).

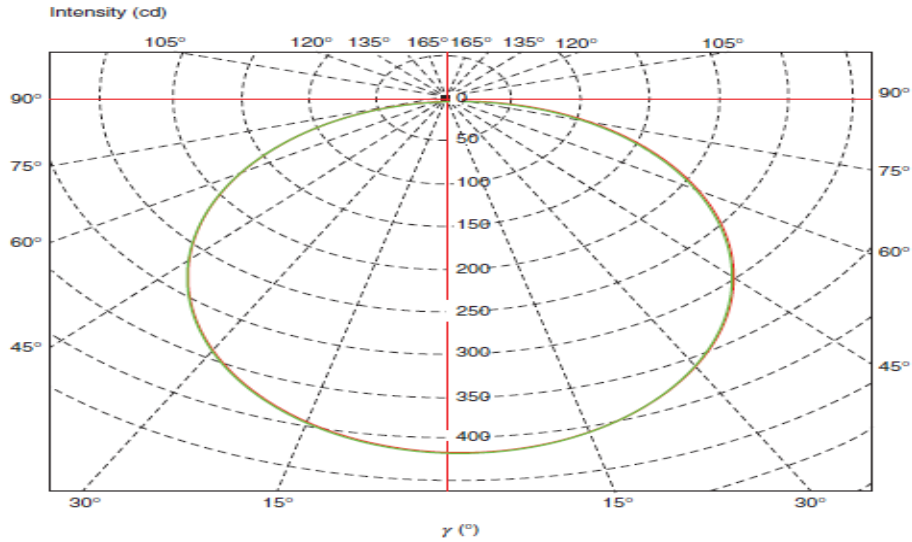
Şekil 1.17'de (a) silikon kaplama içerisinde fosfor tanecikleri (sol) ve uyumlu fosfor kaplama (sağ), (b) beyaz ışık oluşturan fosforlu LED modülü gösterilmiştir.



Şekil 1.17. Mavi LED+Fosfor kullanarak beyaz ışık eldesi (Bommel, 2015).

LED’lerde fosfor kullanımı ile yüksek CRI elde edilir. Mavi LED çipinin ve fosfor karışımının ışık yayma özelliği nedeniyle beyaz LED’in ışık yoğunluğu bir ‘Lambert’ radyatörün açısal ışık yoğunluğu dağılım eğrisine karşılık gelir. Incandescent ve floresan lamba gibi geleneksel ışık kaynaklarından farklı olarak LED ışık kaynağı Lambert tipte yayıcıdır. Lambert yansıması ideal mat veya dağınık olarak yansıtan bir yüzeyi tanımlayan özelliktir. Yüzeye gelen ışın geldiği açı ile yansıması yerine birçok açıyla yansır. Bir Lambert yüzeyinin bir gözlemciye görünür parlaklığı gözlemcinin görüş açısına bakılmaksızın aynıdır. Daha teknik olarak yüzeyin parlaklığı izotropiktir. Bu durum bir sistemin ya da modelin özelliklerinin yönden bağımsız olması durumu ile açıklanabilir (Bommel, 2015).

Işık yoğunluğu Lambert’in kosinüs yasalarına uyar (Aslanov vd., 2013) ve ışık yoğunluğu dağılımı eğrisi bir kosinüs güç fonksiyonunu takip eder (Zhenrong vd., 2009). LED’in ışık dağılım eğrisi Şekil 1.18’de gösterilmiştir.



Şekil 1. 18. Beyaz bir LED'in ışık dağılım eğrisi (Bommel, 2015).

1.6 LED'lerin Aydınlatmada Kullanımı

Dış aydınlatmada geleneksel ışık kaynakları ile kıyaslandığında LED'ler yalnızca yüksek enerji verimliliği değil aynı zamanda yüksek CRI sağlar. Renk kalitesi oldukça yüksek olup %90'ın üzerindedir. Sokak aydınlatmasına yönelik kullanıldığında LED'lerin kompakt boyutu optik tasarımın daha esnek olmasına olanak sağlar (Narendran ve Deng, 2002).

Aydınlatma sistemleri sağlık ve çevre açısından zararsız ve temiz olmalıdır. Bu sayede temiz enerji için LED aydınlatma sistemleri oldukça önemlidir. LED aydınlatma sistemleri zararlı maddeler içermezken enerji tasarrufu ve çevreye duyarlılık konusunda katkı sağlarlar (Morrow, 2008).

LED'ler günümüzde yol aydınlatması için enerji verimli en önemli seçenektir. LED'ler civa buharlı ve yüksek/düşük basınçlı sodyum lambalar gibi geleneksel yol aydınlatma teknolojilerine kıyasla %50-70 oranında hükümetlerin enerji tasarrufu sağlamasına yardımcı olabilir. Enerji tasarrufu sayesinde sağlık hizmetleri, eğitim ve altyapı gibi diğer kamu hizmetlerine yeniden yatırım yapılabilecek önemli bütçeler oluşturulabilir. Ayrıca, LED tabanlı enerji verimli yol aydınlatma teknolojilerine geçiş, sera gazı salınımının azaltılmasına yardımcı olarak çevre dostu bir aydınlatma aracı olarak kullanılabilir (DFI, 2014).

Geleneksel ışık kaynakları yerine LED’li armatürler kullanılırken dikkat edilmesi gereken en önemli kriterlerden biri, LED’li armatürlerin yol sınıflarında sağlaması gereken aydınlatma kriterleriyle uyuyor olmasıdır. Aydınlatma parametrelerini sağlıyor olmak hem yol aydınlatma armatürünün performansını, hem de sürücü için görsel algının kalitesini belirlemede önemli bir faktördür. LED’li ışık kaynakları ile YBSB’li armatür kıyaslaması yapılırken, YBSB’li armatürler grubunda teknolojik olarak erişilebilir en verimli tesisatlar referans alınmalıdır (Yoomak vd., 2018).

Lamba seçiminde dikkat edilecek parametreler; etkinlik faktörü-ışıksal verim (lm/W), renk sıcaklığı (K), renksel geriverim endeksi (CRI, Ra= 0-100) ve lamba ömrüdür (h). Çizelge 1.4’de LED, YBSB’li ve YBCB’li teknolojiler karşılaştırılmıştır.

Çizelge 1.4. Üç teknoloji arasındaki en önemli farklılıklar (DFI, 2014).

Değişkenler	LED	Yüksek basınçlı sodyum buharlı	Yüksek basınçlı civa buharlı
Direkler arası mesafe (m)	30	30	30
Direk sayısı	33	33	33
Maliyet (\$)	\$\$\$	\$\$	\$
Lamba gücü (W)	70	150	250
Sistem gücü (W)	70	180	300
Işık etkinlik faktörü (lm/W)	90-130 (hızla gelişmekte)	100	60
Sistem etkinliği (lm/W)	90-130 (hızla gelişmekte)	80	48
m ² başına watt (W/m ²)	0.33	0.86	1.42
Ömür (kh)	50	12	5
Yıllık enerji tüketimi (\$)	1.532	3.938	6.563
Tehlikeli maddeler	Yok	Var	Var
Renk dönüşüm endeksi (CRI)	>70	25	<60

LED’li armatürler, görsel konfor ve güvenlik açısından minimal düzeyde aydınlatma parametrelerini sağlamalıdır. LED teknolojisi son yıllarda hızla gelişirken, piyasaya sürülen armatürlerin minimum aydınlatma kriterlerini yerine getirememesi riski de

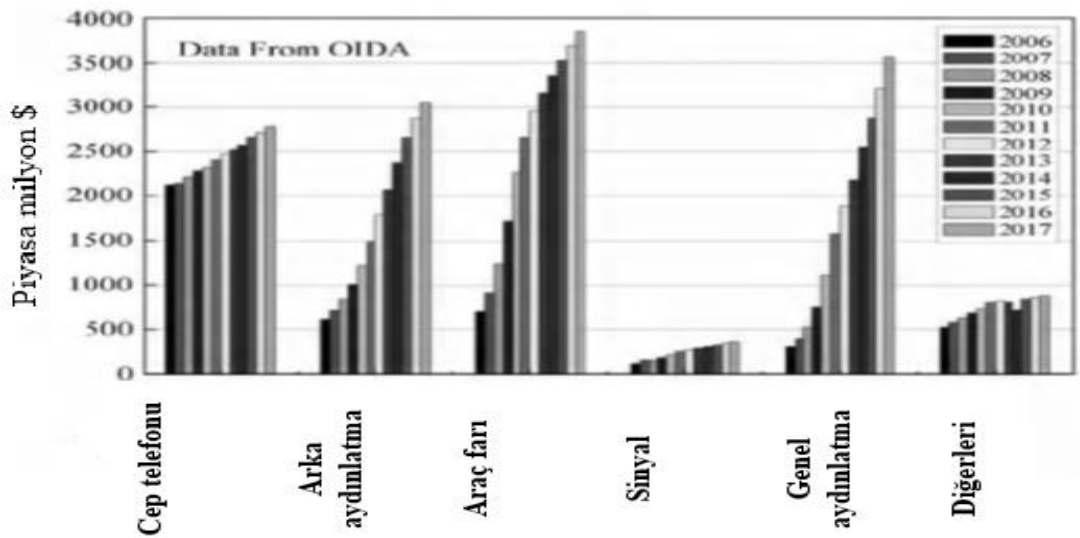
bulunmaktadır. Uluslararası standart ve önerilere uygun aydınlatma kriterlerinin sağlanabilmesi için; optik, ısı ve elektriksel özellik bakımından iyi tasarlanmış armatürler hedef alınmalıdır ve tüm bunlar yapılırken uluslararası kabul görmüş standartlar uygulanmalıdır (Yurtseven ve Onaygil, 2011).

LED'in lümen verimliliğindeki artış ve tek bir modülün ışık akısı sayesinde LED'li göstergeler hızlı bir şekilde piyasaya girmiştir. LED'ler arka plan aydınlatma, ekran, projektör, otomotiv aydınlatma, yol aydınlatması, iç aydınlatma, peyzaj aydınlatma gibi geniş bir kullanım alanına sahiptir (Chang vd., 2012) (Şekil 1.19).



Şekil 1.19. Yüksek güçlü LED uygulamaları (Liu ve Luo, 2011).

Aydınlatma pazarı büyüklüğünde her geçen yıl artış gözlenmiştir. Şekil 1.20'de ticari sektörlerde LED'in piyasa tahmini verilmiştir.



Şekil 1.20. Birçok büyük ticari sektörde LED'in piyasa tahmini (Liu ve Luo, 2011).

Beyaz ışık yayan diyot tabanlı aydınlatma aygıtları, mükemmel gün ışığı (CCT>6500K), uzun ömür (>50kh), yüksek parlaklık (>10 knit), kolay kontrol edilebilir ve çevre dostu olması sebebiyle yavaş yavaş floresan ve akkor lambaların yerini almıştır (Cheng ve Cheng, 2006).

Mevcut LED'ler kaliteli üreticilerden alındığında çok sağlamdır. Yüksek kaliteli LED'ler tipik olarak iyi renk tutarlılığına ve yüksek lümen etkinliğine sahiptir. Kullanım ömrü boyunca yüksek lümen çıkışı sağlamaktadır. Dijital bir teknoloji olarak belirli bir süre boyunca ışık renklerini ve ışık seviyelerini manipüle etmek mümkündür (DFI, 2014).

Dünya genelinde yönelim; tıpkı diğer teknolojilerde olduğu gibi aydınlatma armatürlerinde de daha dayanıklı, daha uzun ömürlü, enerji tasarruflu ve bakım gerektirmeyen, çok düşük sıcaklık ve düşük ışık kirliliğine sahip LED aydınlatma sistemlerine doğru kaymaktadır (Yılmaz vd., 2019).

Ülkemizde sokak aydınlatmalarında LED'e geçiş 2018 yılında açıklanan Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı'na dahil edilmiştir. Bu plan dahilinde Türkiye'deki 7.5 milyon sokak lambasının %30'unun yaklaşık 2.25 milyon sokak lambasının 2023 yılına kadar değiştirilmesi öngörülmüştür (Öztoprak, 2018).

LED'li sokak armatürleri bir çok yönden fayda sağlamaktadır. Enerji tüketimi, lamba tasarım maliyeti, bakım-onarım bedeli göz önüne alınarak fayda maliyet analizi yapıldığında faydanın bugünkü değerinin maliyetin bugünkü değerinden daha büyük olduğu sonucuna ulaşılmıştır. LED'li tasarımların geleneksel aydınlatma ekipmanlarına göre daha kabul edilebilir olması onay görmüştür (Yılmaz vd., 2019).

LED aydınlatma sistemlerinin bazı dezavantajları vardır. Bunlar ilk sermaye maliyeti ve eklem bölgesi sıcaklığıdır. İlk sermaye maliyeti bakımından lümen başına fiyatın bir ölçüsü olarak LED'ler diğer aydınlatma sistemlerinden daha pahalıdır. LED performansı büyük ölçüde ortam sıcaklığına bağlıdır. LED paketinin aşırı ısınması cihaz arızasına yol açabilir (Lim vd., 2011).

Enerji tasarrufu sağlamak adına kaliteli aydınlatma oluşturmada aşağıdaki yollar izlenebilir;

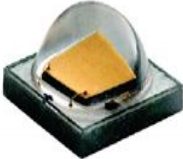
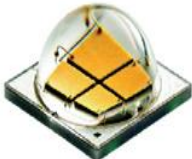
- Uluslararası standartlara uyulmalı,
- Armatür sayısı, tipi ve kullanılacak ekipmanların maliyeti asgari olmalı,
- Aydınlatma, gerek duyulan zamanda gerektiği kadar kullanılmalıdır.

1.7 Aydınlatmada Kullanılan LED Türleri

Mantar LED (T1): Elektronik devrelerde, LED tabela ve ekranlarda halen en sık kullanılan çeşittir. Şapka şekline ve büyüklüğüne göre çeşitli açılarda ışık yayar.

Yüzeye monte cihaz (SMD): PCB üzerine monte edilmeye hazır halde bulunan tekil LED çipe verilen addır. SMD LED'lerde aktif ışık saçan çipler bulunur. Çok küçük alanlarda (mm^2) yüksek ışık üretebilmektedir. Gösterge ve sinyal amaçlı aydınlatmalarda, dekoratif aydınlatmalarda, şerit LED'lerde ve projektörlerde sıkça kullanılmaktadırlar.

Yüksek Güçlü (Power) LED: Yüksek güçlü LED genellikle tek yonga boyutu $1\text{mm} \times 1\text{mm}$ 'den az olmayan ve sürücü akımı en az 350 mA olan LED modülünü ifade eder. Ancak, bazı durumlarda bu akım 100 mA'ya kadar tercih edilebilir. Yüksek güçlü LED'lerin icadıyla ısı dağıtımı sorunu daha ciddi hale gelmiştir. Çipin ısısı ortama hızlı bir şekilde iletilemezse yonganın bağlantı sıcaklığı hızla yükselecektir. Aşırı yüksek sıcaklık çipin aktif katmanında electron-boşluk rekombinasyon verimliliğinde büyük bir düşüşe yol açabilir ve dahili kuantum verimliliğini etkileyebilir. Ayrıca, çip ile kılavuz çerçeve arasındaki termal genleşme katsayısının uyumsuzluğu çipin iç geriliminde önemli bir artışa yol açabilir (Liu ve Luo, 2011). Piyasada yaygın olarak bulunan LED çip türleri Şekil 1.21'de gösterilmiştir.

T1	Yüzeye Monte (SMD)	Yüksek Güçlü	Çoklu Çipli	COB (Chip on Board)
				

Şekil 1.21. LED çip türleri (Pelsan, 2019).

COB: Bir PCB üzerine dizilmiş birden fazla LED çipine denir (Şekil 1.22). Düşük maliyet ve yüksek verimlilik sebebiyle günümüzde en çok tercih edilen aydınlatma ürünlerinden biridir (Ge vd., 2017).



Şekil 1. 22. Cree® XLamp® CXA1830 COB LED (URL-6).

1.8 LED Yol Aydınlatma Sistemleri Nedir, Nelerden Oluşur?

LED sokak armatürü mekanik, termal, elektronik, yarı iletken ve optik bileşenlerin bir kombinasyonudur. Bu nedenle en önemli özelliği aydınlatma mühendisliği ile ilgili olmasıdır. Tasarım sürecinin sonunda bir aydınlatma ürünü olarak armatür ortaya çıkmaktadır. Sürecin başlangıcında tasarımcılar ve ürün yöneticileri armatürlerin ne tür sokaklar için geliştirilmesi gerektiğini tanımlamalıdır (Khan vd., 2015).

Şekil 1.23’de sokak aydınlatması için LED karakterizasyonu ve seçiminin özellikleri gösterilmiştir.



Şekil 1.23. Sokak aydınlatması için LED karakterizasyonu ve seçiminin özellikleri (Khan vd., 2015).

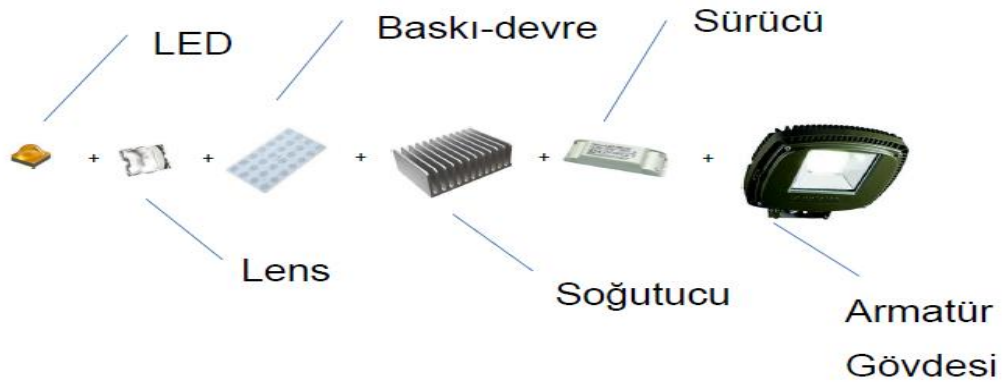
LED yol aydınlatma sisteminin temel parçaları geleneksel yol aydınlatmasına benzer. Her iki sistem de direk, kablolar ve ışık kaynağı barındıran armatürlere sahiptir. Bir veya daha fazla ışık kaynağı ve gerekli parçaları barındıran aydınlatma ekipmanına armatür denir. Ancak geleneksel aydınlatma teknolojileri tek bir ışık kaynağı içerirken, LED sokak aydınlatma ünitesi armatürü, bir dizide düzenlenmiş çoklu LED çipleriyle başlayan optik ile birlikte ısı yönetimi ve tümü yüksek basınçlı alüminyum döküm ve cam kapaklarla kapatılmış bir sürücüden oluşmaktadır (DFI, 2014).

Armatür, toz ve su girişine karşı etkili korumanın yanı sıra ısı yönetiminden de sorumludur. Armatürün yapısı Şekil 1.24’de gösterilmiş ve aşağıda açıklanmıştır.

Termal: LED kaynakları iletim yoluyla ısı üretir. Isı dağıtımı; lümen bakımı, ışık çıkışı, ışık rengi, ışık kalitesi ve kullanım ömrü gibi faktörleri olumsuz etkilediği için önemlidir.

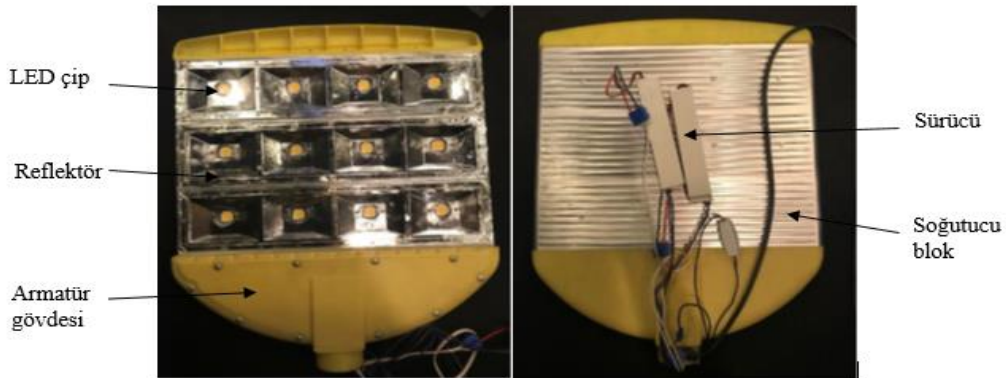
Sürücü: LED'lere doğru miktarda akım sağlar ve toplam sistem güvenilirliğinin önemli bir parçasıdır. Sabit bir akım akışı sağlamanın yanı sıra sürücü, loşlaştırma ve sensör arabirimi gibi bilgilerden sorumludur. Alternatif akımı doğru akıma çeviren devre elemanıdır (TEDAŞ, 2010).

Fikstür (tesisat): Direk ve iç kablolar gibi mekanik bileşenler armatürü tamamlar ve armatürü elektrik sağlayan yer altı kablolarına bağlar.



Şekil 1.24. LED armatür elemanları (Onaygil, 2016).

Şekil 1.25’de LED’li armatür tasarımına ait bir örnek verilmiştir. Armatür; LED çip, reflektör, armatür gövdesi, sürücü ve soğutucu bloktan oluşmaktadır. LED çipleri genelde DC ile çalıştıklarından dolayı mevcut şebekeden gelen AC akıma dönüştürülmesi için sürücüye ihtiyaç duyarlar. Sürücülerin ikinci bir görevi her LED'e ihtiyaç duyulan nominal akımı ulaştırmaktır. LED sürücüler genelde sabit akım verecek şekilde ayarlanır ve standart olarak 350 mA, 500 mA, 700 mA, 1050 mA gibi akım değerlerinde üretilirler. LED sürücülerinin verimi şebekeden çektikleri akım değeri düştükçe azalmaktadır (Pelsan, 2019).



Şekil 1.25. LED’li armatür tasarımına ait bir örnek, ön yüz (sol) ve arka yüz (sağ).

1.9 LED Işık Kaynaklarının Üstünlükleri

LED’ler yönlü ışık kaynağı olduğundan dolayı ışık kirliliğinin de azaltılmasına yardımcı olabilmektedirler. LED’ler uzun ömürlü olsa da bir sistem içerisine dahil edildiklerinde giriş gerilimi, sürüş akımı, sıcaklık gibi etkenler nedeniyle ömürlerinde düşüş olabilir. Üreticiler de ürünlerin kullanım ömrü ve garanti süresini

belirlerken bu gibi etkenleri göz önüne almaktadırlar. Sokak aydınlatması dönüşümünde üretici firmalardan daha uzun garanti süreleri talep edilebilir. Bu sayede sağlanacak fayda ve fayda maliyet oranı da artırılmış olacaktır. Diğer bir taraftan LED sokak armatürlerinin kullanım sürelerini uzatmak için endüstri genelinde bir standardizasyon çalışması yapılabilir. LED modülleri ve elektronik kontrol tertibatı için standart bir arayüz oluşturulursa aydınlatma armatürlerinin içerisinde kullanılan bileşenlerin tam değişebilirliği sağlanabilir. Bu sayede bir üretici tarafından sağlanan armatür içerisindeki LED modül veya LED sürücü arızalandığında başka bir üretici tarafından sağlanan parçalar ile onarımı yapılabilir. Bu yöntemle LED'leri dış etkenlerden koruyan ve çalışması için gerekli koşulları sağlayan armatür gövdesi uzun yıllar boyunca kullanılabilir (Yılmaz vd., 2019).

LED'li yol aydınlatma armatürlerinin en belirgin üstünlüğü geleneksel aydınlatma ekipmanlarından farklı olarak gelişmiş kontrol sistemleri ve ek ünitelere ihtiyaç duymadan verimli bir şekilde çalışabilmeleridir. LED ışık kaynakları geleneksel aydınlatma kaynakları ile kıyaslandığında 100.000 saate kadar çıkabilen oldukça uzun ömür, yüksek dayanıklılık, bakım gerektirmeme, düşük güç tüketimi ve çevre dostu olma gibi avantajlara sahiptir. Fakat onları tamamen eşsiz kılan özellik renk üretme yetenekleridir (Dinçer ve Tazebay, 2011). LED'ler geleneksel sistemlerde olduğu gibi ışık rengini değiştirmek için renk filtresine gerek duymazlar. LED ile görülebilir renk spektrumundaki neredeyse bütün renkler elde edilebilir. Bu durum kurulum maliyetini biraz aşağı çekebilir. LED'lerin küçük boyutlu olması da avantaj sağlamaktadır. Standart tip LED'ler 5 mm boyutundadır. Tek bir çipin boyutu 2 mm²'den daha küçük de olabilir bu sayede PCB üzerine kolaylıkla monte edilebilirler. Bu özellikleriyle LED'ler kompakt armatür tasarımına olanak sağlamaktadırlar.

Cam, flaman gibi kırılgan elemanlar bulundurmadıkları için şoka ve titreşime dayanıklıdırlar. Temelde elektronik devre elemanı olan LED ışık kaynaklarının elektronik kontrol sistemleriyle uyum içinde kullanılması farklı sonuçların ortaya çıkmasını sağlar. Doğru projeyle uygulandığında LED'lerin ilk satın alma maliyetleri biraz yüksek olsa da, orta ve uzun vadede geleneksel aydınlatma sistemlerine göre daha ekonomik olmaktadır. LED'ler 200 ns içinde ışık vermeye başlar ve bu hızları geleneksel ışık kaynakları ile kıyaslanamaz üstünlüktedir. Tüm bunlarla birlikte

LED'lerin yüksek parlaklık, yüksek kontrast, kolay kurulum, düşük ısı yayılımı ve düşük güç tüketimi gibi pek çok avantajları vardır.

LED ışık kaynağından çıkan ışının yaklaşık %20'si ışık ve %80'i ısı olarak yayıldığı için LED'li armatürlerde termal analiz problemleri ortaya çıkmıştır. Isıl problemler LED'li armatürleri oldukça olumsuz etkilemiştir. LED'li armatürlerde ısıl problemlerin azaltılmasına yönelik geliştirilen malzemelerin kullanımı armatür ağırlığının artmasına neden olabilmektedir. LED'lerdeki yüksek parlaklık kamaşmaya neden olabilir. Bu gibi durumlar ise LED kullanımı için dezavantaj oluşturmaktadır.

LED'ler eşik değeri denilen bir gerilim ve akım değerinde beslenmelidir. Bu değer seri dirençler ve akım regülatörlü güç kaynakları ile sağlanabilir. Soğuk beyaz ışıklı LED'lerin çoğu güneş ışınlarından yayılan ya da akkor telli lambadan yayılan ışınlardan farklı bir siyah cisim radyasyonundadır. 460 nm ve 500 nm dalga boylarında nesneler güneş ışığı altında ya da akkor telli lamba ışığı altında görüldüğünden farklı görünürler.

Tüm bunların yanında LED'li yol aydınlatmalarının tasarım ve üretiminde tecrübe eksikliği, LED'in benimsenmesine ilişkin zorluklar, yanlış ölçüm yöntemleri ve uluslararası standart eksikliği de LED'li aydınlatmalar için dezavantaj olabilmektedir.

2. KAYNAK ÖZETİ

Reflektörün görevinin LED ışık kaynağından çıkan ışıkları yüksek bir verimle ve doğru açılarla yansıtarak merceğe iletmek ve merceğin görevinin reflektörden yansıyan ve LED ışık kaynağından doğrudan gelen ışıkları aydınlatılmak istenen bölgeye homojen ve kayıpsız bir şekilde iletmek olduğuna göre armatür verimliliğini etkileyen en önemli faktörün bölge dışına saçılan ışıklar olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla LED ışık kaynağından çıkan ışıkların yüksek bir verimle aydınlatılacak bölgeye homojen bir şekilde iletilmesini sağlayacak optik tasarım faaliyetleri armatür etkinlik faktörünü önemli derecede etkileyecektir. Akademik ve ticari geliştirme çalışmaları daha çok merceğin kalitesi, merceğin optik tasarımı ve merceğin malzemesi üzerine yoğunlaşmıştır. Neredeyse bütün armatür üreticisi firmalar aynı LED üreticisi firmaların ürünlerini kullandığından rekabet ve farklılıklar daha çok mercek ve reflektör geliştirme çalışmalarında ortaya çıkmaktadır. Bu sebeple armatür Ar-Ge çalışmaları mercek ve reflektör kalitesinin iyileştirilmesi faaliyetleri üzerinde yoğunlaşmıştır.

Fiziğin alt dalı olan optik ışık dağılımını kontrol eder. Özel olarak tasarlanmış mercek sistemleri direkler arasında maksimum boşluk bırakmaya müsade eden ve yüksek yol genişliğini kapsayan iç ve dış profilde benzersiz olmalıdır. Optik sistemler olası bir LED arızası durumunda yeterli parlaklık ve aydınlık bütünlüğünü sağlamak için çoklu katmanlar halinde düzenlenmelidir (DFI, 2014). Literatürde en az gider ile enerjiyi en verimli şekilde kullanarak yol üzerinde güvenliği ve görünürlüğü artırmak için uyulması ve uygulanması gereken standartlara yer verilmiştir.

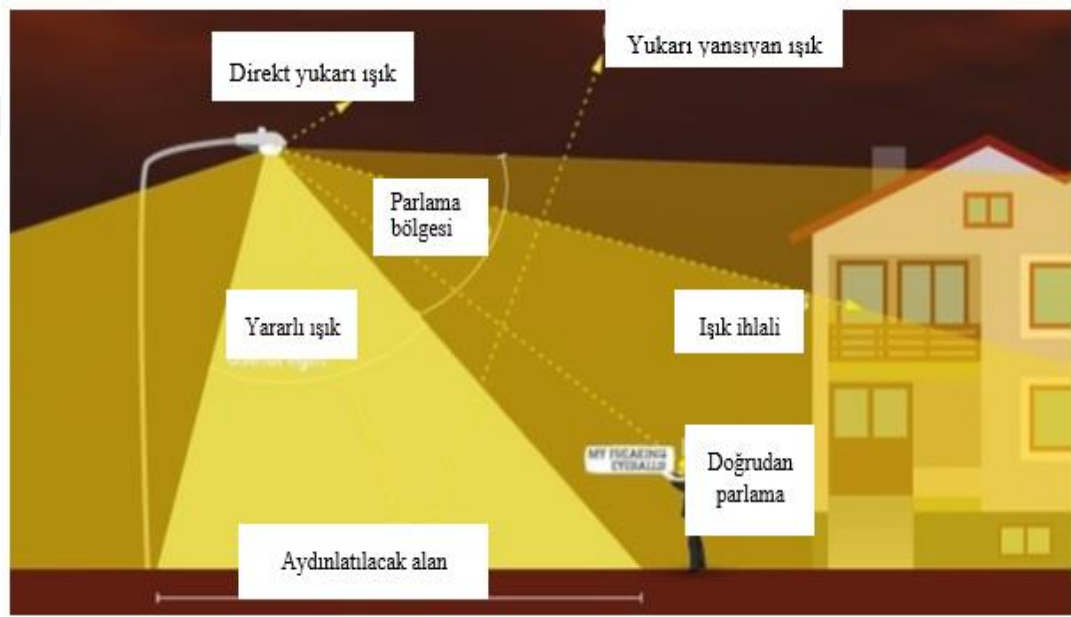
2.1 Yol Aydınlatması

Aydınlatma; nesnelere, çevrelere, küçük ya da büyük alanlara görülebilmeleri için ışık uygulamaktır. 1913 yılında kurulmuş olan ve bugün kendi alanında tam yetkili kuruluş olan CIE'nin eski ve güncel kayıtlarında da aydınlatma bu şekilde tanımlanmıştır (İSO, 2019).

Aydınlatma ekonomi, sağlık ve güvenlik gibi alanlarda etkili olduğu için aydınlatmada kullanılan teknikler oldukça önemlidir. Aydınlatmada amaç yeterince ışık yakarak karanlıktan kurtulmak ya da renkli ışıklarla çevreyi süsleyerek görsel

algı oluşturmak değil, daha az enerji tüketerek kaliteli aydınlatmayı sağlamak olmalıdır.

Şekil 2.1’de ışık kirliliğinin farklı bileşenlerinin basit bir sınıflandırması şematik olarak gösterilmiştir. Yapay iç mekan veya dış mekan ışığı kullanıldığında istenmeyen aydınlatma ışık kirliliği yaratabilir. Işık kirliliğinde ışık ihlali ve parlama gibi faktörler vardır. Işık ihlalde istenmeyen ışık amaçlanmadığı yere girer. Parlama olayı ise rahatsızlığa neden olan aşırı parlaklık, aşırı aydınlatma durumudur (Yadav, 2018).



Şekil 2.1. Işık kirliliğinin farklı bileşenlerini gösteren görüntü (Yadav, 2018).

Yol aydınlatması sürücüler ve yayalar için gece emniyet ve güvenliği sağlama hususunda hükümetler tarafından sunulan temel bir hizmettir. Bu hizmete hem kentsel hem kırsal bölgelerden gelen talep her geçen gün artmaktadır. Ancak artan enerji maliyeti, kısıtlanmış bütçeler ve genel elektrik talebinde meydana gelen hızlı büyüme, yetkililerin aydınlatmanın en uygun maliyetli şekilde nasıl sağlanabileceğini yeniden düşünmelerini zorunlu kılmaktadır (DFI, 2014).

Aydınlatma küresel elektrik tüketiminin yaklaşık %20’sini oluşturmaktadır. Yol aydınlatmalarının önemli bir kısmı kentin yıllık elektrik faturasının %40’ına kadar katkıda bulunabileceği alanlar olan şehirlerde ve kentlerde yoğunlaşmıştır. Şehirler şuanda küresel enerji tüketiminin üçte ikisinden fazlasını oluşturmaktadır. Şehirlerde

enerji talebinin 2030'a kadar neredeyse %60 oranında artması beklenmektedir (DFI, 2014). Eski yol aydınlatma yöntemlerinin enerji verimli teknolojilerle değiştirilmesi zorunluluğu artık göz ardı edilemez durumdadır. Şehirlerde yol aydınlatmaları araç ve yaya trafiği güvenliği için son derece önemlidir.

Yol aydınlatmasının amacı hiç kimsenin konforunu bozmadan yol üzerindeki insanları, araçları ve nesneleri görünür kılmaktır. Sokak ışıkları nesneler arasında kontrastı sağlamak ve renk ayrımı sağlamak için iyi kalitede ışık üretmelidir. 20. yüzyılın başlarından beri aydınlatma teknolojisindeki verimlilik artmasına rağmen; sokak, park ve kamusal alanlar gibi dış mekan kamu aydınlatma sistemleri hala hükümetlerin toplam elektrik tüketiminin neredeyse %40'ını oluşturmaktadır. Dünya genelinde enerji tüketiminin önemli bileşenini sokak aydınlatmaları oluşturmaktadır (Yawale vd., 2016).

Karayolu aydınlatmasındaki temel amaç bir model sunmak ve yatay kaldırım parlaklığı seviyesi ile nesnelerin yatay ve düşey aydınlığını sağlamaktır. Bir sürücünün gözleri nesnelerin parlaklığı arasındaki kontrastdan dolayı nesneyi ayırt eder. Parlama ve gölgeler vasıtasıyla kara yolu üzerinde veya yanındaki nesneler ayırt edilebilir. Aydınlatma tasarımı gelişmiş görüş alanı ve emniyeti sağlamanın yanı sıra minimum enerji gideri ile maksimum verimlilik sunmakta olan aydınlatma ekipmanının yeri ve seçimi ile ilgilenir.

Aydınlatma tasarımında aydınlatma ve parlaklık ön plana çıkmaktadır. Aydınlatma kavramı ile belirli bir aydınlatma seviyesi ve dağılımda homojenlik sağlayarak tatmin edici görünürlük elde edilebilmektedir. Parlaklıkta ise kaldırım ve kaldırım üzerindeki nesnelerin görünürlüğü sağlanır. Parlaklık kavramı ile kaldırım yüzeylerinin yansıtıcılığının ve sürücünün görüş alanı içindeki nesnelerin hesaplanması zordur (Nuttall vd., 2008).

Aydınlatmada enerji tasarrufu yüksek verimli ışık kaynakları ve armatürler kullanarak aydınlatma ve görme kalitesini düşürmeden yapılmalıdır. Daha verimli aydınlatma ekipmanları kullanılarak daha az enerji tüketimi sağlanmış olur.

2.2 LED’li Yol Aydınlatmasının Avantajları

LED’li yol aydınlatma çözümleri konvansiyonel aydınlatmada mümkün olmayan önemli avantajlar ve seçenekler sunmaktadır. Bazı faydalar tüm LED aydınlatma uygulamaları için geçerli iken bir kısmı ise LED’li yol aydınlatmalarına özeldir. LED’ler aydınlatma teknolojisinin gelişiminde analogdan dijitale kayan aydınlatma çözümlerinde bir sonraki aşamayı temsil eder. Şekil 2.2’de ışığın israf seviyeleri gösterilmiştir. LED’ler optimum düzeyde ışık yayarak ışık israfına engel olmaktadır. LED’ler tarafından sunulan teknik avantajlar şunlardır (Czyżewski ve Fryc, 2020; Duman ve Güler, 2019; Juntunen vd., 2015);

- Yüksek lümen etkinliği,
- Yönlülük ve azaltılmış ışık kirliliği,
- Uzun ömür,
- Üstün ışık kalitesi,
- Genişletilmiş kontrol edilebilirlik,
- Dayanıklılık,
- Estetik olması,
- Ekonomik faydalar,
- Düşük kullanım ömrü maliyeti,
- Gelir üretimi,
- Enerji sektörü değer zinciri boyunca tasarruf,
- Yol güvenliği,
- Enerji tasarrufu, çevresel faydalar,
- Daha iyi vatandaş güvenliği ve yaşanabilir şehirler.



Şekil 2.2. Işık kirliliği seviyesi (DFI, 2014).

Geleneksel teknolojiler temel aydınlatma faktörlerini karşılar iken LED'ler daha iyi seviyelerde ve ışığın göze daha hoş gelmesini sağlayacak nitelikte karşılamaktadır. Şekil 2.3 ve Şekil 2.4'de bu durum gösterilmiştir.



Şekil 2.3. YBSB (sol) ve LED'in (sağ) karşılaştırılması.



Şekil 2.4. Renk dönüşüm endeksi; doğal ışık altında yol görünümü (sol), YBSB (orta) ve LED (sağ) (DFI, 2014).

LED yol aydınlatmasının benimsenmesine ilişkin zorluklar;

- Sınırlı siyasi irade,
- Farkındalık eksikliği,
- Dağıtılmış müşteri tabanı,
- Yatırımları sınırlayan sahiplik uyumsuzluğu,
- Görevdeki imtiyaz sahipleri,
- Erken pilot deneme başarısızlığı,
- Finansman eksikliği,
- Küresel olarak kabul edilen uluslararası standartların eksikliği (Yawale vd., 2016).

2.3 Motorlu Trafikte Kullanılan Aydınlatma Sınıfları (M Sınıfı)

M aydınlatma sınıfları motorlu araçlar tarafından kullanımı öngörülen yollar için belirlenmiştir. Yollar M1 ile M6 arasında sınıflandırılmıştır. Bu sınıfların belirlenmesinde yolun bulunduğu mahal, yolun geometrisi, farklı seviyelerdeki sürüş hızları, trafik yoğunluğu, şerit sayısı, çevresel şartlar, hava koşulları, yol yüzeyi türü gibi bir dizi tanımlayıcı özellik dikkate alınmaktadır (CIE, 2010). M1 ve M2 aydınlatma sınıfları, M sınıfı yollar içerisinde en yüksek önem derecesine sahip olan yollardır (TEDAŞ, 2010). Çizelge 2.1 ve Çizelge 2.2’de M aydınlatma sınıflarının belirlenmesine ilişkin kriterler belirtilmiştir.

Çizelge 2.1. M aydınlatma sınıflarının belirlenmesi - a (TEDAŞ, 2010).

Şehir bağlantı ve çevre yolları	TAŞIT YOLU VE HIZ SINIRI		TRAFİK YOĞUNLUĞU				ZİHİNSEL İŞ YÜKÜ		AYDINLATMA SINIFI	
	Taşıt yolu		Hız	Oluşum		Hacim		Kavşak Yoğunluğu, Park etmiş araçlar, Yolun Sürüş Zorluğu		Yol aydınlatma sınıfı
	Tekli	Bölünmüş	km/saat	Yalnızca motorlu	Karışık trafik	Düşük-Orta (≤ %60)	Yüksek (> %60)	Yüksek	Düşük	
Şehir bağlantı yolları, çevreyolları ve Otoyol		•	≤120	•			•	•		M1
									•	M2
		•	≤120	•		•		•		M2
									•	M2
Şehirlerarası ana yol	•		≤90		•		•	•		M1
									•	M2
	•		≤90		•	•		•		M2
									•	M3

Çizelge 2.2. M aydınlatma sınıflarının belirlenmesi-b (TEDAŞ, 2010).

Şehir içi/ Meskûn Mahal Yollar	TAŞIT YOLU VE HIZ SINIRI		TRAFİK YOĞUNLUĞU				ZİHİNSEL İŞ YÜKÜ	ORTAM PARILTISI		AYDINLATMA A SINIFI	
	Taşıt yolu		Hız	Oluşum		Hacim		Kavşak Yoğunluğu, park etmiş araçlar, Yolun sürüş zorluğu	Mağaza vitrinleri, reklam panoları, spor sahaları vb. gibi çevre ışıkları		Yol aydınlatma sınıfı
	Tekli	Bölünmüş	km/saat	Yalnızca Motorlu	Karışık Trafik	Düşük-Orta (≤ %60)	Yüksek (> %60)	Yüksek	Yüksek	Düşük	
Şehir içi Ana yol, Bulvar		•	≤90	•			•	•	•		M1
										•	M2
		•		•		•		•	•		M2
										•	M3
Şehir içi Cadde		•	≤70		•		•	•	•		M2
										•	M3
		•		•	•		•	•			M3
									•		M4
Şehir içi tali yol Cadde, Sokak	•		≤50		•		•	•	•		M3
										•	M4
	•			•	•		•	•	•		M4
										•	M5

2.4 Yol Aydınlatma Seviyeleri İçin Endüstri Standartları

Aydınlatma faktörlerinin doğru seviyeleri uluslararası kabul görmüş standartlar tarafından belirlenir. Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş. Strateji Geliştirme Daire Başkanlığı tarafından yayınlanan ‘TEDAŞ-MLZ/2010-057.C LED Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi’nde M1-M6 sınıfları arasında değişen aydınlatma kriterleri Çizelge 2.3’de verilmektedir. Yol aydınlatma amaçlı kullanılacak olan armatürlerin bu teknik şartnameye uygunluğu önem arz etmektedir (TEDAŞ, 2010).

Çizelge 2.3. M aydınlatma sınıfı kriterleri (TEDAŞ, 2010).

Yol aydınlatma sınıfı	*Kuru yol yüzeyi şartlarında taşıt yol yüzeyinin parlıtısı			Eşik artışı (kamaşma sınırlaması)	Kenar aydınlık düzeyi oranı
	L** (sürekli sağlanması gereken en küçük ortalama değer) cd/m ²	U _o (en küçük değer)	U _l (en küçük değer)	F _{TI} (en büyük değer) %	R _{EI} (en küçük değer) %
M1	2.00	0.40	0.70	10	0.35
M2	1.50	0.40	0.70	10	0.35
M3	1.00	0.40	0.60	15	0.30
M4	0.75	0.40	0.60	15	0.30
M5	0.50	0.35	0.40	15	0.30
M6	0.30	0.35	0.40	20	0.30

*Aydınlatma sınıfı kriterleri kuru yol yüzeyi şartlarına göre seçilmiştir.

**Ortalama yol parlıtı düzeyinin değeri tabloda verilen en küçük değerin en fazla 1.2 katı olacaktır.

L**: Yolun ortalama parlıtısı,

U_o: Ortalama düzgünlük ($U_o = L_{\min}/L_{ort}$),

U_l: Boyuna düzgünlük ($U_l = L_{\min}/L_{maks}$),

F_{TI}: Bağlı eşik artışı ($F_{TI} = \{\Delta L_k - \Delta L_e\} / \Delta L_e$),

R_{EI}: Kenar aydınlık düzeyi oranı-çevreleme oranı ($R_{EI} = E_2/E_1$).

Genel olarak iyi bir düzgünlük yol üzerindeki tüm noktaları yeterli şekilde görebilmeyi garanti eder.

Ortalama parlıtı düzgünlüğü (U_o); ortalama yol aydınlığı için minimum orandır.

Boyuna parlıtı düzgünlüğü (U_l); her bir şeridin orta çizgisinde ölçülen minimum yol aydınlatmasının maksimum yol aydınlatmasına en düşük oranıdır (Şekil 2.5).



Şekil 2.5. Boyuna düzgünlük değeri; (sol) $U_1 = 0.4$ ve (sağ) $U_1 = 0.7$

Bağıl eşik artışı (F_{TI}); yol aydınlatma montajında armatürün yetersiz parıltısının neden olduğu görüş kaybını ifade etmek için bir ölçüdür T_1 [CEN, 2003a] ve parıltı şartları altında nesneleri görünür yapmak için gerekli olan ekstra kontrast miktarını ifade eder (Yawale vd., 2016).

Kenar aydınlık düzeyi oranı (R_{EI}); yolun kaldırım tarafının solunda ve sağındaki 5'er metrelik şeritlerin aydınlık düzeyleri oranıdır (Şekil 2.6).



Şekil 2.6. Kenar aydınlık düzeyi oranı.

Lamba Lümen Bakım Faktörü (LLMF): Armatürün belirtilen süre sonundaki ışık akısının başlangıç ışık akısına oranı olarak tanımlanır. LED'li armatürler için bu değer 0,90 alınmaktadır (TEDAŞ, 2010).

Lamba Canlılık Faktörü (LSF): Armatürün belirtilen süre içerisinde hayatta kalma oranının yüzde olarak tanımlanmasıdır. Lamba Canlılık Faktörü 1,00 olarak alınmaktadır (TEDAŞ, 2010).

Armatür Bakım Faktörü (LMF): Armatürün kirlenmeye karşı koruma sınıfına (IP) ve aydınlatma tesisinin bulunduğu yerin kirlilik derecesine bağlı olarak tanımlanan değerdir. Kullanılacak armatürlerin 2 yılda bir bakımının yapılabilirliği ve koruma sınıflarının IP6X olması nedeni ile ülkemiz çevresel şartları dikkate alınarak belirlenen orta kirlilikte Armatür Bakım Faktörü 0.89 alınmaktadır.

$$MF = LLMF \times LSF \times LMF$$

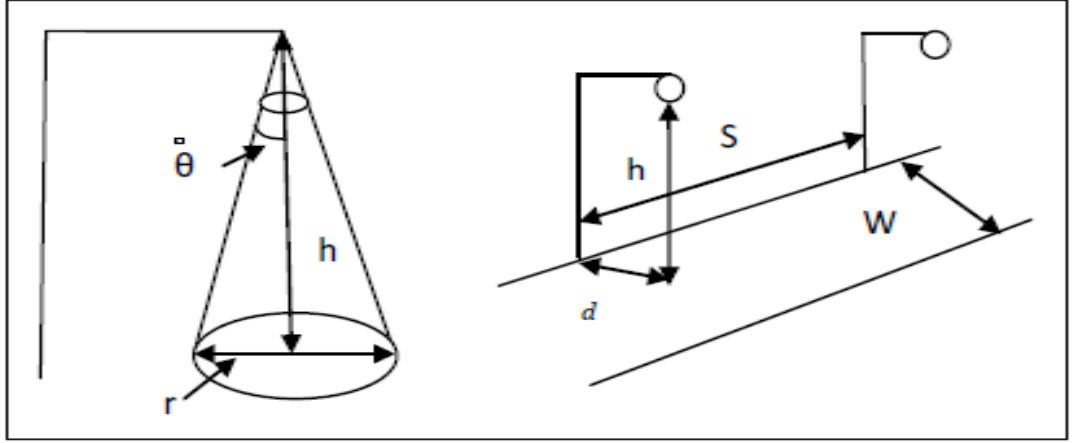
$$MF = 0.90 \times 1.00 \times 0.89 = 0.80$$

LED'li armatürler için bakım faktörü 0.80 alınmaktadır (TEDAŞ, 2010).

2.5 Yol Aydınlatma Tasarımı

Motorlu trafik için aydınlatmanın temel amacı sürücünün; görsel performans, görsel konfor ve uyanıklığını artırmaktır. Sokak aydınlatmasında temel amaç bir model sunmak ve yatay kaldırım parlaklığı seviyesi ile yatay-düşey aydınlığı sağlamaktır. Sokak armatürlerinin performansını ve görsel algının kalitesini belirlemede birkaç faktör vardır bunlar (Yawale vd., 2016);

- Lambanın ilk lümeni,
- Yol yüzeyinin yapısı,
- Renk oluşturma yeteneği,
- Maksimum, minimum ve ortalama lümen arasındaki oran,
- Homojen ışık dağılımı,
- Armatürün kesme açısı,
- Montaj direğinin yüksekliği; doğru aydınlatma yoğunluğu için ideal direk yüksekliği önemlidir. Montaj direğinin yüksekliği arttıkça ışık izi artar fakat ışık yoğunluğu azalır.
- İki direk arasındaki mesafe; ideal direk ayırımı yol yüzeyinin düzgün aydınlatılması için önemlidir (Şekil 2.7).



Şekil 2.7. Yol aydınlatması temel modeli (Yawale vd., 2016).

S: direkler arası uzaklık (m)

W: şerit genişliği (m)

h: ışık yüksekliği (m)

d: enine doğrultuda hesap noktaları arası mesafe (m)

r: aydınlık yüzeyi yarıçapı (m)

Θ: yüzeyi aydınlatan ışığın düşeyle yaptığı açı (derece)

Günümüz koşullarında yol aydınlatması tasarım kriterlerinin belirlenmesinde CIE'nin önerileri ve Avrupa Birliği Standartları (CEN) esas alınmaktadır. CIE 115-1995 nolu yayında yol aydınlatma sınıfları trafik kontrolü, yolun karmaşıklığı ve kullanıcı tiplerine göre belirlenmiştir (CIE, 1995). CR 13201-1 nolu yayında bu sınıflandırmalar yoldan geçen araç sayısı, kavşak yonca benzeri yol ayırım sıklıkları, suç oranları, park etmiş araçlar gibi parametreler dikkate alınarak daha detaylı bir şekilde yapılmaktadır (CR 13201-1, 2002). Söz konusu uluslararası çalışmalarda yapılan önerilerin her ülkenin kendi coğrafik, iklimsel, kültürel ve ekonomik koşulları dikkate alınarak uygulanması gerektiği de ifade edilmektedir. Yol aydınlatma problemlerinde yollar sınıflara ayrılmış olup aydınlatma bu sınıflara göre değişebilmektedir.

2.5.1 Yol aydınlatma tesisat biçimleri (armatür sınıfları)

Yol aydınlatma tesisatları yolun standartlara uygun olarak aydınlatılması amacıyla yolun durumuna ve sınıfına göre dikkate alınan; armatür direkleri, armatürler, kablolama ve kontrol elemanlarından oluşan sistemlerdir. Yol aydınlatma tesisatları aydınlatma sınıfına ve yolun geometrik şartlarına göre farklı sınıflara ayrılmıştır. Türkiye’de yol aydınlatma tesisatlarının kurulmasından sorumlu kurum TEDAŞ’dır. Son revizyonu Mart 2019’da yapılan ‘TEDAŞ-MLZ/2010-057.C’ teknik şartnamesinde yol aydınlatma sınıflarına göre olması gereken aydınlatma tesisat biçimleri Çizelge 2.4’de verilmektedir.



Çizelge 2.4. Armatür sınıfları (TEDAŞ, 2010).

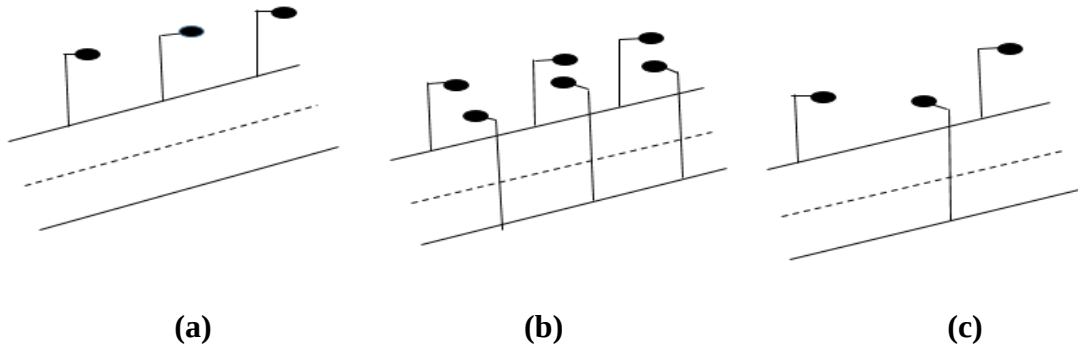
Armatür sınıfı	Aydınlatma düzenekleri	Yol aydınlatma sınıfı	Şerit sayısı	Şerit genişliği (m)	Sarkma (m)	Direk boyu (m)	Refüj genişliği maks (m)	Bakım faktörü	Yol yüzeyi sınıfı	Minimum direk açıklığı (m)	Maksimum LED performans kriteri (W/km)
Sınıf 1	Refüjden veya Karşılıklı veya Kaydırılmış	M1	2*4	3.5	0 ila +2	14-12	3	0.80	R3	40	12500
Sınıf 2	Refüjden veya Karşılıklı veya Kaydırılmış	M1	2*3	3.5	0 ila +2	14-12	3	0.80	R3	40	10200
Sınıf 3	Refüjden veya Karşılıklı veya Kaydırılmış	M1	2*2	3.5	0 ila +2	12-10	3	0.80	R3	40	7600
Sınıf 4	Refüjden veya Karşılıklı veya Kaydırılmış	M2	2*4	3.5	0 ila +2	12-10	3	0.80	R3	40	10400
Sınıf 5	Refüjden veya Karşılıklı veya Kaydırılmış	M2	2*3	3.5	0 ila +2	12-10	3	0.80	R3	40	7600
Sınıf 6	Refüjden veya Karşılıklı veya Kaydırılmış	M2	2*2	3.5	0 ila +2	12-10	-	0.80	R3	40	5700
Sınıf 7	Sağ/Sol Tek taraflı	M2	3	3.5	0 ila +2	12-10	3	0.80	R3	40	4400
Sınıf 8	Refüjden veya Karşılıklı veya Kaydırılmış	M3	2*4	3.5	0 ila +1	12-10	3	0.80	R3	40	6600
Sınıf 9	Refüjden veya Karşılıklı veya Kaydırılmış	M3	2*3	3.5	0 ila +1	12-10	3	0.80	R3	40	5200
Sınıf 10	Refüjden veya Karşılıklı veya Kaydırılmış	M3	2*2	3.5	0 ila +1	12-10	-	0.80	R3	40	4000
Sınıf 11	Sağ/Sol Tek taraflı	M3	3	3.5	0 ila +1	10	-	0.80	R3	38	3600
Sınıf 12	Karşılıklı veya Kaydırılmış	M4	4	3.5	0 ila +1	10	-	0.80	R3	40	2900
Sınıf 13	Sağ/Sol Tek taraflı	M4	3	3.5	0 ila +1	10	-	0.80	R3	38	2700
Sınıf 14	Sağ/Sol Tek taraflı	M4	2	3.5	0 ila +1	10-8	-	0.80	R3	38	2300
Sınıf 15	Sağ/Sol Tek taraflı	M5	2	3.5	0 ila +1	8	-	0.80	R3	36	1650
Sınıf 16	Sağ/Sol Tek taraflı	P2	2	3.5	0 ila +1	8-6	-	0.80	-	30	1450
Sınıf 17	Sağ/Sol Tek taraflı	P3	1	3.5	0 ila +1	8-6	-	0.80	-	22	1000

Not1: Sarkma değerleri 1 m'nin katları olacak şekilde belirlenir.
Not2: Konsol açısı 0 derece olacaktır.
Not3: kavşak aydınlatmasında ilgili yol tipi için konsol sayısı artırılabilir.
Not4: Refüjün 3 m den fazla olduğu durumlarda yollar ayrı değerlendirilir.
Not5: Çizelgede bulunan yol sınıfları dışındaki farklı özel durumları için (minimum direk açıklıklarına uymak şartıyla) standartlara uygun tasarım yapılabilir.

Genel olarak yol aydınlatma tesisatlarında lamba yükseklikleri ile direkler arası mesafe için 1/3 ile 1/5 aralığında bir orandan bahsedilmektedir. Direkler arası mesafe lambanın yerden yüksekliğinin 3 ile 5 katı olabilmektedir (Özkaya ve Tüfekçi, 2004).

Yol aydınlatma düzenlemesinin farklı türleri bulunmaktadır. Olası düzenlemeler Şekil 2.8’de gösterilmiştir (Bektaş vd., 2018).

- Soldan tek taraflı düzenek,
- Sağdan tek taraflı düzenek,
- Karşılıklı düzenek,
- Kaydırılmış düzenek,
- Refüjden çift konsollu düzenek,
- Refüjden çift konsollu karşılıklı düzenek,
- Refüjden çift konsollu kaydırılmış düzenek,
- Enine askı düzeni,
- Refüjden boyuna askı düzeni.



Şekil 2.8. İki şeritli yol ile aydınlatma düzeni a) tek taraflı b) her iki tarafta paralel c) her iki tarafta çapraz.

Farklı kaynakların farklı kalitede aydınlatma sunmaları gece sokak güvenliği ve görünümü üzerinde büyük bir öneme sahiptir. YBSB’li ışık kaynağı tipik olarak şehir içi sokak aydınlatma armatürlerinde kullanılır. Sarımsı-turuncu bir parıltı oluşturur. Kentlerin muazzam gece kalitesini ve görsel netliği tehlikeye atar. Aydınlatılan ortamı rahatsız eder. Buna karşılık ışık kaynağı olarak MH rengi tam olarak veren yumuşak, beyaz bir parıltı üretir; daha iyi görüntü netliği sunar, araçlar için tepki süresini iyileştirir ve aynı algılanan görünürlük için daha az güç gerektirir.

Işık kalitesi ışık miktarından veya daha fazlasından da etkilenir. Armatürler arasındaki ideal aralık sokak ve kaldırımların aydınlatılmasındaki sürekliliği sağlamak için önemli olmakla birlikte yayaların belirli aralıklarla karanlıkta kalmasını önler. İki şeritli yol için uygun direk düzenlemesi Şekil 2.8’de gösterilmiştir. Tek taraflı düzenleme kurulum için basittir. Karşılıklı ve kaydırılmış düzenek sürüş güvenliği açısından daha yeterli olacaktır. Ancak, kurulum maliyetini ve güç bakımını artırmaktadır. Eğer direkler arası mesafe yakınsa (<40m) daha fazla parlaklık olacaktır. Ancak, düzenleme maliyeti ve güç tüketimi de artacaktır. Direkler arası mesafe artırılacak olursa (>40m) maliyet daha düşük olacak, fakat ışık dağılımı homojen olmayacak ve belki de sürücüler için yeterli olmayacaktır.

2.5.2 Aydınlatma parametreleri

Işık Akısı (lm), bir ışık kaynağından birim zamanda yayılan toplam ışık miktarı ile ilgili bir kavramdır birimi lümen (lm), Φ ile gösterilir.

1 lümen = 0.00146 W dır.

1 lümen = 1 cd * sr

Lümen ne kadar yüksek ise ışık o kadar parlak görünür. Çalışmalarda lümen değeri uygun oranda değiştirilebilmektedir.

$$\Phi = K_0 * F * V\lambda \quad (2.1)$$

Denklem 2.1’de ışık akısı formülü verilmiştir. Bu formülde F enerji akısını, K_0 da enerji akısının ışıksal eşdeğerini gösterir. $K_0 = 683 \text{ lm/W}$ ’tır. F enerji akısı ise birim güce karşılık gelen birim zamandaki elektromanyetik enerjidir (Özkaya ve Tüfekçi, 2004).

$$I_{ort}: \Delta\Phi/\Delta\Omega_a \quad (2.2)$$

Denklem 2.2’de ışık şiddeti formülü verilmiştir. Işık Şiddeti; birim zamanda belirli bir doğrultuda yayılan ışığın yoğunluğu ile ilgili olup noktasal ışık kaynakları için tanımlanır. Işık şiddeti doğrultuya bağlı bir büyüklük olup sembolü I, birimi kandeladır (cd) (Özkaya ve Tüfekçi, 2004).

$\Delta\Omega_a$: Işığın çıktığı uzay açısı,

$\Delta\Phi$: Çıkan ışık akısı (lm),

$\Delta\Omega_a$ sıfıra yaklaşırken bu oranın limiti de I_a ışık şiddetini tanımlar.

$$E_{ort} = \Delta\Phi_d / \Delta S \quad (2.3)$$

Denklem 2.3’de aydınlık düzeyi formülü verilmiştir. Aydınlık düzeyi birim yüzeye düşen ışık akısının dik bileşeninin yüzeyin alanına oranıdır. E harfi ile gösterilir. Birimi $\text{lm}/\text{m}^2 = \text{lüks'tür (lx)}$ (Özkaya ve Tüfekçi, 2004).

$\Delta\Phi$: Yüzeye gelen ışık akısı (lm),

$\Delta\Phi_d$: Yüzeye gelen ışık akısının dik bileşeni (lm),

ΔS : Işık akısının geldiği yüzeyin alanı (m^2),

Çizelge 2.5’de aydınlatma düzeyinin bazı özel durumlarda değişiklik gösterdiğine dair bilgiye yer verilmiştir. Sokak aydınlatması için aydınlık düzeyi değerinin 10 ile 30 lüks arasında olması beklenir.

Çizelge 2.5. Aydınlığın değiştiği özel durumlar (Schubert, 2006).

Aydınlatma Durumu	Aydınlatma Düzeyi (lx)
Aysız gece	3×10^{-4}
Dolunay	0.5
Sokak aydınlatması	10-30
Okuma - Yazma	300
Ev aydınlatması	30-300
Ofis aydınlatması	100-1000
Ameliyathane aydınlatması	10000
Fotoğraf stüdyosu aydınlatma	10000
Doğrudan güneş ışığı	100000

Parlaklık trafikte yol aydınlatması için kalite kriterini seçmede kullanılan bir yaklaşımdır. Kurulum ömrü boyunca devam eden minimum değerdir. Armatürün ışık dağılımına, lambanın ışık akısına, kurulumun geometrisine ve yol yüzeyinin yansıtma özelliklerine bağlıdır. Yol yüzeyindeki etkin ışığın doğru şekilde ölçülmesinde aydınlık alandan ziyade yol yüzeyinin parlaklığının alınması gerekmektedir. Aynı aydınlık yol yüzeyindeki farklılıktan dolayı farklı görseelliğe sebep olabilir.

Parlama-parıltı bir nesneyi veya yolu net bir şekilde görme yeteneğinde azalmanın ve rahatsızlığın olduğu görme durumudur. Bu durum uygun olmayan parlaklık dağılımından veya ışığın parlaklığının insan gözünün adaptasyon seviyesini aşmasından kaynaklanır.

$$\alpha = \lim_{\Delta S_n \rightarrow 0} \left(\frac{\Delta I_\alpha}{\Delta S_\alpha} \right) \quad (2.4)$$

Denklem 2.4'te parıltı formülü verilmiştir. Işık yayan bir yüzeyin bir M noktasının bu yüzeyin normali ile α açısı yapan doğrultudaki parıltısı, M noktasını içine alan ΔS yüzey elemanının bu doğrultuda doğurduğu ΔI_α ışık şiddetinin ΔS 'in bu doğrultuya dik düzlemdeki ΔS_n görünen alanına oranının limitidir (Özkaya ve Tüfekçi, 2004).

$$L = \frac{E \cdot \rho}{\pi} \quad (2.5)$$

Denklem 2.5'de Lambert yasasına göre ışık yayan bir yüzeyin parıltısı verilmiştir. Parıltı birimi cd/m^2 'dir ve L ile gösterilir.

L: Parıltı,

ρ : Yüzeyin yansıtma katsayısı,

E: Aydınlık düzeyidir.

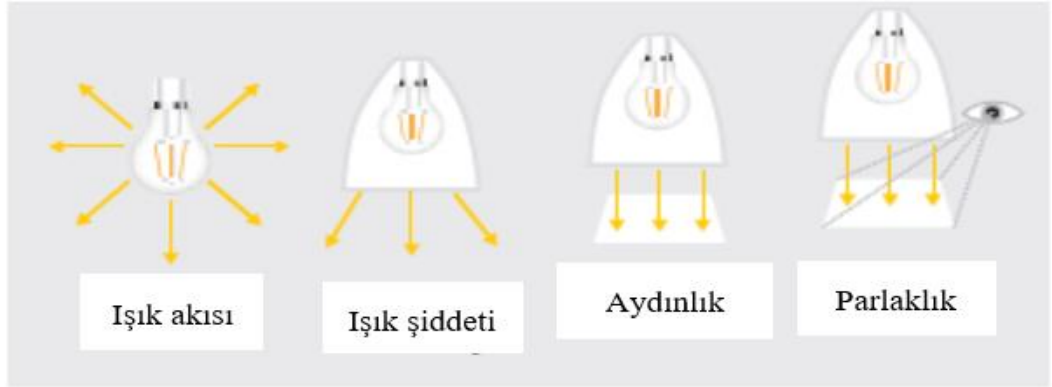
Parıltı görme alanında çok parlak kaynağın aniden var olmasından kaynaklanmaktadır. Genel aydınlatmada parıltı armatürlerden kaynaklanır. Işığın rahatsız edici parıltısı görüşün bozulmasına sebep olur. Parıltı yüzeyin algılanan parlaklığını belirtir. Parıltı, belirli bir açıdan veya bakış açısından ışıklı yüzeye bakan bir gözlemci tarafından ne kadar ışık gücünün algılandığını ifade eder (Boyce ve Raynham, 2009).

İç ve dış mekan aydınlatmada ‘aydınlık düzeyi’ tanımı kullanılırken, yol ve tünel aydınlatma uygulamalarında ‘parıltı’ değeri kullanılmaktadır.

Aydınlık düzeyi-lüx (lm/m^2): metrekare başına düşen lümen değeridir.
Parıltı (cd/m^2): metrekare başına düşen kandela değeridir.

Aynı miktarda ışık parlak ya da koyu olan iki farklı yüzey üzerine düşürüldüğünde farklı algılara sebep olmaktadır. Parlak beyaz yüzeyler ışığı daha fazla yansıttığı için daha parlak görünürken, koyu siyah yüzeyler ışığı daha az yansıttığı için daha karanlık görünecektir.

Işık akısı ışık kaynağının ne kadar ışık verdiğinin ölçüsüdür. Işık şiddeti ışığın bir yöne ne denli yoğunlukta gittiğini gösterir. Aydınlık düzeyi yüzeye düşen ışık miktarını ifade eder. Parlaklık ise insan gözü tarafından algılanan ışık miktarını ifade eder (Şekil 2.9).



Şekil 2.9. Işık miktarının farklı tanımları (Anonim, 2017).

Aydınlık: Uzaysal güç dağılımı

Yoğunluk: Açısal güç dağılımı

Parlaklık: Açısal ve uzaysal bileşenler olarak tanımlanır.

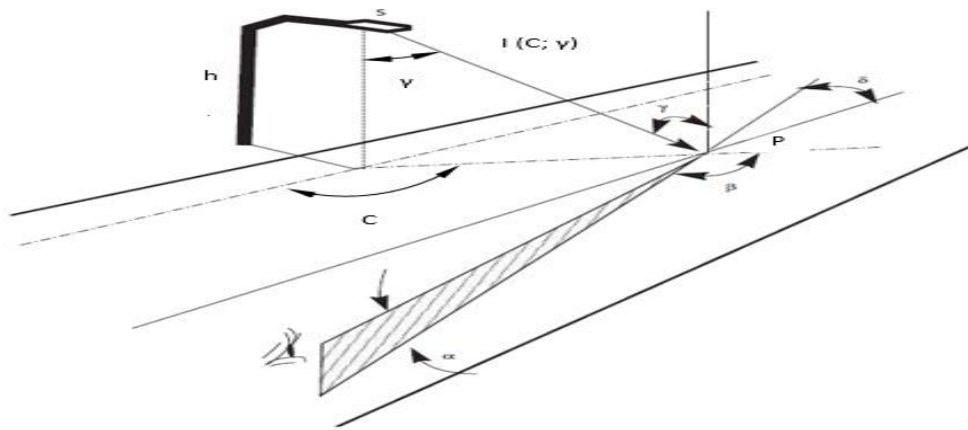
Etkinlik faktörü; bir ışık kaynağından veya armatürden çıkan toplam ışık akısının kaynağın veya armatürün şebekeden çektiği toplam güce oranı ile ifade edilir. ‘e’ ile gösterilir ve birimi lm/W tır.

Ekonomik ömür (saat); LED'lerin kullanım ömrü ışık üretmeyi tamamen bıraktıklarında kullanım ömrü sonuna ulaşan geleneksel aydınlatma teknolojilerinden farklı şekilde ölçülür. LED'ler tipik olarak ışık üretmeyi tamamen durdurmazlar. LED zaman içinde lümen çıktısının gerekli ışık seviyelerini karşılamak için yetersiz olduğu bir noktaya kadar değer kaybeder veya söner. LED'ler için endüstri ömrü, LED'lerin lümen çıktısının orijinalin % 70'ine ulaştığı nokta olarak tanımlanır (Bamisile vd., 2016).

Renk dönüşüm endeksi (CRI, Ra); yapay bir ışık tarafından bir nesnenin renklerini yeniden üretme yeteneğini ölçmek için kullanılan bir endekstir. Daha yüksek CRI daha iyi görünürlük anlamına gelir. Tüm yol türleri için $CRI \geq 70$ önerilir. LED armatürler tipik olarak 80 veya daha yüksek bir CRI değeri sağlar. Basit bir kullanım modeline sahip caddeler için 70 Ra'lık renk sunumu genellikle yeterlidir. Daha karmaşık kullanım ve aydınlatma durumları için 80'in üzerindeki Ra değerleri uygun görülmüştür (He vd., 2010).

2.5.3 Aydınlatma düzeyine göre yol aydınlatması hesabı

Yol aydınlatması hesapları genelde 'noktasal aydınlatma hesabı yöntemi'ne göre gerçekleştirilmektedir. Şekil 2.10'da noktasal ışık kaynağının kullanıldığı durumundaki aydınlatma hesabı ve parlaklık katsayısının bağlı olduğu açılar verilmiştir.



Şekil 2.10. Parlaklık katsayısının bağlı olduğu açılar (Boyce ve Raynham, 2009).

Teorikte yol yüzeyinin yansıma özelliklerini karakterize etmek için ilgili açılar şunlardır: α = yataydan gözlem açısı, β = düşey etki alanı ve gözlem düzlemleri

arasındaki açı, γ = kaynaktan P noktasına gelen ışın ile yüzeyin normali arasındaki açı ve δ = dikey gözlem düzlemi ile yol eksenini arasındaki açıdır. Uygulamada trafik yollarının aydınlatılmasında yol yüzeylerinin yansıtma özelliklerinin izotropik olması nedeniyle α 'nın yaklaşık 60 m'lik bir görüntüleme mesafesine karşılık gelen 1°'lik sabit bir değere sahip olduğu varsayılmaktadır. Armatürün tam altındaki aydınlık düzeyi E_{nadir} ile ifade edilmektedir (Boyce ve Raynham, 2009).

$$E = \frac{I(C, \gamma) \cos \gamma^3}{h^2} \quad (2.6)$$

P noktasının yatay aydınlık düzeyi Denklem 2.6'daki formül ile verilir. Burada,

$I(C, \gamma)$: Armatürden P noktasına ulaşan ışık şiddeti değeri (cd),

γ : P noktasına gelen ışının düşeyle yaptığı açı (derece),

h : Armatür fotometrik merkezinin yerden yüksekliği (m),

C : Düzlem açısıdır.

Bitişik armatürlerin P noktasında bir aydınlık düzeyi elde edebilmesi amacıyla tüm armatürlerden gelen katkılar için işlem tekrarlanabilmektedir.

2.5.4 Yönetmeliklere göre yol aydınlatma kalite büyüklükleri

Günümüzde yol aydınlatma tasarım kriterlerinin belirlenmesinde CIE'nin önerileri ve CEN esas alınmaktadır. CIE 115-1995 nolu yayında yol aydınlatma sınıfları trafik kontrolü, yolun karmaşıklığı ve kullanıcı tipine göre belirlenirken (CIE, 1995), CR 13201-1 nolu yayında bu sınıflandırmalar yoldan geçen araç sayısı, kavşak-yonca benzeri yol ayırım sıklıkları, suç oranları ve park etmiş araçlar gibi parametreler de dikkate alınarak daha detaylı bir şekilde belirlenmiştir (CR 13201-1, 2002).

Türkiye'de 2006 yılında gerçekleştirilen yönetmelik çalışmaları ile şehir içi yollarda şeffaf tüplü YBSB'li lambaların kullanılması zorunlu hale getirilmiştir. Tüm dünyada şeffaf tüplü YBSB'li lambalı yol aydınlatma tesisatları yaygın olarak kullanılmakta ve enerji tasarruflu çözümler olarak kabul edilmektedir (ECE/ENERGY/WP.4/2006).

Hava karardıktan sonra gündüze oranla trafik yoğunluğunun yarı yarıya azalmasına rağmen yeterince aydınlatılmamış yollarda meydana gelen ölümlü trafik kaza sayısında nerdeyse gündüze oranla üç kat artış olduğu görülmektedir. Bu sebepten dolayı şehir içi ya da şehirlerarası yolların güvenlik açısından aydınlatılması son derece önem arz etmektedir. Doğru yol aydınlatması ile can kayıplı trafik kazalarının önüne geçilebilmesinin yanında maddi hasarlı trafik kazalarının da azaltılması sağlanacaktır. Yapılan istatistiksel çalışmalara bakıldığında; şehir içi yol ve alanların kriterlere uygun aydınlatılmasıyla, suç işleme oranında %20, işlenen suçların şiddetinde ise %40 oranında azalmalar olduğu saptanmıştır (Painter ve Farrington, 2001).

2.5.5 LED aydınlatma renk tasarımı ve kontrolü

Yüksek güçte LED kullanılan ürünlerin optik dizaynında renk kontrolü bir diğer önemli faktördür. Son on yılda temiz aydınlatma kavramı yavaş yavaş tanınmıştır. Temiz aydınlatma yüksek verimli, uzun ömürlü, güvenilir ve kararlı performans sağlayarak; insanların işlerini, çalışmalarını, yaşam standartlarını ve kalitesini artırmaya yönelik bir aydınlatma tasarımı olarak kullanılabilir. Böylece yüksek etkinlikte, konforlu, emniyetli, ekonomik ve modern uygarlığı somutlaştıran aydınlatma sağlanmış olur. İnsanlar artık sadece parlaklıkla yetinmeyip; rengin etkisi, renk sıcaklığı ve renk oluşumu gibi değişkenlere de dikkat etmektedirler. Bu değişkenlerden biri olan CRI değeri 0-100 arasında değişen renk oluşturma endeksine sahiptir. Güneş ışığının CRI'sı 100 kabul edilir. Çizelge 2.6'da farklı ışık kaynaklarına ait CRI değerleri verilmiştir. LED en yüksek CRI değerine sahiptir. Bu durum LED'leri diğer ışık kaynaklarından daha üstün konuma getirmiştir (Anonim, 2017).

Çizelge 2.6. Lamba türleri ve CRI değerleri (Anonim, 2017).

Lamba tipi	CRI, Ra
Yüksek basınçlı cıva	40-60
Metal halide	70-95
Düşük basınçlı sodyum	Tek renkli
Yüksek basınçlı sodyum	20
LED	80+

2.5.6 Yol aydınlatmasında LED renk sıcaklığı seçimi

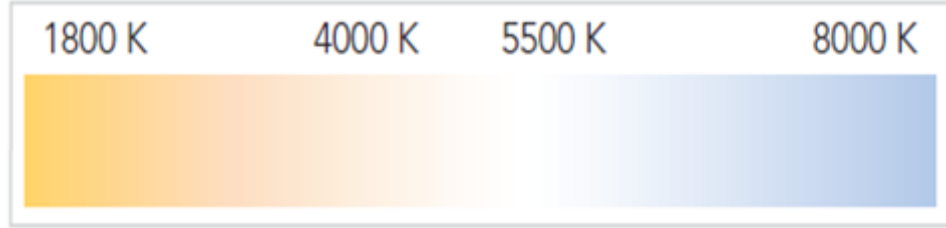
Renk sıcaklığı ışık kaynağı tarafından yayılan görünür ışığın ortamda yarattığı ışık rengini belirtmektedir. Işığın rengi, dalga boyu ve renksel geriverim endeksi gibi özellikleri spektrometre adı verilen cihazlar ile ölçülebilir. Güneşin yüzeyi yaklaşık 5600°C sıcaklığında olup bu sıcaklık değeri 5873 Kelvin'e (K) karşılık gelir (Anonim, 2017).

Beyaz ışığın tonları da K derece kullanılarak bir sıcaklık ölçeğinde ölçülmektedir. Daha sıcak renkler daha kırmızımsı ve daha düşük renk sıcaklığına sahipken, daha soğuk renkler mavimsi ve daha yüksek renk sıcaklık derecelerine sahiptir. Eski LED'ler tipik olarak daha soğuk ve daha mavi renk sıcaklıklarında çalışmaktaydı. Yeni LED lambalar gelişmiş fosfor teknolojisi kullanarak renk sıcaklıklarını akkor lambaların renk sıcaklığına yaklaşacak şekilde düşürmeyi başarmışlardır. Fosfor, ısıtılmaya gerek kalmadan ışığı yayan bir malzemedir. LED lambalarda fosfor genellikle renk sıcaklığı değerlerini çevirmek amacıyla LED'ler üzerine kaplama yapılarak kullanılmaktadır (URL-7).

Akkor ampuller tek bir renk sıcaklığına sahiptir. Ancak, LED ampuller için renk sıcaklığı yaklaşık olarak hesaplanmaktadır. Bu nedenle değerlerinin ilişkili olduğu söylenebilir. Beyaz LED'lerin ürettiği renk tonlarının akkor ampullerde olduğu gibi Planckian lokusuna mükemmel bir şekilde düşmediği, ancak renk sıcaklığı ölçeğinin çalışmasına yetecek kadar olduğu bilinmektedir. Genel kanı, daha sıcak tonların daha az verimli bir lambayla sonuçlanacağı yönündedir. Bunun nedeni, daha düşük CCT'ye ulaşmak için daha fazla kırmızı fosfora ihtiyaç duyulması ve kırmızı fosforun sarı fosfordan daha az verimli olmasıdır. Kullanılan fosfor nedeniyle LED'ler tarafından yayılan mavi fotonlar ile kırmızı fotonlar arasındaki enerji farkı mavi ve sarı fotonlar arasındaki enerji farkından daha büyük olur. Çünkü mavi-kırmızı fotonlar arasındaki bant aralığı, mavi-sarı fotonlar arasındakinden daha geniştir (Das vd., 2020; Zhong vd., 2012).

Kırmızı ışığı yansıtan nesneler kırmızı, bütün ışıkları yansıtan nesneler beyaz, ışıkları yutan nesneler de siyah olarak algılanmaktadır. Bir başka deyişle doğada siyah ve beyaz ışık yoktur. Duyu organı ile algılanabilen renkli ışık spektrumu vardır. Ancak, 380 nm ile 780 nm dalga boyundaki ışıkların (mor, mavi, yeşil, sarı,

kırmızı) toplamı beyaz ışık olarak algılanır. Siyah renk ise ışık yok demektir (URL-8). Sokak aydınlatması için kullanılan açık renk tipik olarak 2500 ile 5000 K arasındaki renk sıcaklıklarına karşılık gelen ve Şekil 2.11’de gösterilen sarımsı, nötr ve mavimsi beyaz arasında değişmektedir (Khan vd., 2015).



Şekil 2.11. Renk sıcaklığı skalası (Anonim, 2017).

3200 K’den az olan ısı renkleri sıcak, 3200 K ve 5200 K arası ısı renkleri ılık, 5200 K’den yüksek ısı renkleri ise soğuk olarak tanımlanır (Şekil 2.12).



Şekil 2.12. Farklı renk sıcaklıkları (URL-9).

LED teknolojisi ile temsil edilen SSL çevre dostu aydınlatmanın en iyi taşıyıcısıdır. Yüksek verimlilik, uzun ömür, çevre dostu olma gibi avantajlar sağlarken, zengin renk ve yüksek kontrol edilebilirlik gibi kıyaslanamaz avantajları bulunmaktadır (Tminger ve Ries, 2008).

Nötr beyaz ışıklı ve soğuk beyaz ışıklı yüksek güçlü LED’in ışık verimliliği (lm/W) sıcak beyaz ışıktan daha yüksektir. Bu nedenle çoğu LED’li yol aydınlatmasında ışık kaynağı olarak nötr beyaz ışıklı veya soğuk beyaz ışıklı LED tercih edilmektedir.

Bazı şehirlerde YBSB’li lambalar yerine LED lambalar kullanıldıktan sonra yol aydınlatmasının iyileştiği görülmüştür. YBSB’li lambalar ve sıcak beyaz ışıklı LED lambalar nispeten daha büyük dalga boyuna sahip oldukları için, ışık güçleri aynı

olsa da nötr beyaz ışıklı ve soğuk beyaz ışıklı lambalardan daha parlak görünme eğilimindedirler. Ayrıca, sıcak beyaz ışık daha rahat ve yumuşak görünür ve insanlara güvende olma hissi verir. Güvenlik açısından düşünüldüğünde de sisli havalarda daha iyi performans sergiledikleri için sarı ışığın veya sıcak beyaz ışığın yol aydınlatması için nötr beyaz ışıktan veya soğuk beyaz ışıktan daha uygun olduğu belirtilmektedir. Bu nedenle, sıcak beyaz ışıklı LED lambalar yol aydınlatması için daha uygun bulunmaktadır (Liu ve Luo, 2011). Şekil 2.13’de sıcak beyaz ışık (sol) ve soğuk beyaz ışık (sağ) altında Los Angeles’daki bir yola ait görüntüye yer verilmiştir.

Amerikan Tıp Derneği (AMA), karayolları gibi dış mekan aydınlatmalarında 3000 K ve altı renk sıcaklıklarının kullanılması gerektiğini belirtmektedir. Tüm LED aydınlatmaların parlamayı minimize etme ve insan-çevre etkilerini en aza indirme amacına sahip olması beklenmektedir. Trafik yoğunluğunun az olduğu zamanlarda da enerji tasarrufu sağlamak amacıyla LED aydınlatmaların parlaklığının azaltılması gerekmektedir. Sadece evlerde ya da iş yerlerinde değil sokaklarda da aydınlatma ihtiyacı optimum düzeyde karşılanmalıdır. Enerji verimliliğine ihtiyaç oldukça ciddi bir konu olarak görülmektedir. Bununla birlikte, parlama ve sirkadyen ritm bakımından değerlendirildiğinde kötü aydınlatmanın insanlar üzerindeki etkisinin minimize edilmesi gerektiği vurgulanmaktadır. LED teknolojisi doğru tasarlanıp uygulandığında tüm bu etkileri optimize edebilmektedir (URL-10).



Şekil 2.13. Los Angeles LED sokak lambaları (URL-10).

2.6 Optik Elemanlar

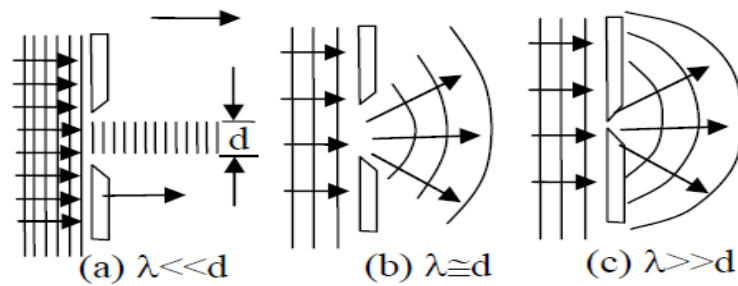
2.6.1 Geometrik optikte ışın yaklaşımı

Işık, yayılma olayında dalga özelliği gösterirken madde ile etkileşim konusunda ise parçacık özelliği göstermektedir. Dalga modelinde ışık olayı, geometrik optik ve fiziksel optik adları altında iki ayrı modelde incelenmektedir.

Geometrik optikte; homojen bir ortamda, ışığın önüne konulan engelin boyutlarının ışığın dalga boyundan çok büyük olması durumunda ışığın doğrusal bir çizgide ilerlediği varsayımıyla 'ışın yaklaşımı' kullanılır. Fiziksel optikte ise ışığın önündeki engelin boyutunun ışığın dalga boyu ile karşılaştırılabilir büyüklükte olması durumunda optik olaylar incelenmektedir. Noktasal bir ışık kaynağından çıkan ışık bütün doğrultularda yayılan küresel dalgalar olarak kabul edilmektedir.

Işık dalgası kendi dalga boyundan çok daha büyük çaplı dairesel bir delik bulunan bir engel ile karşılaşır;

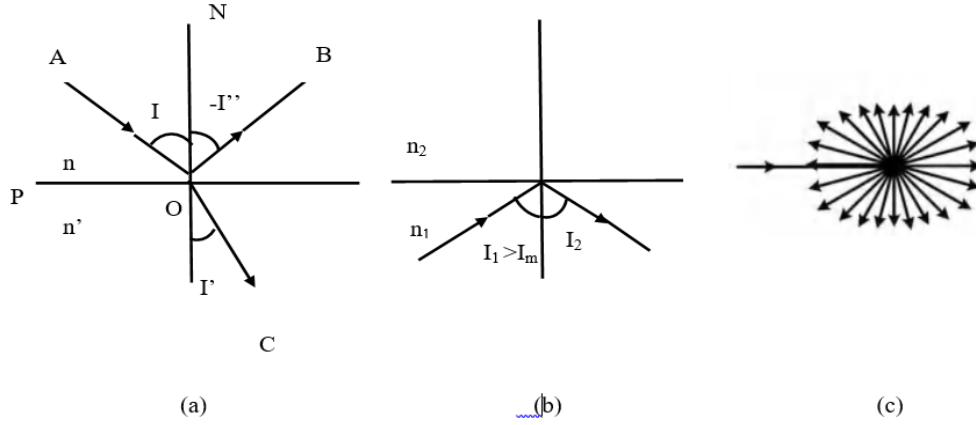
- (a) $\lambda \ll d$ iken ışınlar düz- çizgisel bir yolda ilerler ve ışın yaklaşımı geçerli kalır,
- (b) $\lambda \approx d$ iken, ışınlar delikten geçip yayılır,
- (c) $\lambda \gg d$ iken, delik küresel dalgalar yayan noktasal bir kaynak gibi davranır (Şekil 2.14).



Şekil 2.14. Geometrik optikte ışın yaklaşımı.

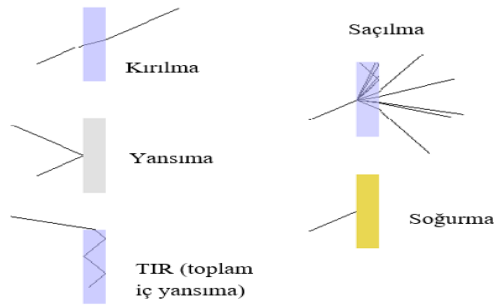
Son yirmi yılda özel aydınlatma dağılımı için tasarlanan kırıcı ve yansıtıcı optik aygıtlar popüler olmaya başlamıştır. Araştırmacılar bu eksenel simetrik olmayan aydınlatma metotları üzerinde çalışmalar yapmıştır (Ding vd., 2008).

LED'in ışık dağılımını kontrol eden ikincil optik sistem için üç temel metot vardır; bunlar yansıma, kırılma ve saçılma (Liu ve Luo, 2011). Şekil 2.15'de bu temel optik kavramlar hakkında bilgi verilmiştir.



Şekil 2.15. (a) Yansıma ve kırılma kanunu, (b) toplam iç yansıma kanunu (TIR) ve (c) saçılma kanunu.

Işınlar; kırılma, saçılma, yansıma, soğurma ve TIR modelleri ile yüzey etkileşimi yapabilirler (Şekil 2. 16).



Şekil 2.16. Işınlardan yüzeylerle etkileşimi ile LightTools modelleri (Synopsys, 2012).

$$I = -I'' \quad (2.7)$$

Yansıma kanunu Denklem 2.7'deki eşitlikle ifade edilmektedir. Yansıma kanununa göre gelen ışın, yansıyan ışın ve yansıtıcı yüzey aynı düzlemde (Şekil 2.17-a). Gelen ve yansıyan ışının kesin değerleri eşit, fakat zıt işaretlidir. Gelen ışın ve yansıyan ışın normalin her iki tarafında yer almaktadır (Serway ve Beincher, 2011).

Pürüzlü arayüze gelen ışık ışınları da pürüzlü yüzeyden yansdıktan sonra yansıyan ışık olarak isimlendirilir. Fakat bu durumda düzensiz ve dağınık bir yansıma gerçekleşecektir. Ancak küçük yansıtıcı herhangi bir yüzey hala yansıma yasasına uygundur.

$$n \sin I = n' \sin I' \quad (2.8)$$

Denklem 2.8’de verilen kırılma kanununa göre; gelen ışın, yansıyan ışın ve yüzeyin normali aynı düzlemedir. Gelme açısının sinüsoidi ile yansıma açısının sinüsoidi oranı ortamların kırıcılık indisleri ile ilişkilidir. Işık için bu oran belirli dalga boyunda, belirli bir sıcaklık ve basınç altında sabittir.

$$n \equiv c/v \text{ (kırılma indisi } \equiv \text{ ışığın boşluktaki hızı/ışığın ortamdaki hızı)}$$

Bir maddenin kırılma indisi genellikle n sembolü ile gösterilmektedir. Buna göre; c ışığın boşluktaki hızı ve v ise madde içindeki hızıdır. Örneğin havanın kırılma indisi yaklaşık 1 kabul edilmektedir. Suyun kırılma indisi ise 1.33’tür. Bu durum ışığın boşlukta sudan 1.33 kat daha hızlı gittiğini göstermektedir. Kırılma indisi ilk kez ‘snell yasası’nda ifade edilmiştir.

$$\frac{\sin I_1}{\sin I_2} = \frac{n_2}{n_1} < 1. \text{ If } \sin I_1 > \frac{n_2}{n_1}, \sin I_2 > 1 \quad (2.9)$$

Toplam iç yansıma olayında ışık optik olarak daha yoğun ortamdan daha az yoğun ortama geçerken ($n_2 < n_1$) Denklem 2.9’daki eşitlik ortaya çıkar. Aslında o anda kırılan ışını yoktur; gelen ışınlar daha yoğun ortama geri yansıtılır. Bu olay toplam iç yansıma olarak bilinmektedir. $\sin I_m = n_2/n_1$, I_m kritik açı olarak isimlendirilir. Karşılık gelen kırılma açısı ise $I_2 = 90^\circ$ dir.

Toplam iç yansıma olayında ışık kırılma indisi yüksek bir ortamdan düşük bir ortama geçerken kritik bir açıya eşit veya daha büyük bir açıda kırılır. Bu durumda gelen ışığın tamamı geldiği ortama geri döner. Bu yöntem sayesinde ışık kayıpsız bir şekilde istenilen bölgede saklanabilir. Fiberoptik kablolar tam yansıma olayına örnek olarak gösterilebilir.

Gelen ışın bir ortama girdiği zaman ortamın inhomojenitesi ışığın her yöne saçılmasına sebep olacaktır. Bir armatürden istenen ışık dağılımı bir veya daha fazla fiziksel olgunun uygulanmasıyla elde edilebilir. Bu fiziksel olgular; yansıma, kırılma

ve dağınık iletimdir. Birçok aydınlatma armatüründe gerekli parlama kontrolünü yapabilmek ve ışık kirliliğini sınırlamak için ekranlama kullanılır. Ekranlama işlevi kırıcılar, difüzörler, ayna reflektörleri veya çok sıkı parlama kontrolünün gerekli olduğu yerlerde siyah yüzeyler tarafından gerçekleştirilebilir. Bir armatürde farklı kontrol tekniklerinin uygulanma şekli ve kullanılan malzemelerin optik özellikleri armatürün ışık çıkış oranını belirlemektedir.

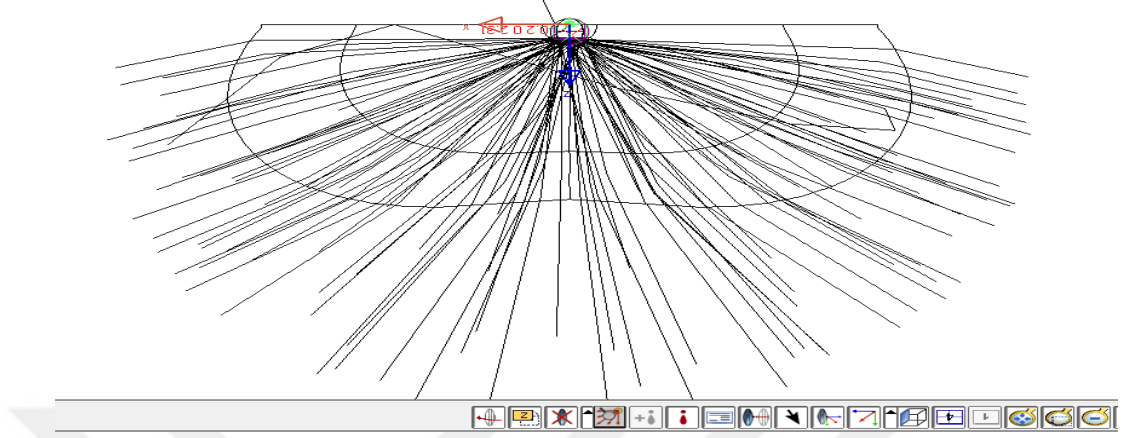
Reflektör, LED'den yayılan ışınların yakınlaştırılmasında önemli bir rol oynamaktadır. Yol aydınlatmasında olduğu gibi bir LED aydınlatma performansı elde edilmek isteniyor ise reflektörlerin üç boyutlu tasarımı bir gerekliliktir. Bu tasarım LED aydınlatma sisteminin hacminin büyümesine, kurulum ve bakım maliyetinin artmasına neden olur. Aynı zamanda bir çok LED, Lambert ya da Lambertian ışık dağılımına benzer olduğu için reflektör sadece LED'den yayılan büyük açılı ışınları kontrol etmektedir. Ancak, simetrik eksene yakın küçük açılı ışınları kontrol edemeyebilir. Bu nedenle reflektörün LED'den gelen ışının tümünü kontrol etme yeteneği nispeten zayıftır.

2.6.2 LED aydınlatmada kontrol aracı olarak mercekler

İçlerinden geçen ışığı kıran optik aygıtlar mercek ya da prizmalardır. Işığın büküldüğü açı hem kırıcının şekline hem de kırılma indisine bağlıdır. Günümüzde LED armatürlerde her bir LED noktası için bir tane olmak üzere gelişmiş mercek tipi kırıcılar sıklıkla kullanılmaktadır. Bunlar ışık dağılımını doğru yönde şekillendirmeyi mümkün kılmaktadır. Mercekler LED ışınlarının yakınlaşmasını ya da ayrılmasını sağlayabilir. Merceklerin kontrolü esnektir. Bu durum, ışık dağılımının mevcut aydınlatma armatürü aralığına, yol genişliğine, değişen hava koşullarına ve yol yüzeyi yansıma özelliklerindeki değişikliklere uyacak şekilde ayarlanmasına olanak sağlamaktadır (Bommel, 2015).

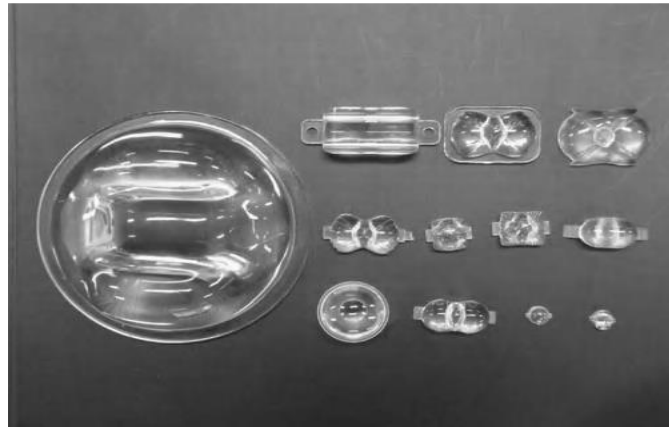
Özellikle son yıllarda LED serbest yüzey mercek teknolojisinin ortaya çıkması ile merceğin ışık çıkarma verimliliği daha da gelişmiş ve ışık enerjisinin kontrolü daha esnek olmuştur. Serbest yüzey mercek, reçete değerlerinin camın yüzeyine uygulanmasını sağlayan bir yüzey işleme teknolojisidir. Klasik yöntemlerde belirli cam kalıpları ile iki boyutlu yapılabilen yüzey işleme yöntemi, serbest form makinelerinde elmas bir uç yardımıyla tüm cam yüzeyine üç boyutlu olarak 'piksel

piksel' yani çok daha hassas bir şekilde uygulanabilmektedir (URL-11). Şekil 2.17'de LightTools'da tasarımı yapılan serbest yüzeyli mercekten kırılan ışınların görüntüsü verilmiştir.



Şekil 2.17. LightTools'da tasarımı yapılan serbest yüzeyli mercekten kırılan ışınların görüntüsü.

Armatürlerde LED; ışık kaynağı işlevi görürken, reflektör; ışık kaynağından çıkan ışık hüzmelerini belirli bir açıyla merceğe iletme görevini yerine getirir. Mercek ise ışık hüzmelerini homojen ve kayıpsız bir şekilde aydınlatılması istenilen bölgeye yönlendirme işlevini yerine getirmektedir. Özel olarak tasarlanmış mercek sistemleri direkler arasında maksimum boşluk bırakmaya müsade eden ve yüksek yol genişliğini kapsayan iç ve dış profilde benzersiz olmalıdır. Optik sistemler olası bir LED arızası durumunda yeterli parlaklık ve aydınlık bütünlüğü sağlamak için çoklu katmanlar halinde düzenlenmelidir (DFI, 2014). Şekil 2.18'de piyasada bulunan farklı türde ve boyutta LED ikincil mercekler gösterilmiştir.



Şekil 2.18. Piyasadaki çeşitli LED ikincil mercekler (Liu ve Luo, 2011).

LED’li merceklerde yaygın olarak kullanılan malzemeler Polikarbonat (PC), Polimetil metakrilat (PMMA) ve camlardır. PC çok iyi dayanıklılık ve darbe direnci sağlar. Işık geçirgenliği yaklaşık % 90, kırıcılık endeksi 1.586’ya yakın, erime noktası yaklaşık 149°’dir. İzin verilen termal deformasyon sıcaklığı 130°C-140°C’dir. Ancak, dayanıklılığını yitirme direnci düşüktür. LED merceklerde PC genellikle birincil merceklerde kullanılır ve enjeksiyon kalıplamada zayıf akış özellikleri ile bilinir.

PMMA, cam yerine kullanılabilen bir çeşit plastik malzemedir. Işık geçirgenliği % 94 lere varabilir, kırıcılık endeksi 1.49’a yakındır, fakat dayanma sıcaklığı nispeten düşük olup yaklaşık 80°C-110°C’dir. LED’li merceklerde, PMMA genelde ikincil mercek olarak kullanılmaktadır. Şekil 2.19’da SolidWorks ve LightTools programları kullanılarak tasarımı yapılan ve PC malzemedan üretilen ‘konkav-konveks’ mercek örnekleri yer almaktadır.



Şekil 2.19. Konkav-konveks mercek örnekleri.

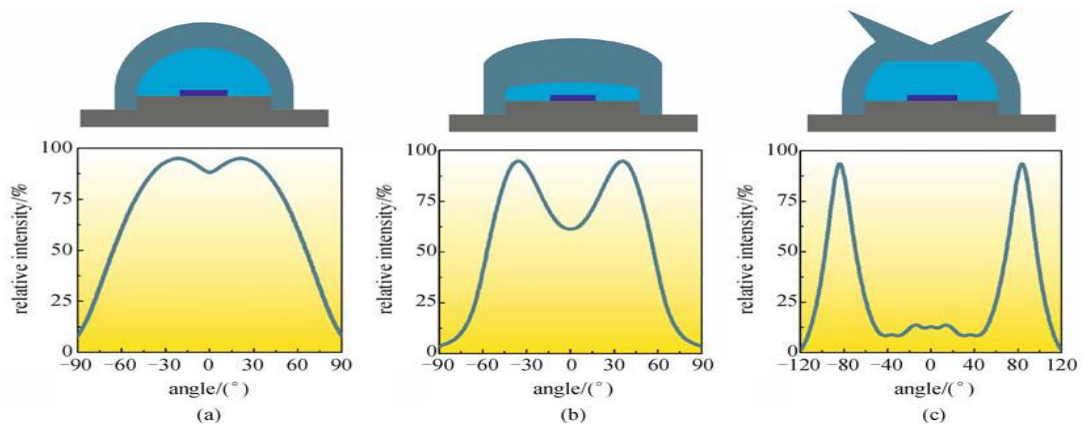
Cam mercekler genellikle yüksek güçlü LED’lerde kullanılır. Yüksek ışık geçirgenliği ile karakterize edilir. Yaygın kırıcılık endeksi yaklaşık 1.50’dir ve sıcaklık toleransları iyidir. Fakat karmaşık üretim süreci vardır. Bu nedenle camın daha karmaşık mercek tasarımında kullanımı zordur. Yüksek güçlü bir LED paketi için kullanılan merceğin ışık dağılımı modelleri Şekil 2.20’de gösterilmiştir. Şekil 2.20’de LED çipi üzerine yerleştirilmiş bombeli yapı birincil optik malzeme olarak adlandırılır. Birincil optik malzeme LED’e yerleşiktir. LED’den çıkıp bu bombeli yapıdan geçen ışık geniş açıda yayılmaktadır. Geniş açıda yayılan ışık uzak mesafe aydınlatma için uygun değildir çünkü ışık ulaşacağı yüzeye varana kadar kaybolur. Bu nedenle LED’li aydınlatmalarda ikincil optik malzemeye ihtiyaç duyulmaktadır.

LED çipler maksimum 160°-180°'lik açılarda ışık yayabilirler. Üzerine birincil optik malzeme yerleştirilen LED'ler 120°'lik açıda ışık yayabilirler, ancak 120°'lik açı bir çok uygulama için uygun olmamaktadır. Bu nedenle LED'lerle birlikte ikincil optik malzeme kullanılır (Liu ve Luo, 2011).

LED aydınlatmada önemli kontrol aracı olarak mercekler, sadece yakınsak ışın değil aynı zamanda ıraksak ışın üretebilen ikincil optik elemanlardır. Ayrıca, LED'den farklı açılarda yayılan ışığı etkili olarak kontrol edebilirler. Bununla birlikte mercekler büyük tasarım özgürlüğüne sahiptir. Özellikle serbest biçimli merceğin gelişmesi ile çeşitli dairesel olmayan ışık desenlerinin tasarımları daha kullanılabilir hale gelmiştir. Bu nedenle mercekler, LED aydınlatmada oldukça yaygın kullanılmakta ve optik tasarımda kilit bir rol oynamaktadırlar.

Mercek seçiminde yüksek verimli mercekler tercih edilmelidir. Aydınlatma uygulamalarında mercek seçimi tamamen proje ihtiyaçlarına göre belirlenmektedir. İkincil optik olarak mercek yerine reflektör de kullanılabilir. Merceğin reflektörlerden en büyük farkı ve avantajı ışık kaynağını gizlemesi ve bu sayede kamaşmayı azaltmasıdır (URL-12).

'Lambertian mercek' LED ambalajında en çok benimsenen yapıdır. Lambertian radyasyonu yol ışığı, MR16 LED lambalar gibi uygulamalarda kullanılabilir. 'Batwing mercek' ve 'Side emitting mercek' arka aydınlatma ve cep telefonları gibi uygulamalar için uygundur (Liu vd., 2009). Şekil 2.20'de üç merceğin radyasyon modelleri gösterilmiştir.

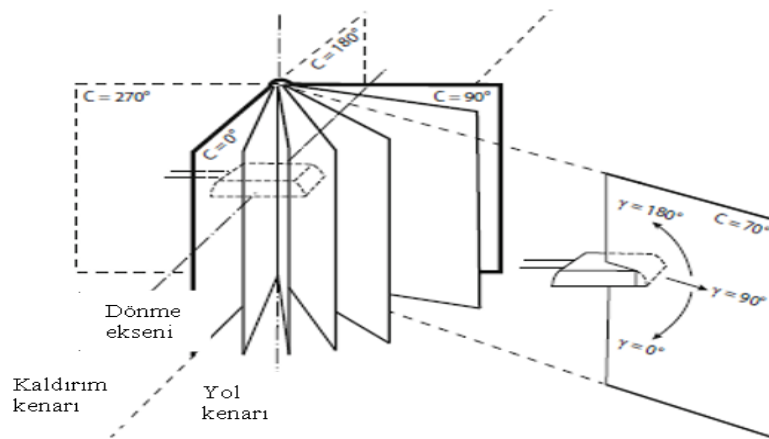


Şekil 2.20. Üç merceğin radyasyon modelleri. (a) Lambertian mercek, (b) batwing mercek, (c) side emitting mercek (Liu vd., 2009).

2.6.3 Işık dağılım eğrisi (polar fotometrik eğri)

C düzlemleri ve γ açıları; bir armatürün her yöne olan ışık dağılımını belirlemek ve farklı standartlaştırılmış koordinat sistemleri için kullanılır. Yol aydınlatma armatürleri ve ayrıca iç mekan aydınlatma armatürleri için kullanılan sistem C-Gamma veya kısaca C- γ sistemidir. C- γ koordinat sisteminde C düzlemlerinin dönme eksenine dikeydir ve C düzlemi aydınlatma armatürünün merkezinden geçer (Şekil 2.21). Yol aydınlatma armatürleri için $C0^\circ$ – $C180^\circ$ düzlemi yolun uzunlaması eksenine paralel olan düzlemdir. Belirli bir C düzlemindeki yön 0° (aşağı) ile 180° (yukarı) arasında değişen γ açısı ile gösterilir. Armatürün düşey eksen dönme eksenine ve dönme eksenine etrafındaki düzlemler de C düzlemleri olarak kabul edilir. Işık dağılım eğrileri bu düzlemlerde dönme eksenine ile γ açıları yapan ışık şiddetlerinin uç noktalarının geometrik yeridir (Bommel, 2015).

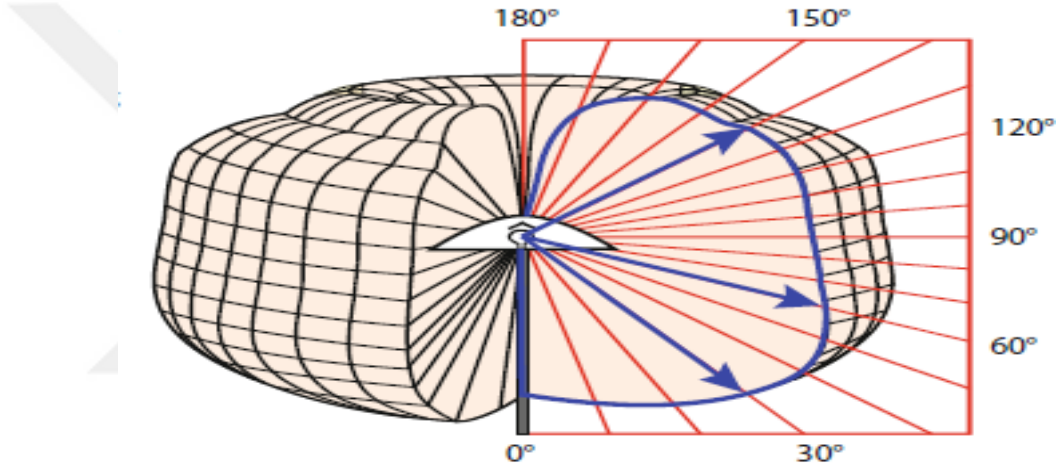
Aydınlatma hesaplamalarında farklı yazılım programları ve farklı girdi formatları kullanılmaktadır. En sık kullanılan formatlar IES ve EULUMDAT'tır. IES formatı, Illuminating Engineering Society of North America IES (2002) tarafından standartlaştırılmış ve ANSI tarafından onaylanmıştır. IES formatı avrupa dahil ABD dışında da kullanılmaktadır. EULUMDAT, Stockmar (1990) tanınmış bir standardizasyon kuruluşu tarafından tanımlanmamasına rağmen fiilen endüstri standardı olduğu için Avrupada yaygın olarak kullanılmaktadır.



Şekil 2.21. C düzlemleri / γ açıları (Bommel, 2015).

Tasarımı yapılacak olan armatür 3 profilden oluşmaktadır. Bu profillerden ilki ışığı yanlara doğru yayacak form olup $C0^\circ$ – $C180^\circ$ düzlemindeki ışık dağılım eğrisini

oluşturmaktadır. İkincisi ışığı öne ve arkaya doğru yayacak olan form olup C90°-C270° düzlemindeki ışık dağılım eğrisini meydana getirmektedir. Üçüncüsü ise ışığın yol düzleminde şekillenmesinde etkili olan diğer profillere taban teşkil eden formdur. Profiller arasına hesap yoluyla atılabilecek ek formlar daha doğru yüzey formlarının elde edilmesini sağlayabilirler. Bir armatürün ışık dağılımı eğrisi o armatür tarafından yayılan ışık akısının kendi etrafındaki boşlukta çeşitli yönlerde nasıl dağıldığını tanımlar. Armatürün ışığını yaydığı tüm yönlerde ışık şiddeti oluşmaktadır. Bu nedenle ışık şiddeti eğrisi ışık yoğunluğu dağılımı olarak da adlandırılabilir (Toy, 2015). Şekil 2.22’de bir armatürden yayılan ışığa ait ışık dağılımı gösterilmiştir. Oklar ise çeşitli yönlerdeki ışık şiddetlerini temsil etmektedir.



Şekil 2.22. Bir armatürün ışık dağılımı (Bommel, 2015).

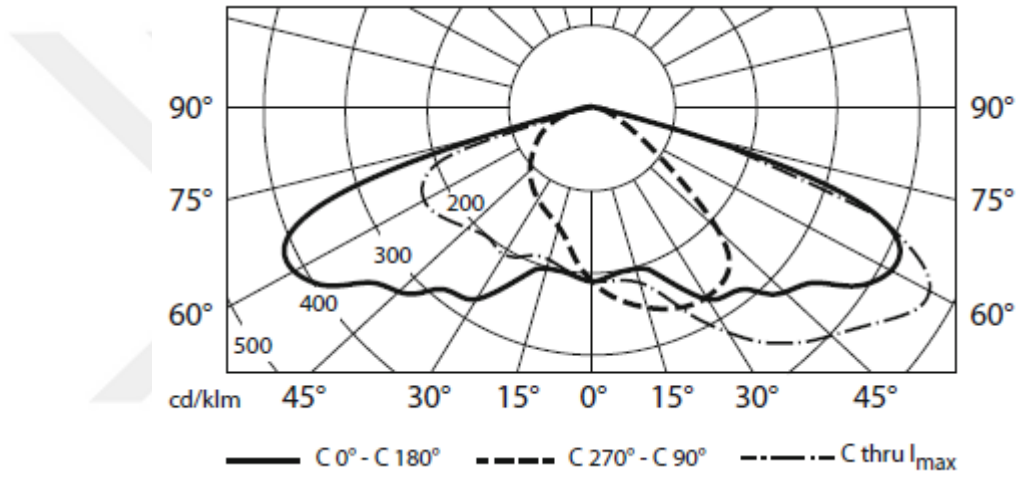
Bir armatürün ışık dağılımını şekillendiren optik cihazlar ışığı emer. Bu nedenle, armatürün toplam lümen çıkışı armatürde bulunan lambanın veya lambaların lümen çıkışından daha düşüktür.

$$\eta = (\Phi_{\text{armatür}}) / \Phi_{\text{lamba}} \quad (2.10)$$

Denklem 2.10’da ışık çıkışı oranı (η) verilmiştir. Bu değer armatürün toplam lümen çıkışının lambanın veya lambaların lümen çıkışı oranına eşittir. Bir armatürün ışık çıkışı oranı ‘armatür verimliliği’ olarak adlandırılır. Verimli bir aydınlatma armatürü lambadan gelen ışığı ihtiyaç duyulan alana verimli bir şekilde getiren bir ışık dağılımına sahiptir. Son derece yüksek ışık çıkışı oranına sahip ancak uygun olmayan bir ışık dağılımına sahip bir armatür verimli değildir. Yol aydınlatma armatürleri kalitelerine ve amaçlandıkları uygulama alanına göre 0.65 ile 0.90 arasında değişen ışık çıkışı oranlarına sahiptir. Işık çıkışı oranı bazen düz ışık çıkışı oranına ek olarak,

yukarı ve aşağı yöne doğru olan ışık çıkışı oranı olarak da verilebilir. Yukarı doğru ışık çıkışı oranı ne kadar düşüğe rahatsız edici gökyüzü parlaması o kadar düşük olacaktır.

Şekil 2.23’de bir yol aydınlatma armatürü için polar ışık şiddeti diyagramı örneği verilmiştir. $C_{270^{\circ}-C_{90^{\circ}}$ düzleminde ışık dağılımının asimetrik olduğu açıkça görülmektedir. Yol tarafına doğru daha fazla ışık yayılmaktadır. Işığın yola paralel yönde ne kadar iyi dağıtıldığı ise $C_{0^{\circ}-C_{180^{\circ}}$ düzlemindeki eğriden görülebilir. Aynı eğri aydınlatma armatürünün oluşturduğu parlamanın nasıl olabileceğine dair bir fikir verebilir.



Şekil 2.23. Bir yol aydınlatma armatürü için polar ışık şiddeti diyagramı örneği (Bommel, 2015).

2.6.4 Aydınlatmada enerji tasarrufu

Aydınlatma alanındaki enerji tasarrufu, görsel performans ve konfordan ödün vermeden gerekli minimum seviyede aydınlık düzeyleri oluşturarak en yüksek enerji değerlerine ulaşmayı amaç edinmelidir. Bu tasarruf yetersiz aydınlatma yapılarak sağlanamaz. Çünkü yoldaki yetersiz aydınlatma, güvenlik ve konfor açısından gerekli olan aydınlatma kalitesini azaltacak ve trafik kazalarına sebebiyet verecektir. Kaliteli bir aydınlatma yaratarak enerji tasarrufu sağlamak için izlenecek yollar şu şekilde olmalıdır (DFI, 2014);

- Uluslararası standartlara uygun aydınlatma kriterleri belirlenmelidir,
- Işık kaynağı seçimleri en yüksek lümen/Watt oranına göre yapılmalıdır,

- Daha az kayıplı bileşenler kullanılmalıdır,
- Lambaların ve armatürlerin periyodik olarak bakımları yapılmalıdır,
- Uygun aydınlatma tasarımı yapılmalıdır,
- Alternatif aydınlatma bileşenleri kullanılmalıdır,
- Aydınlatma gerek duyulan zamanda ve gerektiği kadar yapılmalıdır.



3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1 Optik Modelleme ve Simülasyon

Bu bölümde TEDAŞ'ın teknik şartnamesinde M1-M2 kategorisi için tanımlanan yol aydınlatma sınıflarına uygun, standart aydınlatma ihtiyacını karşılayacak ve yüksek enerji verimli prototip LED'li yol aydınlatma armatürünün optik tasarım aşamaları sunulmuştur.

LED ışık kaynağından çıkan ışıkları yüksek bir verimle ve doğru açılarla yansıtarak merceğe iletme işi reflektörün görevidir. Merceğin görevi ise reflektörden yansıyan ve LED ışık kaynağından doğrudan gelen ışıkları aydınlatılmak istenen bölgeye homojen ve kayıpsız bir şekilde iletmektir. Bu durumda, armatür etkinliğini etkileyen en önemli faktörün bölge dışına saçılan ışıklar olduğu anlaşılmaktadır. Dolayısıyla LED ışık kaynağından çıkan ışıkların yüksek bir verimle aydınlatılacak bölgeye homojen bir şekilde iletilmesini sağlayacak optik tasarım faaliyetleri armatür etkinlik faktörünü önemli derecede etkileyecektir. Bu da dolaylı olarak enerji tüketim maliyetini etkileyecektir.

Çalışmada; öncelikle olarak ihtiyaca uygun 'mercek' tasarımı planlanmıştır. Mercek, SolidWorks ve LightTools yazılım programı kullanılarak tasarlanmıştır. Tasarlanan mercek 'step dosyası' yardımı ile LightTools programına aktarılmıştır. Optik tasarım ihtiyacı LightTools aydınlatma hesap programı kullanılarak karşılanmıştır.

İkinci aşama olarak, uygun COB LED paketi seçilmiş ve tasarlanan mercek LED paketi üzerine monte edilmiştir. Bunun için 20'den fazla deneme yapılmış ve en iyi aydınlanma dağılımını veren sonuca bu tez çalışmasında yer verilmiştir. Işık kaynağı olarak 'Cree CXA-1830 4000 K' kullanılmıştır.

3.2 LightTools Aydınlatma Tasarım Yazılımı Hakkında

LightTools; aydınlatma optiklerini tasarlama, analiz etme, optimize etme ve sunma gibi olanaklar sağlayan aydınlatma tasarımı programlarından biridir.

LightTools optik tasarım programı kullanılarak (Synopsys, 2015);

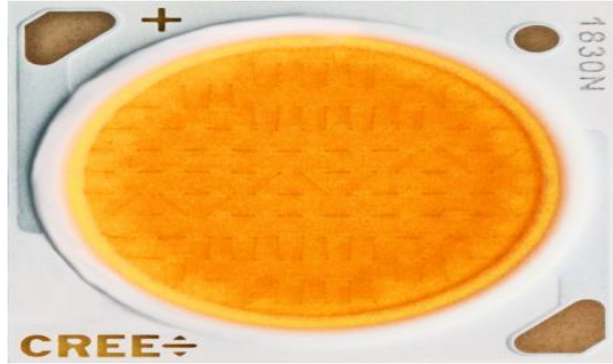
- Tam optik hassasiyetle akıllı sistem modellemesi yapılabilir,
- Optik davranışların hızlı değerlendirilmesi için etkileşimli bas ve çek ışın izleme imkanı sunar,
- Model performansını otomatik olarak artıran tam entegre aydınlatma optimizasyonu sunar,
- Karmaşık optik yüzeyleri ve elemanları modellemek için özel, sağlam özellikleri mevcuttur,
- Tasarım bütünlüğünü korumak için verimli model parametre yönetimine sahiptir,
- Etkileşimli ve akıllı kullanıcı arayüzü mevcuttur,
- Model kütüphaneleri, kaynaklar, yüzey kaplamaları, kaplamalar, filtreler ve uygulamaya yönelik tasarım kurulumunu hızlandıran yardımcı programlara sahiptir,
- Tasarım görevi otomasyonu için özel çözümler sunar,
- Sorunsuz bilgi paylaşımı için CAD yazılımı ile birlikte çalışabilirliği gibi olanaklar sunmaktadır.

Programda ışık kaynağı kütüphanesi, malzeme ve yüzey tanımlama gibi bir takım özellikler bulunmaktadır. LightTools programının üreticisi Lighttec firmasıdır. Firmanın anasayfasından ve LightTools programı kaynak kütüphanesinden ya da farklı LED üreticisi firmaların anasayfalarından yalnızca LED veya LED+mercek modül örneklerine erişebilmek mümkündür. Birçok farklı malzeme üreticisinin ürün dosyalarına (.ies, .ldt, .ray, vb.), ışık kaynaklarına ait 2D ve 3D modellere portaldan ulaşılabilir.

3.3 Çalışmada Kullanılan COB LED'in Seçimi ve Özellikleri

SolidWorks ve LightTools programları kullanılarak tasarlanan 'konkav-konveks mercekle', farklı firmaların üretimi olan COB LED'ler üzerine monte edilerek ışık dağılım eğrileri elde edilmiştir. Farklı çalışmalar sonrasında en uygun ışık dağılımını veren COB LED paketi bu çalışmada kullanılmıştır (Şekil 3.1). Bu çalışmada ışık kaynağı seçimindeki temel kriter; M1 ve M2 kategorisinde tanımlanan yol aydınlatma sınıflarına uygun, standart aydınlatma ihtiyacını karşılayacak, yüksek

enerji verimli bir COB LED olmasıdır. Seçilen LED'ler fotometrik ve elektriksel parametreleri açısından değerlendirilmiş ve kriterlere en uygun olanı seçilmiştir.



Şekil 3.1. Cree® XLamp® CXA1830 COB LED (URL-6).

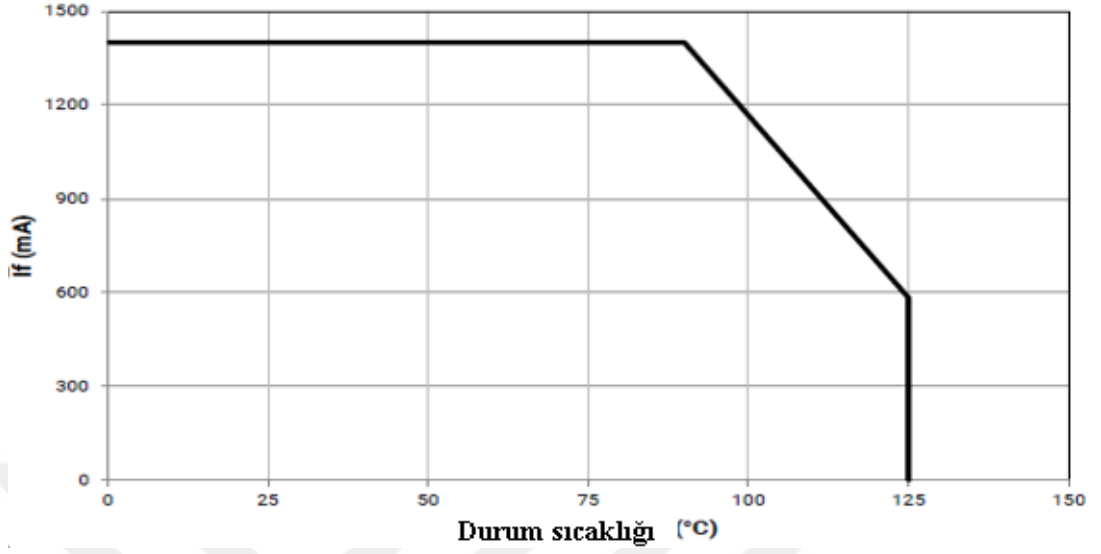
Işık kaynaklarına LightTools programının kaynak kütüphanesinden ve ışık kaynağı üreticilerinin internet adresinden de ulaşılabilir. LED çiplerde eklem bölgesinde meydana gelen ısıdan kaynaklı bozulmalar; ışık akısı, aydınlık düzeyi, ışık şiddeti gibi aydınlatma parametrelerini etkileyeceği için LED kaynak seçimine ve kaynağın termal iletkenliğine dikkat edilmelidir. Çizelge 3.1’de ışık kaynağına ait karakteristik özelliklere yer verilmiştir.

Çizelge 3.1. LED’in özellikleri.

Özellikler	Birim	Minimum	Tipik	Maksimum
Görüş açısı	Derece		115	
Dayanım gerilimi	V			8000
DC ileri akım	mA			1400*
Ters akım	mA			0.1
İleri voltaj (800 mA, 85 °C)	V		36.4	
İleri voltaj (800 mA, 25 °C)	V			42

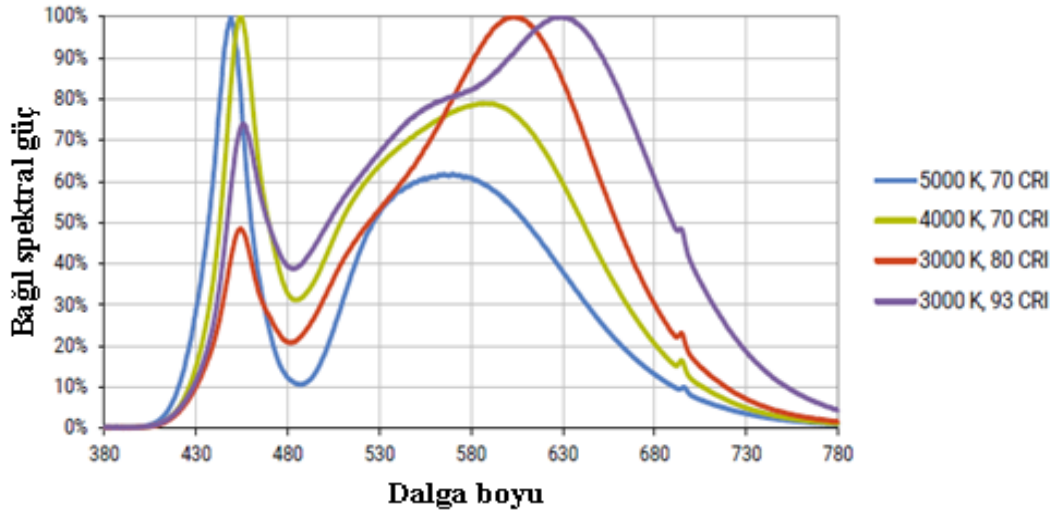
CXA-1830'un maksimum akım değeri LED'in sabit durum çalışması altında termal dengeye ulaştığındaki kasa sıcaklığına (T_c) bağlıdır. Şekil 3.2'deki grafikte sistem tasarımında iyi bir termal yönetim kullanıldığı varsayılmaktadır. Zayıf termal yönetim durumunda ise bu grafik değişebilmektedir. İyi bir termal yönetimde bir

diğer önemli faktör ışık yayan yüzeyin (LES) sıcaklığıdır. Cree optimum LED ömrü sağlamak için maksimum 135°C LES sıcaklığı önermiştir.



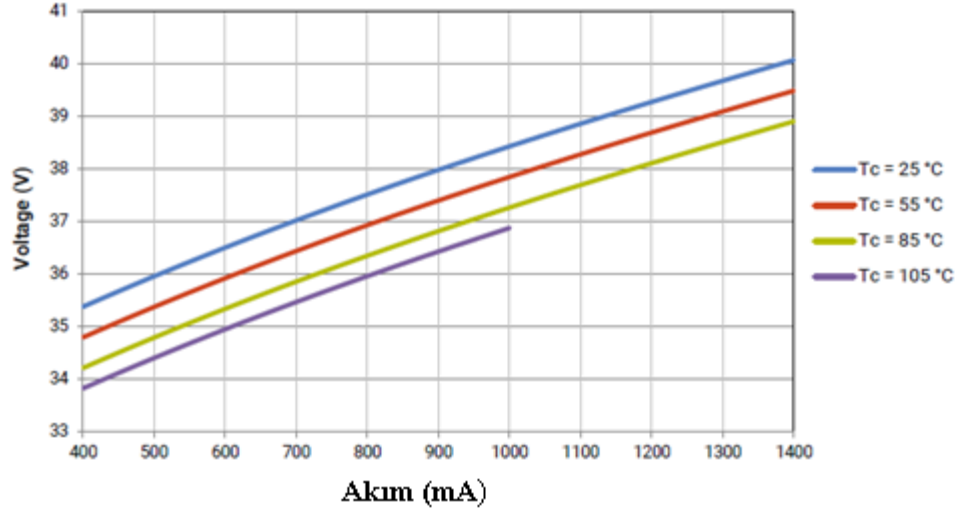
Şekil 3.2. Durum sıcaklığı.

Şekil 3.3'te farklı sıcaklık ve renk dönüşüm endeksi altında LED'e ait spektral güç dağılımı grafiği verilmiştir.



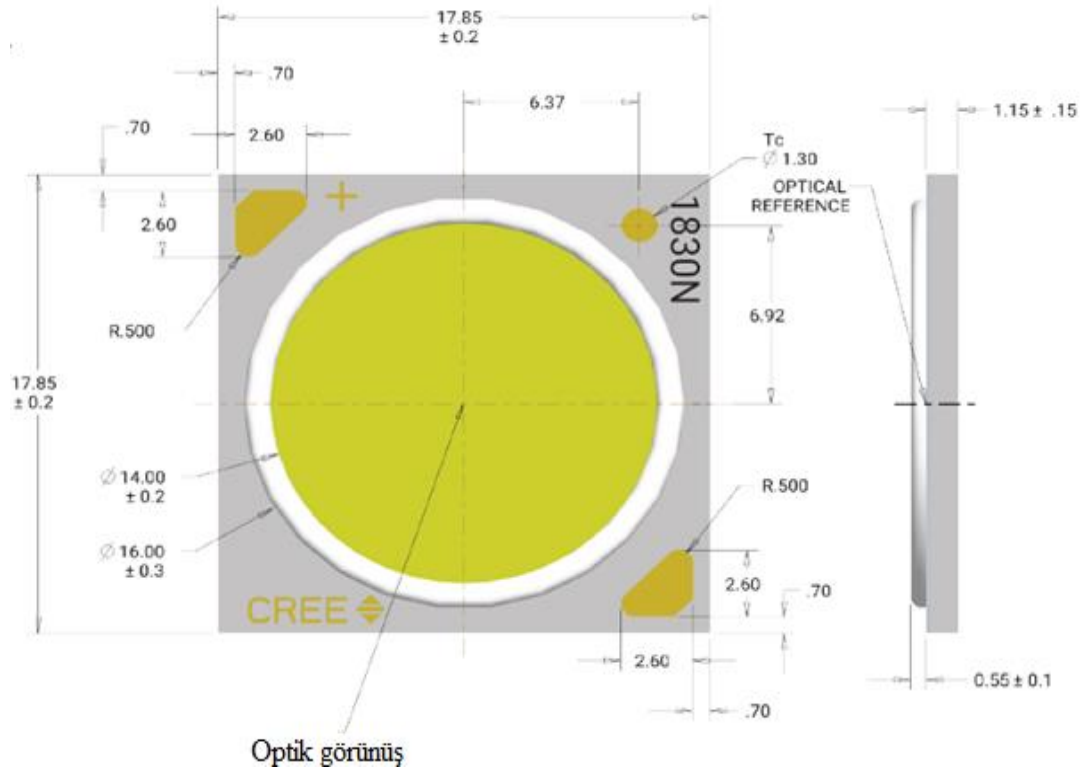
Şekil 3.3. Bağıl spektral güç dağılımı ($I_f = 800$ mA ve $T_j = 85$ °C'de bir dizi darbeli ölçümün sonucudur).

Bir dizi kararlı ölçüm sonucuna ait akım-voltaj grafiğine Şekil 3.4'de yer verilmiştir. LED çipinin ölçüleri mm cinsinden hesaplanmış ve aksi belirtilmedikçe hata payı ± 13 olarak alınmıştır.



Şekil 3.4. Elektriksel özellikler.

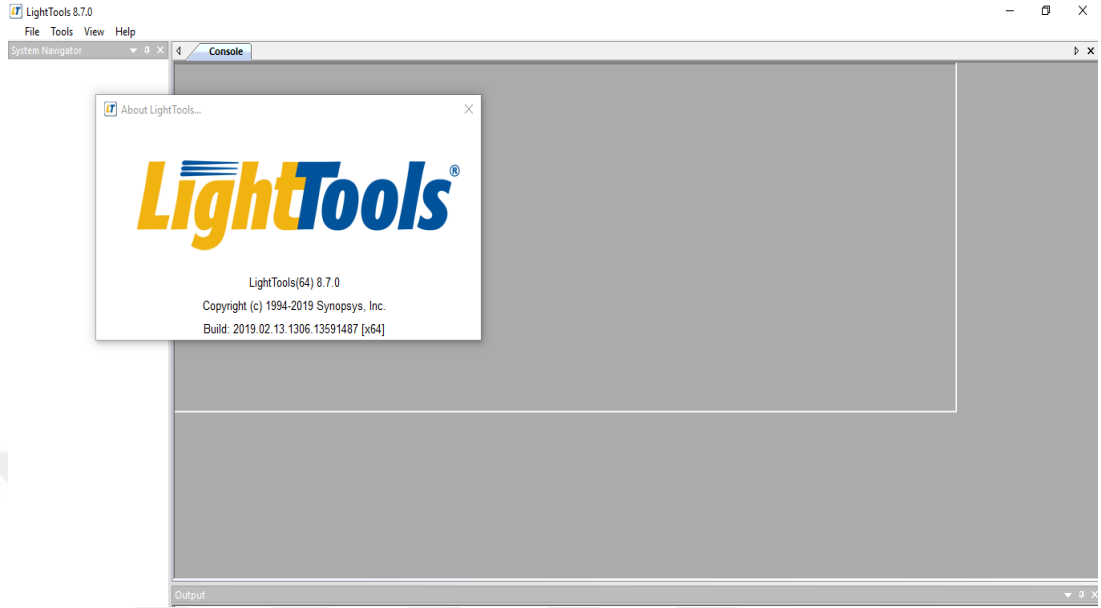
Şekil 3.5’de LED’e ait mekanik ölçüler verilmiştir.



Şekil 3.5. Mekanik ölçüler.

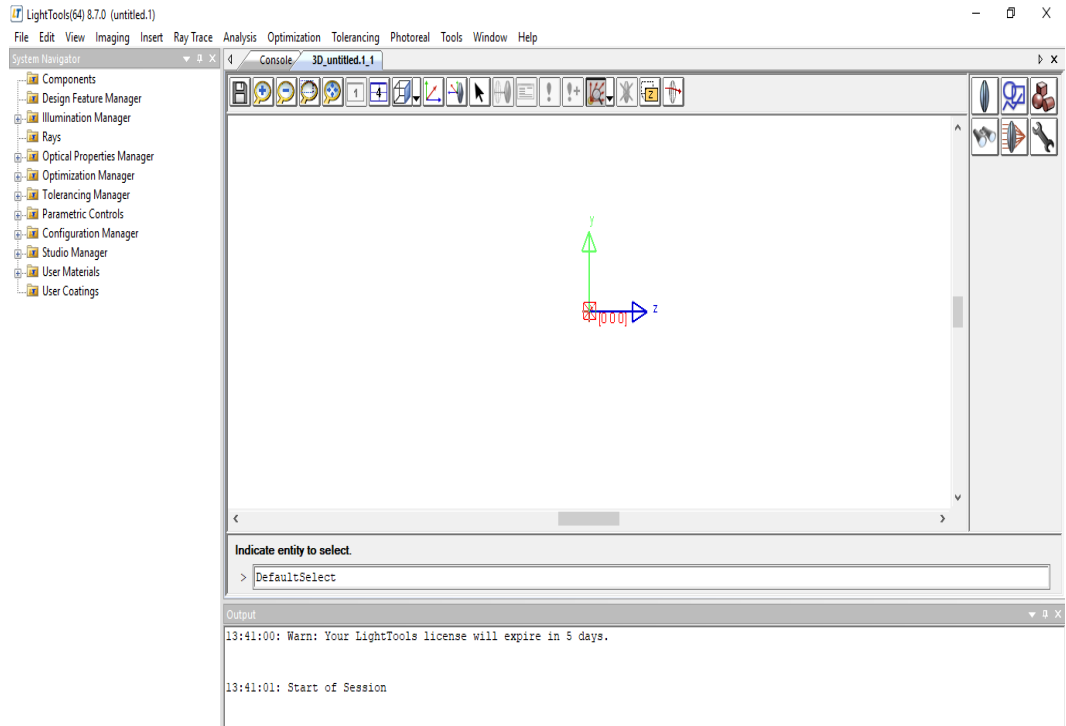
3.4 Optik Tasarım Süreci

Şekil 3.6’da LightTools programının karşılama penceresi gösterilmiştir.



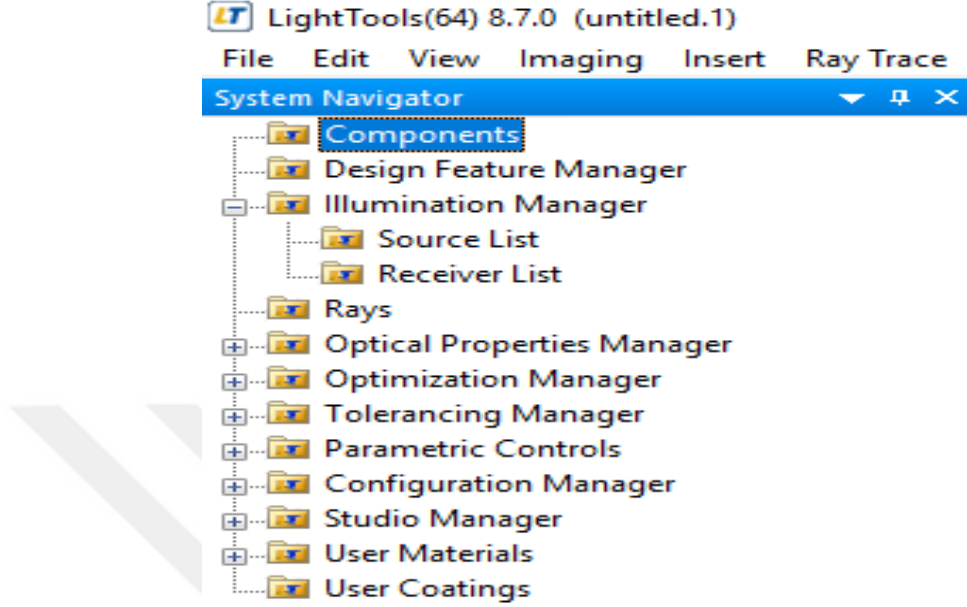
Şekil 3.6. LightTools karşılama penceresi.

Program başlatıldığında üzerinde 3 boyutlu çalışmanın yapılacağı boş bir aktivasyon alanı tanımlanmıştır (Şekil 3.7).



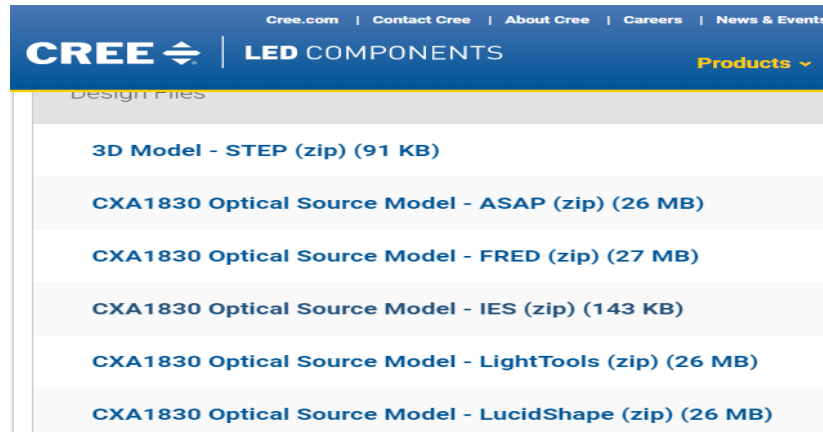
Şekil 3.7. LightTools programı aktivasyon alanı.

Ekranın sol kısmında yer alan ‘System Navigator’ sekmesi altında yer alan ‘components’ sekmesinde; reflektör ve mercek gibi ‘step dosyası’ ile eklenen elemanlar yer almaktadır (Şekil 3.8).



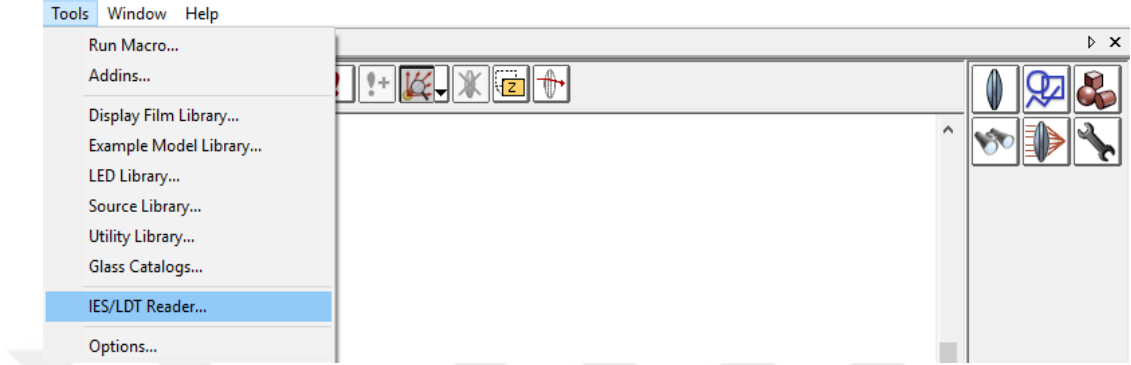
Şekil 3.8. ‘System Navigator’ sekmesi.

Cree firmasına ait ürün portalı üzerinden istenen kriterlere uygun LED (CXA1830) seçilerek LightTools (zip) adlı dosya indirilir. İçerisindeki ‘.ies’ uzantılı dosya kaydedilir. Şekil 3.9’da LED’in farklı programlarda kullanılabilirliği görülmektedir.



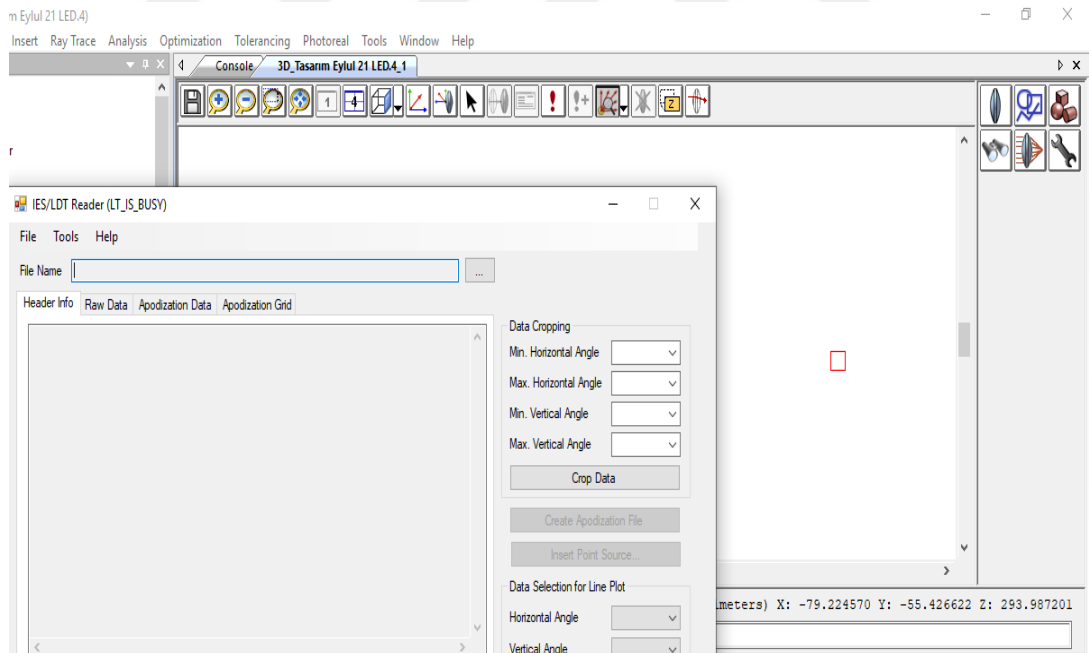
Şekil 3.9. Mevcut tasarım dosyaları.

LightTools programı kaynak kütüphanesi içerisinde istenilen kriterlere uygun LED bulunamadığı için standartları karşılayabilecek LED'e firmaların ürün portalı üzerinden ulaşılmıştır. 'Tools-IES/LDT Reader' sekmesi ile LED'e ait '.ies dosyası' programa aktarılmıştır (Şekil 3.10).



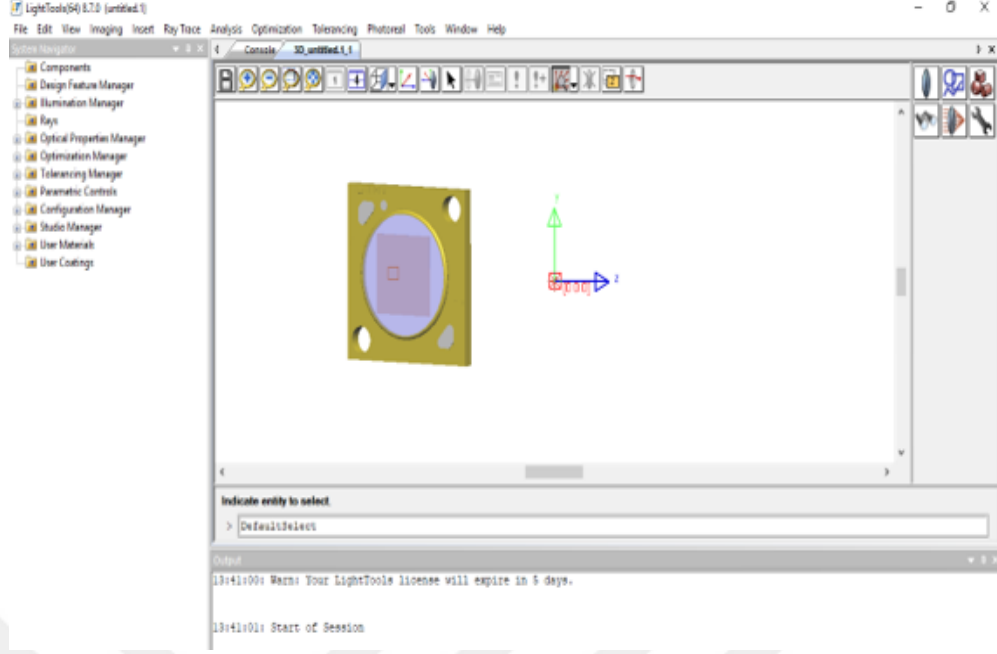
Şekil 3.10. 'IES reader' sekmesi.

Şekil 3.11'de yer alan 'Insert Point Source' sekmesi kullanılarak LED ışık kaynağı programa aktarılmıştır.



Şekil 3.11. LED'e ait fotometrik dosya.

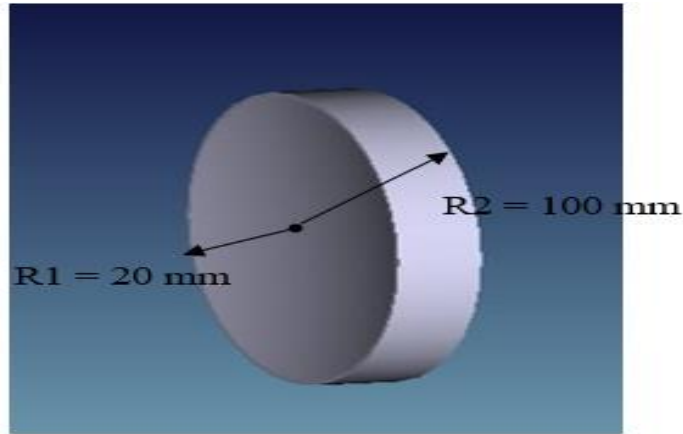
LED çipinin program üzerinde 3 boyutlu görünümü Şekil 3.12'de gösterilmiştir.



Şekil 3.12. LED'in LightTools görünümü.

3.4.1 Mercek özellikleri

300 mm odak uzaklığında, radyusları yaklaşık $R_1 = 20$ mm ve $R_2 = 100$ mm olan, 3-4 mm kalınlığında, çapı 18 mm olan, BK7 camından ya da PC malzemeden oluşan 'negatif menisküs' bir mercek tasarlanmıştır (Şekil 3.13). Mercek-LED arası uzaklık sırayla 10-12-14 mm'ye ayarlanarak simülasyon gerçekleştirilmiştir.



Şekil 3.13. Konkav-konveks mercek.

BK7 optik borosilikat kron cam, erimiş Silis'in ilave faydaları gerekmediğinde kullanılan yüksek kaliteli bir optik camdır. BK7 camı tüm kimyasal testlerde iyi performans gösterdiğinden ve ek veya özel işlem gerektirmediğinden üretim maliyeti

düşüktür. Son derece düşük kabarcık içeriğine sahip nispeten sert bir malzemedir. Ayrıca görünür ve kızılötesi spektrumların yakınında ve ultraviyole bölge içinde 350 nm'ye kadar mükemmel iletim sağlar. Tüm standart optik cam bileşenlerinde yüksek kaliteli BK7 optik camı kullanır. BK7 camının (Anonim, 2018);

- Mükemmel optik kalite sunma,
- Görünürde düzgün iletim sağlama,
- Neredeyse kabarcık ve kapanım içermeme,
- Berrak renksiz görünüm sunma,
- Çok yüksek kırılma indisine sahip olma,
- Yüksek saflıkta hammadde içerme gibi özellikleri vardır.

N-BK7, SCHOTT tarafından üretilen ve oldukça saf olan evrensel optik bir camdır. Özellikle görünür spektrumda yüksek kaliteli optikler üretmek için kullanılan standart cam türlerinden biridir.

Polikarbonat plastikler darbeye dayanıklı, transparan yüzeyleri sebebi ile cama alternatif olarak kullanılmasının haricinde daha sağlam ve dayanıklı materyallerin yapımında da kullanıldığı için 'mühendislik plastiği' olarak nitelendirilmektedir.

- İlk olarak $R_1 = 65$ mm, $R_2 = 100$ mm,
- İkinci olarak $R_1 = 40$ mm, $R_2 = 100$ mm,
- Daha sonra $R_1 = 30$ mm, $R_2 = 100$ mm boyutlarında çalışma yapılmıştır.

Son olarak $R_1 = 20$ mm, $R_2 = 100$ mm radyusları ile daha iyi sonuç elde edilmiştir. Yolun boyuna kısmında ($C0^\circ$ – $C180^\circ$) ışık yoğunluğu dağılımının standart değerleri sağladığı görülmüştür. Ancak, yolun enine kısmında ($C90^\circ$ – $C270^\circ$) ışık yoğunluğu dağılımı kaldırım tarafına kayarak istenmeyen sonuç elde edilmiştir.

Eğrilik yarıçapı (radyus) $R_1 = 20$ mm, $R_2 = 100$ mm olan konkav-konveks mercek tasarlanmıştır.

$$\frac{1}{f} = \left(\frac{n_1}{n_0} - 1 \right) \cdot \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) \quad (3.1)$$

Denklem 3.1'deki bağıntıya göre, merceklerin odak uzaklığı yüzeylerin eğrilik yarıçaplarıyla (R_1 ve R_2) doğru, merceğin kırılma indisi (n_m) veya yoğunluğu ile ters orantılıdır.

Merceğin gücü (yakınsama); $Y = 1/f$ ile hesaplanır. Odak uzaklığı yerine eğrilik yarıçapı alındığında;

$$Y_1 = 1/20 = 0.05 \text{ diyoptri (mm}^{-1}\text{)}$$

$$Y_2 = 1/100 = 0.01 \text{ diyoptri (mm}^{-1}\text{) elde edilir.}$$

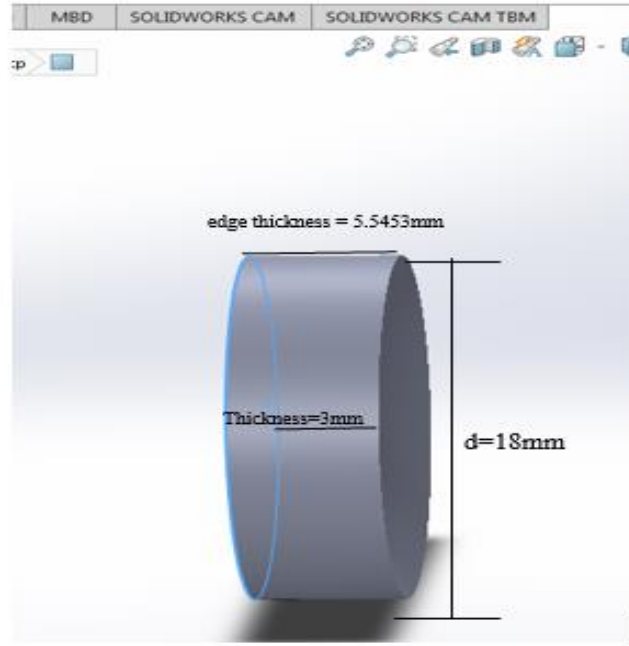
Farklı odak uzaklığına sahip merceklerin birleşmesiyle oluşan mercek sisteminin yeni odağı;

$1/f_{\text{sis}} = 1/f_1 + 1/f_2 + \dots$ ile hesaplanırken, yakınsaması yani gücü; $Y = Y_1 + Y_2 + \dots$ olur.

Radyus azaltılarak (65, 40, 30, 20) güç artırılmıştır.

Radyus ile eğrilik ters orantılıdır, biri arttıkça diğeri azalmaktadır. Eğer merceğin kırma indisi ortamın kırma indisinden büyük ise bu merceğin yüzeyi eğildikçe yani eğrilik yarıçapı küçüldükçe ışık daha fazla kırılır. Bu durum karşısında kırılan ışının kendisi ya da ışının uzantısı merceğe daha fazla yaklaşır.

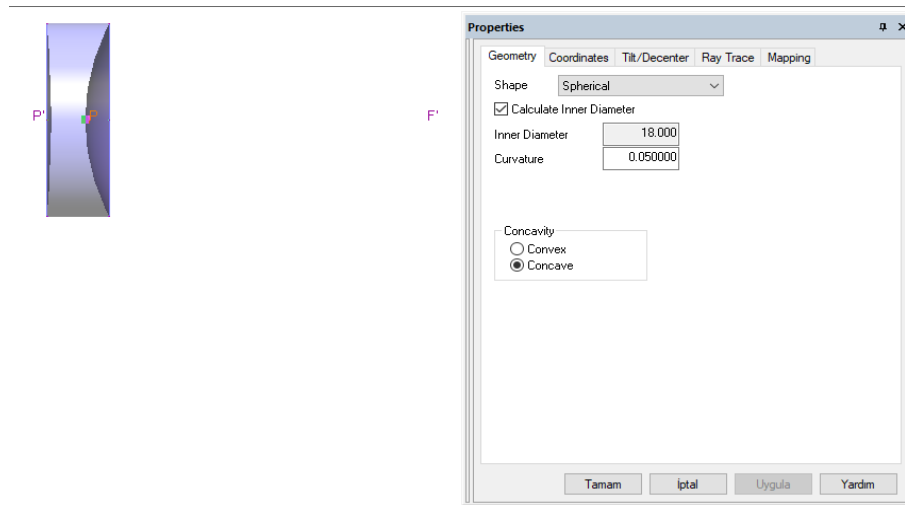
Şekil 3.14'de SolidWorks programında çizilmiş olan konkav-konveks merceğe ait görüntüye yer verilmiştir. Burada merceğin boyu, kalınlığı ve kenar kalınlığı ölçüleri sırasıyla; 18 mm, 3 mm ve 5.5453 mm olarak hesaplanmıştır.



Şekil 3.14. Merceğin SolidWorks programındaki görünümü.

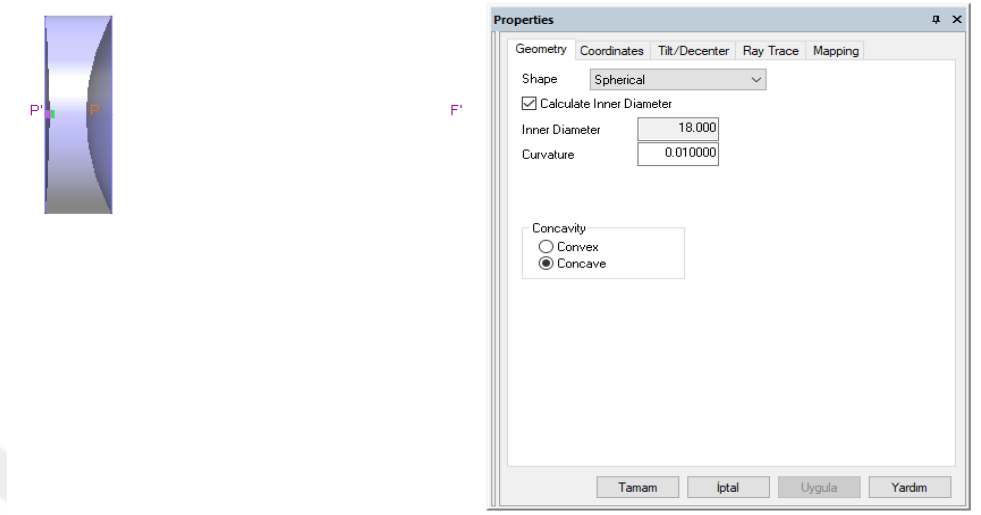
Kalın kenarlı mercek; optik eksene paralel gelen ışık ışınlarını gerçek odak olmaksızın ıraksayan ve dağıtan mercektir. Çukur mercek, ıraksak mercek, kalın kenarlı mercek, konkav mercek, negatif mercek, içbükey mercek ve dağıtıcı mercek olarak da adlandırılabilir.

LED ışık kaynağından çıkan ışınlar ilk olarak birinci yüzeyde yani eğrilik yarıçapı 20 mm olan konkav mercekte kırılmaya uğramaktadır. Şekil 3.15’de R_1 çaplı konkav merceğin türü, şekli, iç çapı, eğriliği gibi yüzey özellikleri verilmiştir.



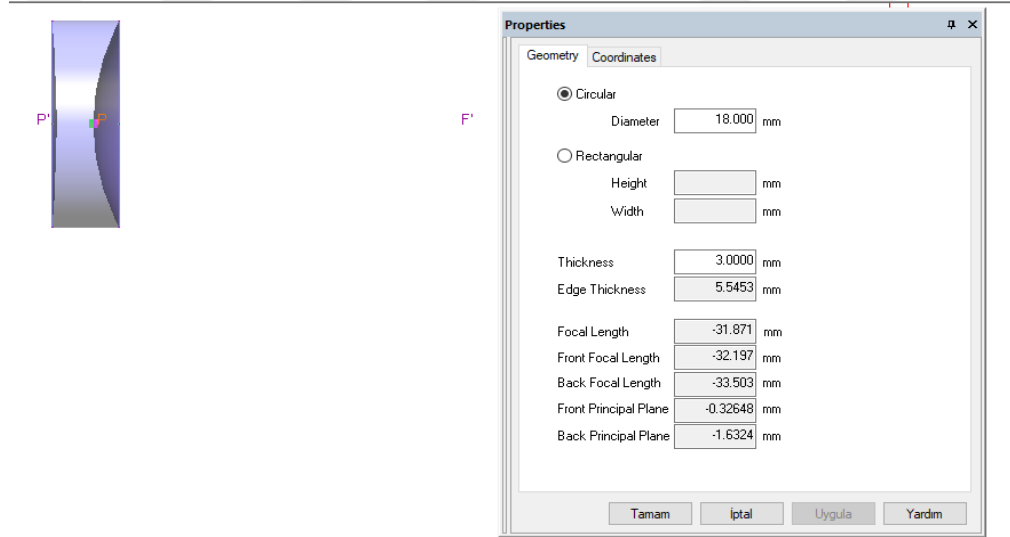
Şekil 3.15. R_1 yüzeyine ait özellikler.

İkinci olarak ışınlar, eğrilik yarıçapı 100 mm olan konkav mercekte kırılmaya uğrayarak belirlenen yol üzerinden geçerek gerekli aydınlatmayı sağlayacaktır. Şekil 3.16’de ikinci merceğe ait özellikler verilmiştir.



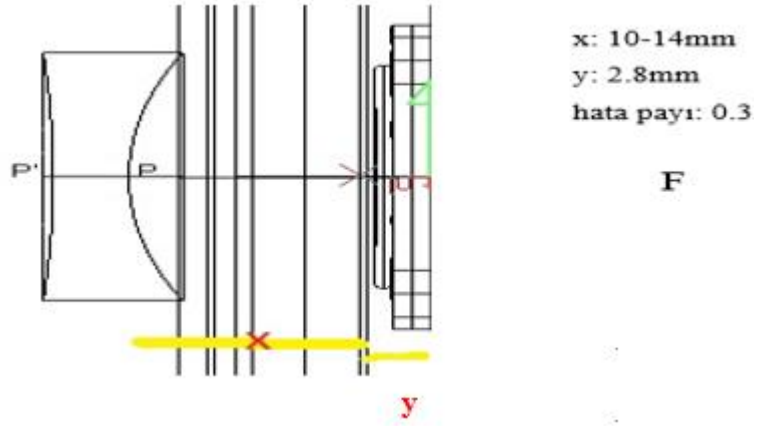
Şekil 3.16. R2 yüzeyine ait özellikler.

Merceğin kalınlığına, kenar kalınlığına ve boyuna ait ölçümler Şekil 3.17’de verilmiştir.



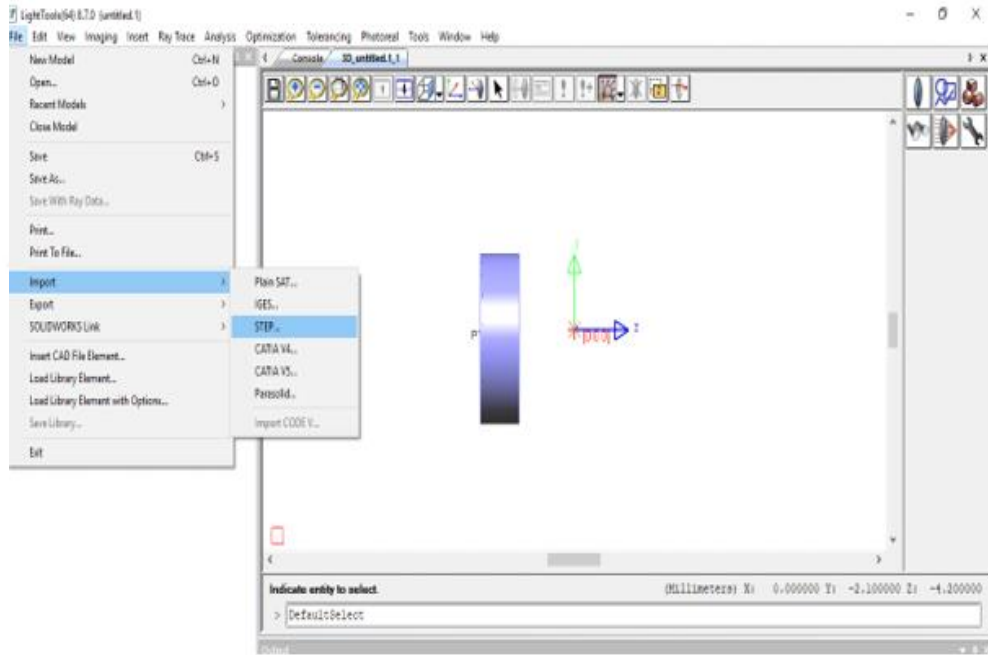
Şekil 3.17. Mercek özellikleri.

Şekil 3.18’da LED+mercek modülüne ait iskelet görünümüne yer verilmiştir. Merceğin iç yüzeyinin merkezi olan P noktası ile LED yüzeyi arası uzaklık x ile, LED kalınlığı ise y ile gösterilmiştir.



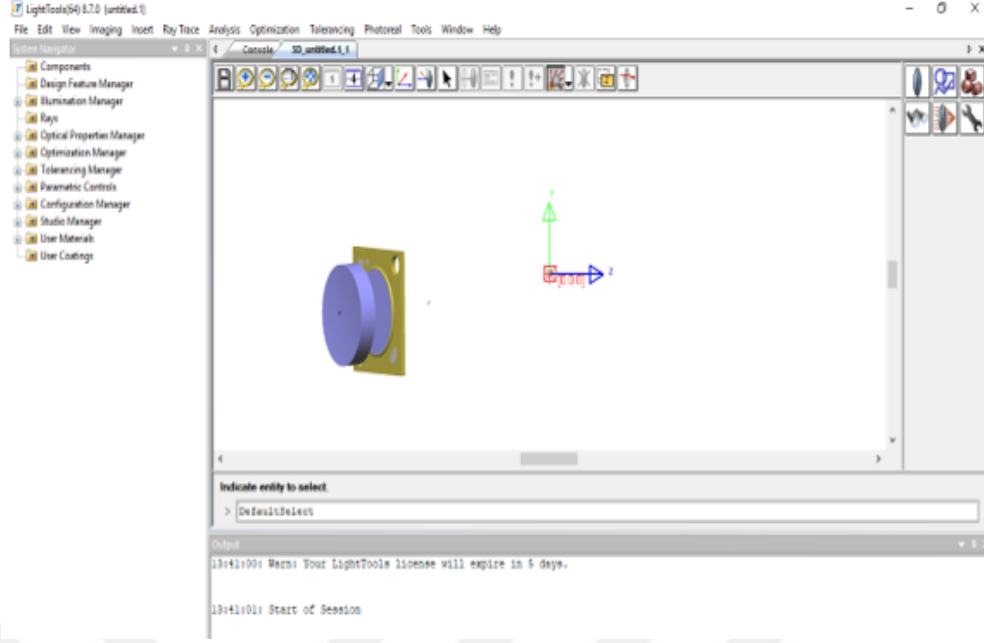
Şekil 3.18. LED+mercek modülüne ait iskelet görünüm.

SolidWorks’da tasarımı yapılan mercek ‘File-import’ sekmesi ile ‘.step dosyası’ olarak LightTools programına aktarılmıştır (Şekil 3.19).



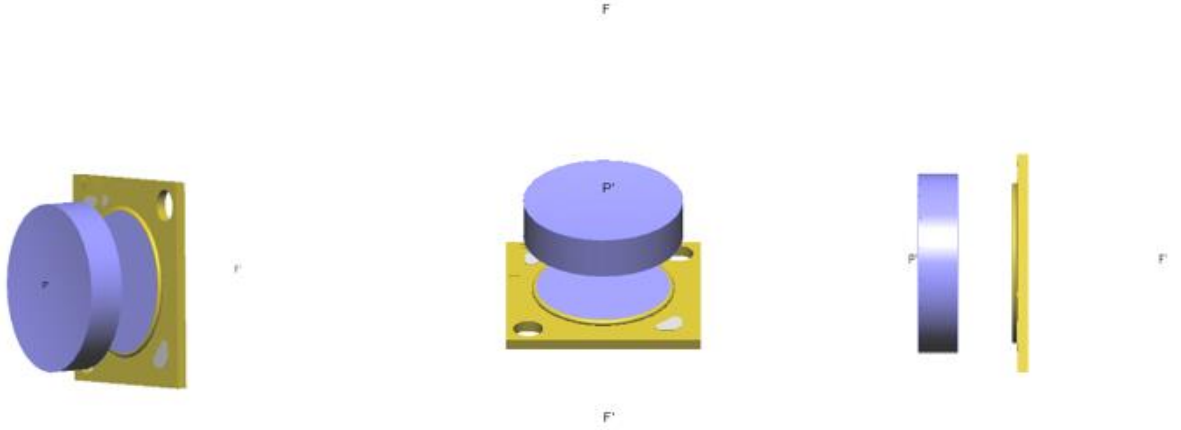
Şekil 3.19. Merceğin LightTools’da görünümü.

Programa aktarılmış olan modül Şekil 3.20’de yer almaktadır.



Şekil 3.20. LED+mercek modülüne ait görünüm.

Tek bir modüle ait yan yüzey görüntüleri, 20'li modüle ait görüntüler ve odak uzaklıkları Şekil 3.21 ve Şekil 3.22'de gösterilmiştir.

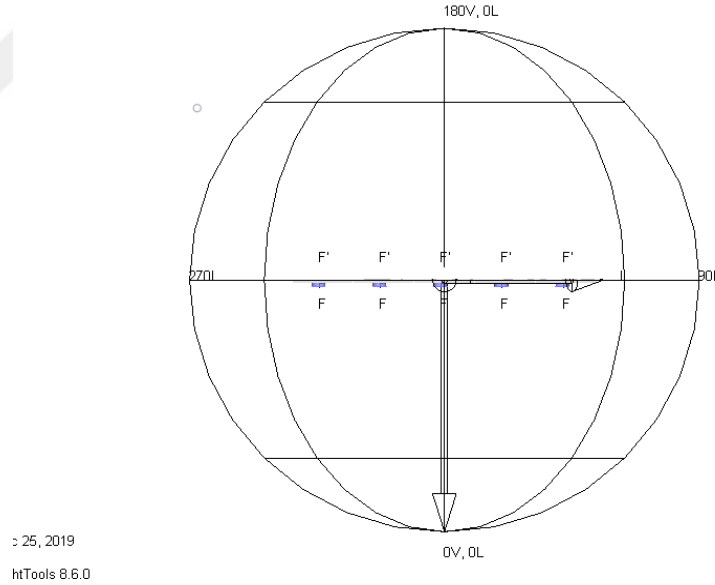


Şekil 3.21. LED+mercek modülüne ait yan yüzey görüntüleri.



Şekil 3.22. 5*4 LED+mercek modül.

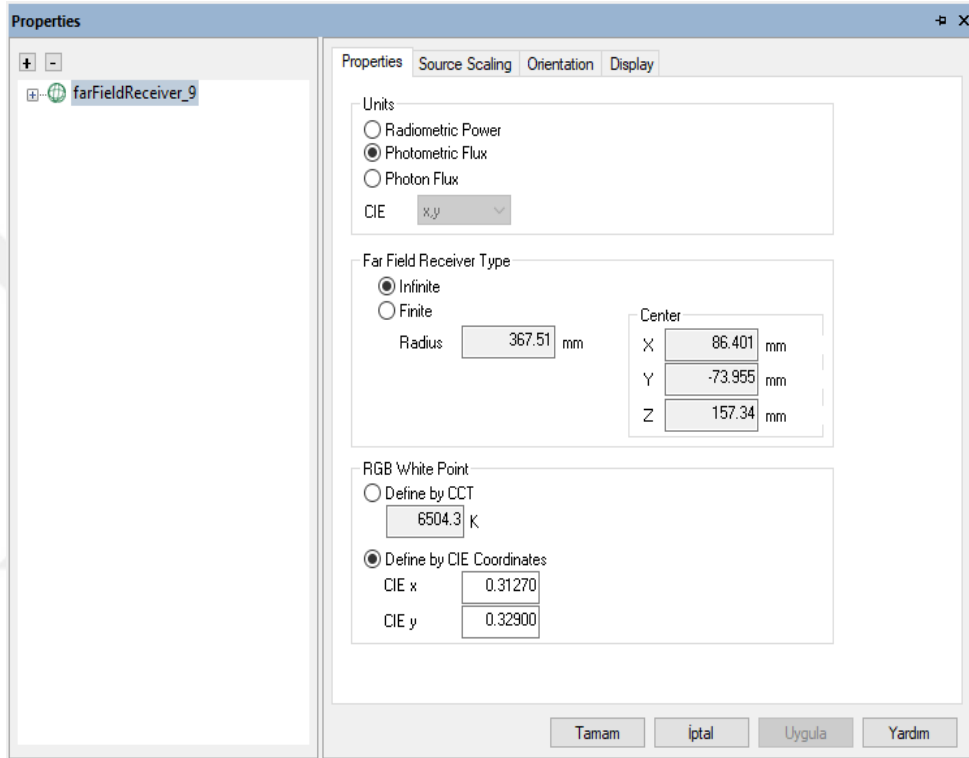
LED+mercek modülünden sonsuz uzaya yayılan ışık ışınlarını toplamak için ‘farfield receiver’ yani ‘uzak alan alıcısı’ kullanılmaktadır (Şekil 3.23).



Şekil 3.23. 5*4 LED+mercek+Farfield Receiver.

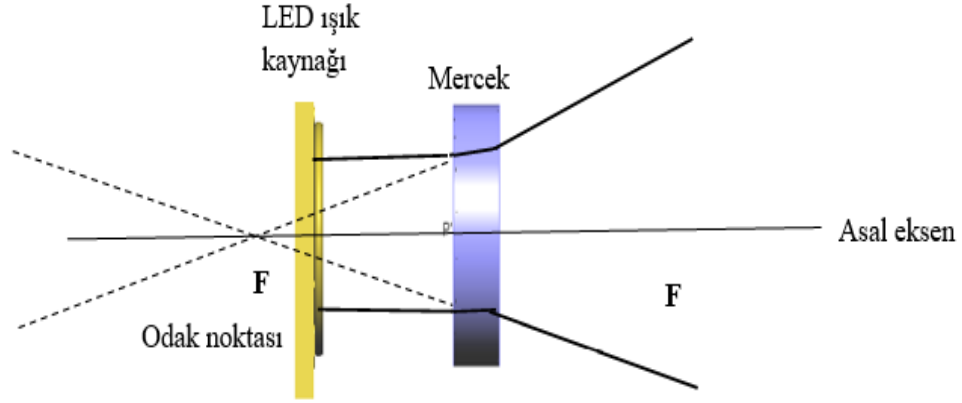
Sonsuz uzaydan toplanacak olan ışınlar için alıcı tipi ‘Infinite’ seçilmiştir. Işık çıktısı birimi olarak ‘lümen’ ya da ‘Watt’ tercih edilebilir (Şekil 3.24). 10 lm’lik iki lambanın watt değerleri farklı olabileceğinden dağılımı lümen cinsinden almak her zaman daha güvenilir sonuçlar verecektir.

Geleneksel aydınlatma ekipmanlarında ışık kaynağından çıkan ışığın ölçüsü güç ile tanımlanmaktadır. Işık kaynağının harcadığı güç ışık kaynağının yaydığı ışık miktarı ile belirtilmektedir. LED teknolojisinin gelişmesiyle ışık kaynağından yayılan ışık miktarı lümen ile ölçülmektedir. Gelişen teknoloji ile birlikte 1W'lık LED 50 lm ışık akısına sahipken 220 lm seviyelerine çıkmıştır. Bu sebepten güç değeri ile ışığı karşılaştırmak doğru olmayacaktır. Ayrıca iki farklı firmaya ait 20W değerindeki LED lambalar farklı ışık çıktısına sahip olabilirler.



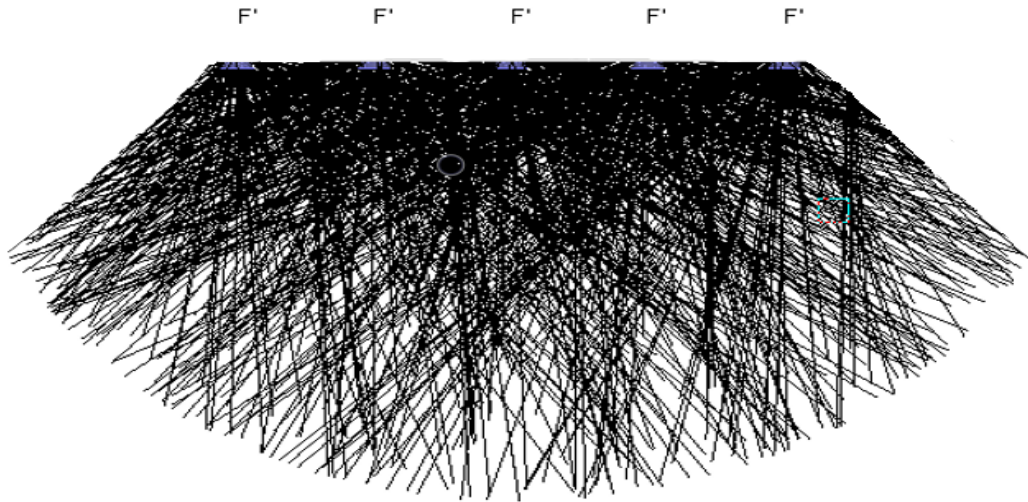
Şekil 3.24. Farfield Receiver özellikleri.

LED ışık kaynağından yayılan ve konkav bir merceğin asal eksenine paralel olarak gelen ışının uzantısının odak noktasından (f) geçtiğini ve sonrasında nasıl bir yol izlediği Şekil 3.25’de gösterilmiştir. Buna ışığın kırınım olayı denir.



Şekil 3.25. Konkav mercekte ışığın kırınımı.

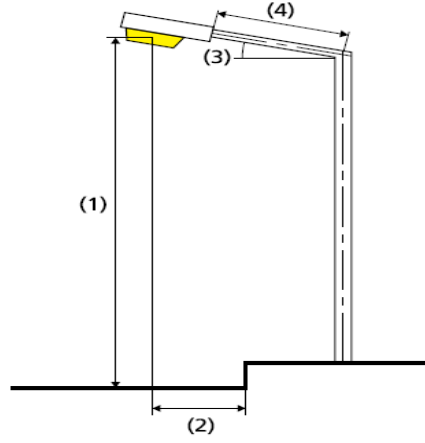
Şekil 3.26’de ise 20’li LED+mercek ile yaklaşık 2.500.000 ışınla gerçekleştirilen ışığın kırınım olayının önizlemesi gösterilmiştir.



Şekil 3.26. Işın ile önizleme.

3.4.2 Dialux kullanarak yol aydınlatma sisteminde direkler arası mesafenin optimizasyonu

Aydınlatma tasarımı aydınlatma ekipmanlarının seçimi ve yeri ile ilgilidir. Gerekli aydınlatma düşük maliyette elde edilmelidir. Farklı türlerde aydınlatma sistemleri ve armatürleri simüle etmek için farklı yazılım araçları bulunmaktadır. Bu çalışmada yol aydınlatmasında direk aralığını optimize etmek için Dialux yazılımı kullanılmıştır (Yawale vd., 2016). Şekil 3.27’de yol üzerinde bulunan bir armatürün aydınlatma düzeneği verilmiştir.



- 1: Işık noktası yüksekliği
- 2: Işıklık noktası sarkması
- 3: Taşıyıcı kol eğimi
- 4: Taşıyıcı kol uzunluğu

Şekil 3.27. Yol üzerinde bulunan bir armatürün aydınlatma düzeneği (URL-13).

Işıklık noktası sarkması değerine göre (0 ile +2 arasında), taşıyıcı kol uzunluğu otomatik ayarlanmaktadır.

3.4.3 M1 sınıfı için sınıf 2 kullanılarak elde edilen yol aydınlatma düzeni

Sınıf 2'ye ait yol düzeni;

- 3 adet gidiş, 3 adet dönüş yolu olmak üzere 6 şeritli yol üzerinde çalışma yapılmıştır. Şerit genişliği 3.5 m ve gidiş-dönüş yolları arasında 3 m genişliğinde refüj yapı vardır.

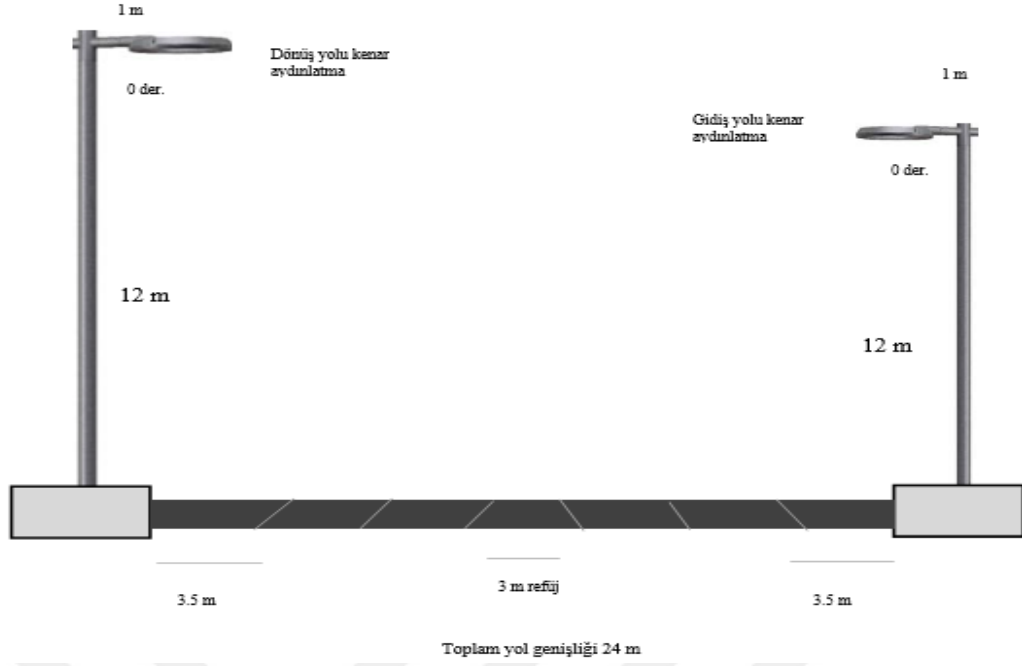
Aydınlatma tesisat düzeni;

- Yol kenarlarından karşılıklı kaydırılmış düzenek dikkate alınmaktadır. Direkler arası mesafe 40 m, direk yükseklikleri 14 ya da 12 m, direk konsol boyu 1 m, direk konsol açısı 0° seçilmiştir.

Aydınlatma sınıfı kriterleri;

- $L_{ort} \geq 2.00 \text{ cd/m}^2$ / $U_0 \geq 0.40$ / $U_1 \geq 0.70$ / $F_{TI} \leq 10$ / $R_{EI} \geq 0.35$

TEDAŞ teknik şartnamesinde yer alan M1-M2 sınıfı yollar için yol aydınlatma düzeni Şekil 3.28'de gösterilmiştir.



Şekil 3.28. M1-M2 sınıfları için yol aydınlatma düzeni (TEDAŞ, 2010).

3.4.4 M2 sınıfı için sınıf 5 kullanılarak elde edilen yol aydınlatma düzeni

Sınıf 5'e ait yol düzeni;

- 3 adet gidiş, 3 adet dönüş yolu olmak üzere 6 şeritli yol üzerinde çalışma yapılmıştır. Şerit genişliği 3.5 m ve gidiş-dönüş yolları arasında 3 m genişliğinde refüj yapı vardır.

Aydınlatma tesisat düzeni;

- Yol kenarlarından karşılıklı kaydırılmış düzenek dikkate alınmaktadır. Direkler arası mesafe 40 m, direk yükseklikleri 12 ya da 10 m, direk konsol boyu 1 m, direk konsol açısı 0° seçilmiştir.

Aydınlatma sınıfı kriterleri;

- $L_{ort} \geq 1.5 \text{ cd/m}^2$ / $U_0 \geq 0.40$ / $U_1 \geq 0.70$ / $F_{TI} \leq 10$ / $R_{EI} \geq 0.35$

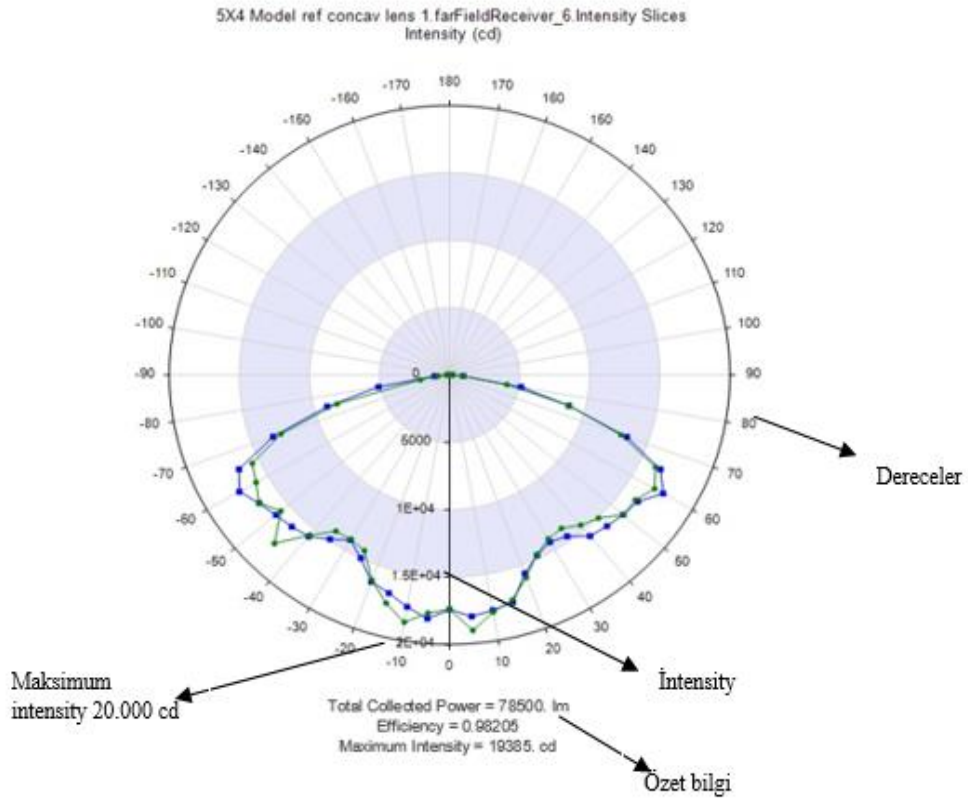
4. ARAŞTIRMA BULGULARI

4.1 Tasarım Simülasyonu

4.1.1 LED-Mercek arası uzaklık 10 mm iken LightTools simülasyon sonuçları

Programın sunmuş olduğu ve büyük avantaj sunan kullanım kolaylıklardan bir tanesi çalışmalarda kullanılan LED kaynağın lümen değerinin izin verilen sınırlar içerisinde değiştirilebiliyor olmasıdır. Bu çalışmada kullanılmış olan ‘Cree CXA-1830 COB LED’ ışık kaynağının izin verilen maksimum ışık akısı değeri 4000 lm olup, 20 LED için 80000 lm değeri belirlenmiştir.

Şekil 4.1’de LED-mercek arası uzaklık 10 mm iken LED modüle ait ışık dağılım eğrisi incelendiğinde elde edilen toplam ışık akısı değerinin 78500 lm olduğu görülmüştür.

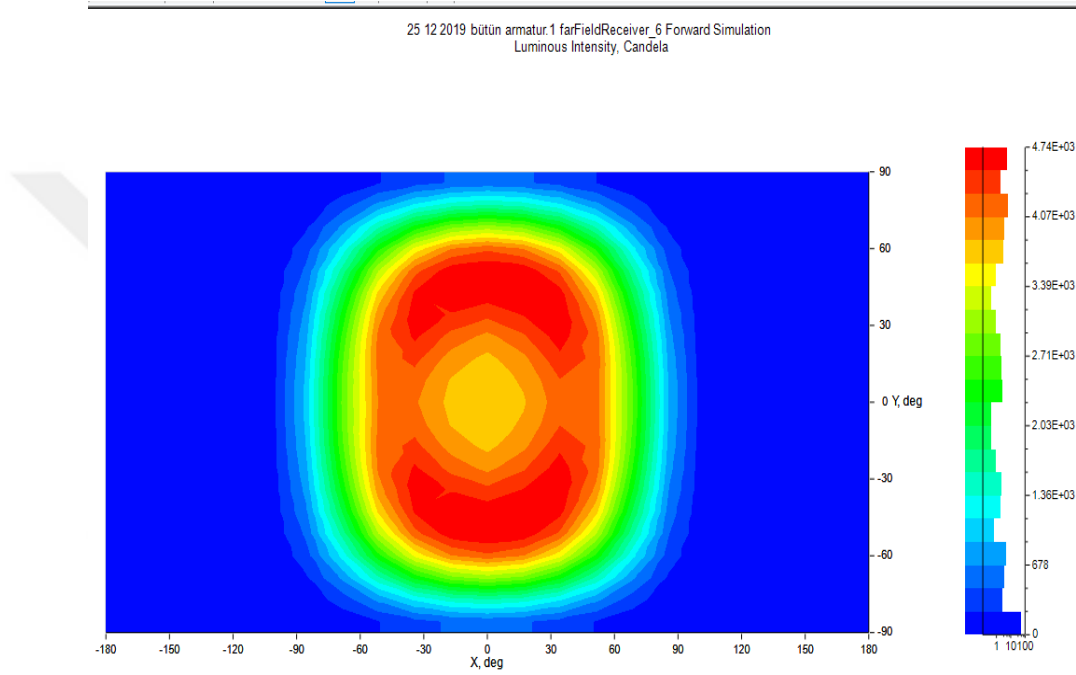


Şekil 4.1. LED-mercek arası 10 mm iken Polar diyagram.

Işık kayıplarının mercek kaynaklı olduğu düşünülmektedir. LED ışık kaynağının ışık yayma açısı 120° ve merceğin açısı 160° olması ile kaynaktan çıkan ışınların

tamamına yakınının mercekten geçiyor olması beklenirken, ufak kayıpların olması başka soruları beraberinde getirmiştir. Merceğin yapısından kaynaklı safsızlıklar ışığın mercekten %100 geçmesine engel olmuş olabilir.

Yolun enine ve boyuna doğrultusundaki aydınlatma dağılımı Şekil 4.2’de verilmiştir. Işık şiddeti değerinin yol aydınlatması için uygun olduğu görülmüştür. Dağılımın merkezinde ışık şiddetinin en yüksek değerde olduğu, merkezden uzaklaştıkça ışık şiddeti değerlerinin azaldığı söylenebilir.



Şekil 4.2. Işık şiddeti grafiği (cd).

4.1.2 LED-Mercek arası uzaklık 10 mm iken Dialux sonuçları

M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için LED-Mercek arası uzaklık 10 mm iken aydınlatma parametrelerine ilişkin Dialux sonuçları Şekil 4.3’de gösterilmiştir.

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.31	✓ 0.74	✓ 0.89	✓ 9	✓ 0.93

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M2)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 4.08	✓ 0.63	✓ 0.71	-	✓ 0.84

Araç yolu 2 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.31	✓ 0.74	✓ 0.89	✓ 9	✓ 0.93

Araç yolu 2 (M2)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 4.09	✓ 0.63	✓ 0.71	-	✓ 0.84

Şekil 4.3. M1-M2 yolları için Dialux sonuçları.

M1 sınıfı yol için Sınıf 2’nin tüm değerleri sağladığı görülmüştür.

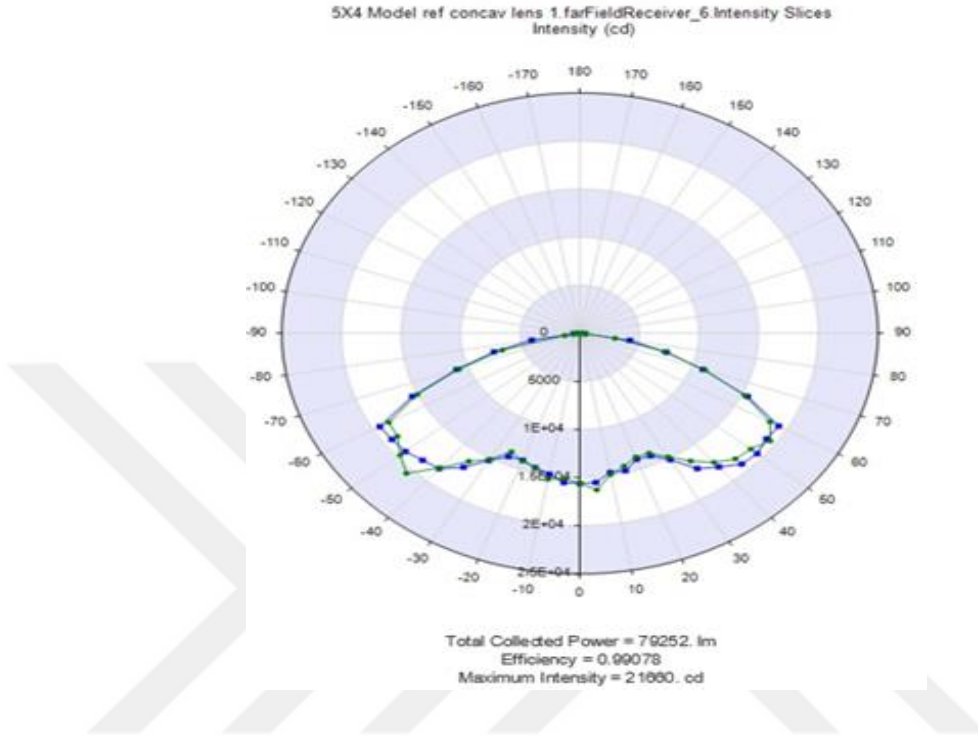
- 3 şeritli yol her bir şerit 3.5 m, 3 m refüj yapı, toplamda 24 m yol genişliği,
- Direk boyu 12-14 m,
- Direkler arası mesafe 40 m,
- Kaydırılmış düzenek,
- Bakım çarpanı 0.80 dir.

M2 sınıfı yol için Sınıf 5’in tüm değerleri sağladığı görülmüştür.

- 3 şeritli yol her bir şerit 3.5 m, 3 m refüj yapı, toplamda 24 m yol genişliği,
- Direk boyu 10-12 m,
- Direkler arası mesafe 40 m,
- Kaydırılmış düzenek,
- Bakım çarpanı 0.80 dir.

4.2 LED-Mercek Arası Uzaklık 12 mm iken Sonuçlar

M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için LED-Mercek arası uzaklık 12 mm iken Polar diyagram Şekil 4.4’de gösterilmiştir.



Şekil 4.4. Polar diyagram.

M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için LED-Mercek arası uzaklık 12 mm iken aydınlatma parametrelerine ilişkin Dialux sonuçları Şekil 4.5’de gösterilmiştir.

Değerlendirme hataları için sonuçlar

Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.30	✓ 0.78	✓ 0.83	✓ 7	✓ 0.91

Araç yolu 2 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.29	✓ 0.78	✓ 0.83	✓ 7	✓ 0.91

Değerlendirme hataları için sonuçlar

Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M2)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.49	✓ 0.71	✓ 0.74	✓ 8	✓ 0.91

Araç yolu 2 (M2)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.49	✓ 0.71	✓ 0.74	✓ 8	✓ 0.91

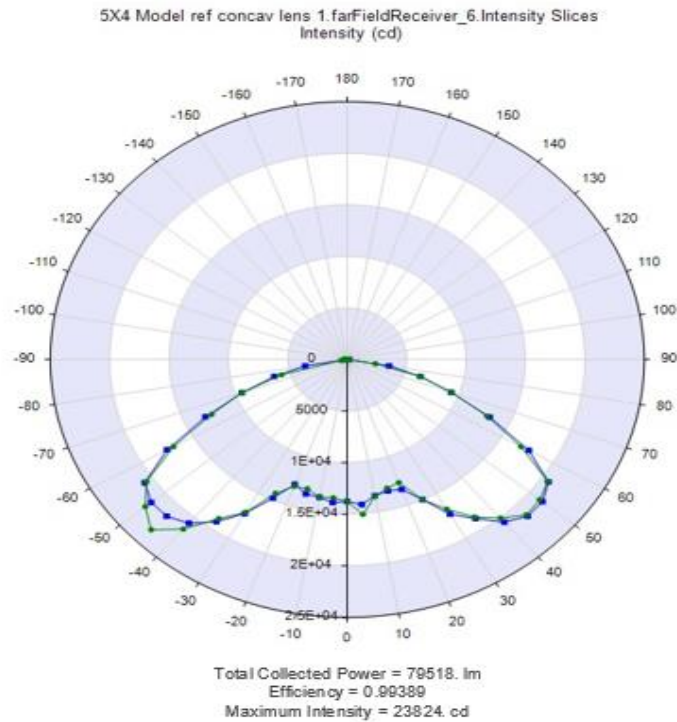
Şekil 4.5. Dialux sonuçları.

M1 yolu için sınıf 2 ve M2 yolu için sınıf 5'in tüm değerleri sağladığı görülmüştür.

- Direkler arası mesafe 40 m,
- 3 şeritli yol her bir şerit 3.5 m, 3 m refüj yapı, toplamda 24 m yol genişliği,
- Kaydırılmış düzenek kullanılmıştır,
- Direk boyu M1 için 14 m, M2 için 12 m belirlenmiştir,
- Taşıyıcı kol eğimi 0 derece,
- Işıklık noktası sarkması 1 m,
- Bir direkteki ışık sayısı 1,
- Direk-araç yolu mesafesi 0 m,
- Taşıyıcı kol uzunluğu 1 m.

4.3 LED-Mercek Arası Uzaklık 14 mm iken Sonuçlar

M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için LED-Mercek arası uzaklık 14 mm iken Polar diyagram Şekil 4.6'da gösterilmiştir.



Şekil 4.6. Polar diyagram.

M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için LED-Mercek arası uzaklık 14 mm iken aydınlatma parametrelerine ilişkin Dialux sonuçları Şekil 4.7'de gösterilmiştir.

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.24	✓ 0.77	✓ 0.70	✓ 5	✓ 0.90

Araç yolu 2 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.24	✓ 0.73	✓ 0.71	✓ 5	✓ 0.90

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M2)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.42	✓ 0.73	✗ 0.62	✓ 6	✓ 0.91

Araç yolu 2 (M2)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.42	✓ 0.72	✗ 0.63	✓ 6	✓ 0.91

Şekil 4.7. Dialüx sonuçları.

M1 yolu için Sınıf 2'nin tüm değerleri sağladığı görülmüştür.

- Kaydırılmış düzenek kullanılmıştır,
- 3 şeritli yol, her bir şerit 3.5 m, 3 m refüj yapı, toplamda 24 m yol genişliği,
- Işık noktası yüksekliği 12 m,
- Taşıyıcı kol eğimi 0 derece,
- Işıklık noktası sarkması 0,
- Bir direkteki ışık sayısı 1,
- Taşıyıcı kol uzunluğu 1 m,
- Direkler arası mesafe 40 m olarak ayarlanmıştır.

M2 yolu için Sınıf 5'in tüm değerleri sağlamadığı görülmüştür.

- Karşılıklı kaydırılmış düzenek kullanılmıştır,
- 3 şeritli yol, her bir şerit 3.5 m, 3 m refüj yapı, toplamda 24 m yol genişliği,
- Işık noktası yüksekliği 12 m,
- Taşıyıcı kol eğimi 0 derece,
- Işıklık noktası sarkması 0,
- Bir direkteki ışık sayısı 1,
- Taşıyıcı kol uzunluğu 1 m,
- Direkler arası mesafe 40 m olarak ayarlanmıştır.

Araştırmada, M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için elde edilen aydınlatma parametrelerine ilişkin sonuçlar dört farklı firmanın aynı yol sınıfları için tasarımını yapmış olduğu ve kataloglarında yer alan LED’li ışık kaynakları ile karşılaştırılmıştır. Aşağıda Şekil 4.8-11’de A, B, C ve D firmalarına ait Dialüx sonuçları verilmiştir (URL-13). Dört farklı firmaya ait l_m , U_o , U_l , TI , EIR parametrelerine ilişkin değerler araştırmadan elde edilen değerler ile karşılaştırılmıştır. Bu değerlere ilişkin karşılaştırmaya ise tartışma ve sonuç bölümünde yer verilmiştir.

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M1)

l_m [cd/m ²] ≥ 2.00	U_o ≥ 0.40	U_l ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 4.81	✓ 0.68	✗ 0.68	-	✓ 0.63

Araç yolu 2 (M1)

l_m [cd/m ²] ≥ 2.00	U_o ≥ 0.40	U_l ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 4.81	✓ 0.69	✗ 0.68	-	✓ 0.63

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M2)

l_m [cd/m ²] ≥ 1.50	U_o ≥ 0.40	U_l ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 5.02	✓ 0.55	✗ 0.59	-	✓ 0.59

Araç yolu 2 (M2)

l_m [cd/m ²] ≥ 1.50	U_o ≥ 0.40	U_l ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 5.02	✓ 0.55	✗ 0.59	-	✓ 0.59

Şekil 4.8. A firmasına ait Dialüx sonuçları.

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M1)

l_m [cd/m ²] ≥ 2.00	U_o ≥ 0.40	U_l ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 4.08	✓ 0.71	✓ 0.79	-	✓ 0.73

Araç yolu 2 (M1)

l_m [cd/m ²] ≥ 2.00	U_o ≥ 0.40	U_l ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 4.08	✓ 0.71	✓ 0.79	-	✓ 0.73

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M2)

l_m [cd/m ²] ≥ 1.50	U_o ≥ 0.40	U_l ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.84	✓ 0.59	✓ 0.79	-	✓ 0.72

Araç yolu 2 (M2)

l_m [cd/m ²] ≥ 1.50	U_o ≥ 0.40	U_l ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.84	✓ 0.58	✓ 0.79	-	✓ 0.72

Şekil 4.9. B firmasına ait Dialüx sonuçları.

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 5.06	✓ 0.81	✓ 0.88	-	✓ 0.65

Araç yolu 2 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 5.15	✓ 0.80	✓ 0.89	-	✓ 0.65

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M2)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 5.27	✓ 0.74	✓ 0.89	-	✓ 0.71

Araç yolu 2 (M2)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 5.36	✓ 0.73	✓ 0.88	-	✓ 0.71

Şekil 4.10. C firmasına ait Dialux sonuçları.

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M2)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 5.30	✓ 0.61	✓ 0.82	-	✓ 0.67

Araç yolu 2 (M2)

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 5.16	✓ 0.62	✓ 0.79	-	✓ 0.67

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 5.12	✓ 0.74	✓ 0.85	-	✓ 0.69

Araç yolu 2 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 5.01	✓ 0.75	✓ 0.81	-	✓ 0.69

Şekil 4.11. D firmasına ait Dialux sonuçları.

5. TARTIŞMA VE SONUÇ

Bu çalışmada, M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için yüksek enerji verimli LED'li yol aydınlatma armatürünün optik tasarımı amaçlanmıştır. Çalışmada, ışık kaynağından çıkan ve istenilen bölgeye kayıpsız bir şekilde iletilmesi istenen ışınların etkinliğini maksimum düzeyde tutabilmek için reflektör yerine mercek kullanılmıştır. Optik tasarım sürecinde LightTools aydınlatma programı kullanılarak konkav-konveks mercek tasarımı yapılmıştır. Merceğin görevi reflektörden yansıyan ve LED ışık kaynağından doğrudan gelen ışıkları aydınlatılmak istenen bölgeye homojen ve kayıpsız bir şekilde iletmektir. Bu sayede ışık kaynağından yayılan ışınlar doğrudan merceğe iletilecek oradan da en az kayıpla aydınlatılması istenen yüzeye gönderilecektir. LED ışık kaynağından çıkan ışıkları yüksek bir verimle ve doğru açılarla yansıtarak merceğe iletme görevi reflektöre aittir. Reflektör üzerine düşen ışınların bir kısmını yakalayamayacak ya da merceğe ulaşacak şekilde yansıtamayacaktır. Bu durum ışık, parlaklık ve enerji kayıplarına sebep olmaktadır. Armatür verimliliğini etkileyen en önemli faktörün bölge dışına saçılan ışıklar olduğu görülmektedir. Dolayısıyla LED ışık kaynağından çıkan ışıkların yüksek bir verimle aydınlatılacak bölgeye homojen bir şekilde iletilmesini sağlayacak optik tasarım faaliyetleri armatürün etkinlik faktörünü önemli derecede etkilemektedir.

Çalışmada, M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollarda, standart aydınlatma ihtiyacını karşılayacak, yüksek enerji verimli COB LED'li yol aydınlatma armatürünün optik tasarımı ve simülasyon aşamaları sunulmuştur. Aydınlatma ihtiyacını karşılayacak olan 120°'lik uygun bir COB LED ve 160°'lik özgün konkav-konveks merceğin LightTools aydınlatma tasarım programı üzerinde birbirine monte edilmesiyle LED+mercek modül tasarımı elde edilmiştir. LED ile mercek arası uzaklık sırayla 10-12-14 mm'ye ayarlanmış ve modül üzerinden bir simülasyon çalışması başlatılmıştır. LED+mercek modülüne ait ışık dağılım eğrisi, uzantısı 'ldt' olan EULUMDAT dosyası ile Dialux aydınlatma hesap programına aktarılmıştır. M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yolları üzerinde CIE'nin teknik raporlarında tayin ettiği L_m , U_o , U_l , TI , EIR gibi aydınlatma kalite büyüklükleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak, ortaya konulan aydınlatma problemine bir çözüm getirilmiştir.

Işık şiddeti değerlerinin ışık akısı değerleri ile arttığı gözlenmiştir. Tasarımda kullanılan Cree CXA-1830-4000K-U4 LED'in veri sayfasında izin verilen

değerlerin; 800 mA sürme akımı, 85°C eklem sıcaklığında minimum 3955 lm, maksimum 4230 lm ışık akısı ve yaklaşık 79,7 lm/W etkinlik faktörü ile beklentileri karşılayacak düzeyde olduğu görülmüştür (URL-6). XLamp® CXA1830 LED dizisi, Cree'nin yüksek akılı çok kalıplı dizinler ailesini daha küçük boyutlara taşımış, kullanımını ise kolaylaştırmıştır. XLamp CXA1830'un küçük, tek tipli yayma yüzeyi, lamba güçlendirme ve armatür tasarımları dahil olmak üzere hem yönlü hem de yönsüz aydınlatma uygulamalarına olanak tanımıştır. LED'in maksimum sürücü akımı 1400 mA olup, 115°'lik görüş açısı profiline sahip olma özelliği mevcuttur.

Çalışmada, armatür tasarımında hem maliyeti azaltacak hem de enerji tasarrufu sağlayacak optimum sonuçlar elde edebilmek için ışık kaynağı, mercek ve bunların yapıldığı malzemeler iyi analiz edilerek seçilmiştir. Koordinattaki küçük bir kayma ışınların istenmeyen ortama gitmesine sebep olacaktır. İstenmeyen ortama giden ışınlar armatür verimliliğinde azalmaya sebep olacaktır. Bu nedenle, LED+mercek modül LightTools programı üzerine aktarıldığında uygun koordinatlara yerleştirilip simüle edilmiştir. Çalışmada;

- LED-mercek arası uzaklık 10 mm iken; ışık akısı değeri 78500 lm, verimlilik 0.98205 ölçülmüştür.
- LED-mercek arası uzaklık 12 mm iken; ışık akısı değeri 79252 lm, verimlilik 0.99078 ölçülmüştür.
- LED-mercek arası uzaklık 14 mm iken; ışık akısı değeri 79518 lm ve verimlilik 0.99389 ölçülmüştür.

Bu sonuçlara göre ışık akısı değerlerine bakılarak LED-mercek arası en ideal aralığın 14 mm olduğu görülmüştür. Dialux raporuna bakıldığında ise bu aralıkta yol aydınlatma parametrelerinden olan U_1 değerinin kriterleri sağlamadığı görülmüştür. Bu sebeple en ideal aralığın tüm parametreleri sağlayan 12 mm olduğu söylenebilir.

Çalışmada M1 ve M2 aydınlatma sınıfı yollar için elde edilen aydınlatma parametrelerine ilişkin sonuçlar dört farklı firmanın aynı yol sınıfları için tasarımını yapmış olduğu ve kataloglarında yer alan power LED'li ışık kaynakları kullanılarak elde edilen aydınlatma parametreleri ile karşılaştırması yapılmıştır. B, C ve D firmalarının L_m , U_o , U_1 , TI, EIR değerlerini sağladığı görülmüştür. A firmasının ise boyuna parıltı düzgünlüğü olan U_1 değerini sağlayamadığı belirlenmiştir (URL-13).

Çalışmada geliştirilmiş olan özgün ve prototip COB LED’li armatürün piyasada yer alan ve popülerliği yüksek olan firmaların üretmiş olduğu yüksek enerji verimli, power LED’li yol aydınlatma armatürlerinin kriterlerine ulaştığı görülmüştür.

Sonuç olarak; tasarım sonucunda elde edilen ışık dağılım eğrisi ve bu dağılıma ait Dialux sonuçları M1-M2 aydınlatma sınıfı yollar için gerekli kriterleri sağlamıştır. Yüksek enerji verimli, COB LED’li, alanında özgün ve prototip bir armatür geliştirilmiştir.



KAYNAKLAR

- Anonim., 2017. LED Street Lighting Procurement & Design. URL adres: http://www.premiumlightpro.eu/fileadmin/user_upload/Guidelines/Premium_Light_Pro_Outdoor_LED_Guidelines.pdf Erişim tarihi: 27.02.2019.
- Anonim., 2018. Optik Tasarım Kursu. Fizik Mühendisleri Odası, Ankara.
- Aslanov, E. R., Doskolovich, L. L., Moiseev, M. A., Bezus, E. A. ve Kazanskiy, N. L., 2013. Design of an optical element forming an axial line segment for efficient LED lighting systems, Optics Express, 21, 23, 28651-28656.
- Bamisile, O. O., Dagbasi, M. ve Abbasoglu, S., 2016. Economic feasibility of replacing sodium vapor and high pressure mercury vapor bulbs with LEDs for street lighting, Energy and Policy Research, 3, 1, 27-31.
- Bando, K., Sakano, K., Noguchi, Y. ve Shimizu, Y., 1998. Development of high-bright and pure-white LED lamps, Journal of Light & Visual Environment, 22, 1, 12-15.
- Bektaş, Y., Dursun, M., Dindar, T. ve Karaca, H. H., 2018. Yol Aydınlatması Tesisatlarında Klasik Yöntem İle Bilgisayar Destekli Yöntemin Karşılaştırılması, Mesleki Bilimler Dergisi (MBD), 7, 2, 289-303.
- Bommel, W. V., 2015. Road lighting: fundamentals, technology and application. Springer International Publishing, Switzerland.
- Boyce, P., ve Raynham, P., 2009. SLL lighting handbook. CIBSE, The Society of Light and Lighting, London: England.
- Cangeloso, S., 2012. LED lighting: A primer to lighting the future. Sebastopol, O'Reilly Media, California: USA.
- Chen, G., Craven, M., Kim, A., Munkholm, A., Watanabe, S., Camras, M., ... ve Steranka, F., 2008. Performance of high-power III-nitride light emitting diodes, Physica Status Solidi (a), 205, 5, 1086-1092.
- Cheng, Y. K. ve Cheng, K. W. E., 2006. General study for using LED to replace traditional lighting devices. 2nd International Conference on Power Electronics Systems and Applications, Hong Kong, IEEE, 173-177.
- Chang, M. H., Das, D., Varde, P. V. ve Pecht, M., 2012. Light emitting diodes reliability review. Microelectronics Reliability, 525, 762-782.
- CIE, Commission Internationale de l'Éclairage., 1995. Recommendations for the lighting of roads for motor and pedestrian traffic. Vienna (Austria): CIE. CIE-115: 1995.
- CIE, Commission Internationale de l'Éclairage., 2010. Lighting of roads for motor and pedestrian traffic. Vienna (Austria): CIE. Publication No., 115, 2010.

- CR 13201-1., 2002. The Selection of Lighting Classes for Road Lighting.
- Craford, M. G., 2005. LEDs for solid state lighting and other emerging applications: status, trends, and challenges. In Fifth International Conference on Solid State Lighting (Vol. 5941, p. 594- 101). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.625918>.
- Crew, H., 2009. The Wave Theory of Light-Memoirs by Huygens, Young and Fresnel. Chapman Press.
- Czyżewski, D. ve Fryc, I., 2020. The Influence of Luminaire Photometric Intensity Curve Measurements Quality on Road Lighting Design Parameters, Energies, 13, 13, 3301.
- Das, B., Bardhan, S., Maity, T., ve Mazumdar, S., 2020. Variable CCT constant illuminance white LED light communication system with dimming feature, Results in Optics, 1, 100013.
- DenBaars., S., 2008. Energy efficient white LEDs for sustainable solid-state lighting. In AIP Conference Proceedings (Vol. 1044, No. 1, pp. 141-148). American Institute of Physics.
- DFI, Development Finance International., 2014. LED road lighting design manual. URL adres: <https://www.dfintl.com/wp-content/uploads/2016/04/LED-Road-Lighting-Design-Manual1.pdf> Erişim Tarihi: 05. 06. 20199
- Dinçer, A. A., 2011. Görsel Peyzaj Kalitesinin ‘Bıçimsel Estetik Değerlendirme Yaklaşımı’ ile İrdelenmesi Üzerine Bir Araştırma. Doktora Tezi, Ankara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- Ding, Y., Liu, X., Zheng, Z. R. ve Gu, P. F., 2008. Freeform LED lens for uniform illumination. Optics Express, 16, 17, 12958-12966.
- Duman, A. C., ve Güler, Ö., 2019. Techno-economic analysis of off-grid photovoltaic LED road lighting systems: A case study for northern, central and southern regions of Turkey. Building and environment, 156, 89-98.
- Dupuis, R. D. ve Krames, M. R., 2008. History, development, and applications of high-brightness visible light-emitting diodes, Journal of lightwave technology, 26, 9, 1154-1171.
- ECE/ENERGY/WP., 2006. Economic Commission for Europe, Committee on Sustainable Energy, Steering Committee of the Energy Efficiency 21 Project, “Final Report of Energy Efficiency Investment Project Development for Climate Change Mitigation”. ECE/ENERGY/WP.4/2006/2, 21 March. URL adres: <https://www.unece.org/fileadmin/DAM/ie/se/pdfs/ee21/reportsg.pdf> Erişim tarihi: 29.06.2020.

- Erol, Y. ve Canbolat, T., 2010. Akım Regüleli LED Test Cihazı Tasarımı. ELECO'2010 Elektrik-Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, Bursa, 370-374.
- Evans, D. L., 1997. High-luminance LEDs replace incandescent lamps in new applications. In light-emitting diodes: research, manufacturing, and applications (Vol. 3002, pp. 142-153). International Society for Optics and Photonics.
- Fujimoto, A., Watanabe, H., Takeuchi, M. ve Shimura, M., 1985. LPE Growth of Lattice-Matched InGaAsP on GaAs0. 69P0. 31 Substrates and Low Threshold Current Density Operation of Visible InGaAsP DH Lasers, Japanese journal of applied physics, 24, 8A, L653.
- Ge, A., Shu, H., Chen, D., Cai, J., Chen, J. ve Zhu, L., 2017. Optical design of a road lighting luminaire using a chip-on-board LED array, Lighting Research & Technology, 49, 5, 651-657.
- Ha, M. ve Graham, S., 2012. Development of a thermal resistance model for chip-on-board packaging of high power LED arrays, Microelectronics Reliability, 52, 5, 836-844.
- Hao, R., Ge, A., Tao, X., Liu, Y., Zhao, B. ve Yang, E., 2019. Optical design of a high-mast luminaire based on four COB LED light source modules, Lighting Research & Technology, 51, 3, 447-456.
- Haque, S., Steigerwald, D. ve Rudaz, S., 2003. Packaging challenges of high-power LEDs for solid state lighting [C]//SPIE proceedings series, In Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 881-886.
- He, G., Zheng, L. ve Yan, H., 2010. LED white lights with high CRI and high luminous efficacy. In LED and Display Technologies (Vol. 7852, p. 78520A). International Society for Optics and Photonics.
- Holonyak Jr, N. ve Bevacqua, S. F., 1962. Coherent (visible) light emission from Ga (As_{1-x}P_x) junctions, Applied Physics Letters, 1, 4, 82-83.
- Hsu, C. N., Wang, W. C. ve Fang, S. H., 2019. Experimental of ultra-high-power multichip COB LED, Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 136, 5, 2097-2109.
- İSO, İstanbul Sanayi Odası., 2019. Elektrikli Aydınlatma Ekipmanları İmalat Sanayi. İstanbul, Türkiye. URL Adresi: http://www.iso.org.tr/file/iso-aydinlatma-sektor-raporu_WEB-9217.pdf. Erişim tarihi: 03.09.2020.
- Jägerbrand, A. K., 2016. LED (Light-emitting diode) road lighting in practice: An evaluation of compliance with regulations and improvements for further energy savings, Energies, 9, 5, 357.

- Juntunen, E., Tetri, E., Tapaninen, O., Yrjänä, S., Kondratyev, V., Sitomaniemi, A., ... ve Heikkinen, V., 2015. A smart LED luminaire for energy savings in pedestrian road lighting, *Lighting Research & Technology*, 47, 1, 103-115.
- Khan, T. Q., Bodrogi, P., Vinh, Q. T. ve Winkler, H., 2015. LED lighting: Technology and perception. John Wiley & Sons.
- Lai, W., Chen, W., Liu, X., ve Lei, X., 2011. Optimal design of light distribution of LED luminaries for road lighting. In *Eleventh International Conference on Solid State Lighting* (Vol. 8123, p. 81231P). International Society for Optics and Photonics. <https://doi.org/10.1117/12.899264>
- LED Luminaire Lifetime., 2014. Recommendations for Testing and Reporting, Solid-State Lighting Product Quality Initiative, Second Edition (online), Next Generation Lighting Industry Alliance with the U.S. Department of Energy, 1-30. URL adres: https://www.nglia.org/pdfs/led_luminaire_lifetime_guide_sept2014.pdf. Erişim Tarihi: 25.09.2020
- LEDs Magazine., 2008. LED chips set new R&D records. URL adres: <https://www.ledsmagazine.com/manufacturing-services-testing/substrates-wafers/article/16695862/led-chips-set-new-rd-records>, Erişim tarihi: 29.10.2020.
- Lee, T. X. ve Chen, B. S., 2016. High uniformity and tolerance design for direct-lit LED backlight illumination using Lagrange interpolation, *Journal of Display Technology*, 12, 11, 1403-1410.
- Lee, Y. J., Kuo, H. C., Lu, T. C., Wang, S. C., Ng, K. W., Lau, K. M., ... ve Lin, S. Y., 2008. Study of GaN-based light-emitting diodes grown on chemical wet-etching-patterned sapphire substrate with V-shaped pits roughening surfaces. *Journal of Lightwave Technology*, 26, 11, 1455-1463.
- Lee, Y. J., Lu, T. C., Kuo, H. C. ve Wang, S. C., 2007. High brightness GaN-based light-emitting diodes, *Journal of Display Technology*, 32, 118-125.
- Lenk, R. ve Lenk, C., 2017. Practical lighting design with LEDs. John Wiley & Sons.
- Lim, S. R., Kang, D., Ogunseitan, O. A. ve Schoenung, J. M., 2011. Potential environmental impacts of light-emitting diodes (LEDs): metallic resources, toxicity, and hazardous waste classification, *Environmental Science & Technology*, 45, 1, 320-327.
- Liu, S. ve Luo, X., 2011. LED packaging for lighting applications: design, manufacturing, and testing. John Wiley & Sons.
- Liu, Z., Liu, S., Wang, K. ve Luo, X., 2009. Status and prospects for phosphor-based white LED packaging, *Frontiers of Optoelectronics in China*, 2, 2, 119-140.

- Luo, X., Hu, R., Liu, S. ve Wang, K., 2016. Heat and fluid flow in high-power LED packaging and applications, *Progress in Energy and Combustion Science*, 56, 1-32.
- Maeng, S. R. ve Ko, S. C., 2015. Thermal characteristics for chip on metal package of LED lighting module. *Materials Science in Semiconductor Processing*, 38, 357-361.
- Mercan, M., Ongun, R., Dinçer, K. ve Tosun, M., 2013. Selçuk Üniversitesi Koşullarında LED Renklerinin Aydınlatmada Güneş Enerjisi Güç Performansına Etkisinin İncelenmesi, *Selçuk-Teknik Dergisi*, 12, 1, 12-24.
- Morrow, R. C., 2008. LED lighting in horticulture, *Hort Science*, 43, 7, 1947-1950.
- Mottier, P., 2010. LED for lighting applications (Vol. 134). John Wiley & Sons.
- Nakamura, S., 1997. Present performance of InGaN-based blue/green/yellow LEDs. In *Light-Emitting Diodes: Research, Manufacturing, and Applications* (Vol. 3002, pp. 26-35). International Society for Optics and Photonics.
- Nakamura, S. ve Fasol, G., 2013. The blue laser diode: GaN based light emitters and lasers. Springer Science & Business Media.
- Nakamura, S., Mukai, T. ve Senoh, M., 1991. High-power GaN pn junction blue-light-emitting diodes, *Japanese Journal of Applied Physics*, 30, 12A, L1998.
- Nakamura, S., Senoh, M. ve Mukai, T., 1993. High-power InGaN/GaN double-heterostructure violet light emitting diodes, *Applied Physics Letters*, 62, 19, 2390-2392.
- Narendran, N. ve Deng, L., 2002. Color rendering properties of LED light sources. In *Solid State Lighting II* (Vol. 4776, pp. 61-67). International Society for Optics and Photonics.
- Nguyen, F., Terao, B. ve Laski, J., 2005. Realizing LED illumination lighting applications. In *Fifth International Conference on Solid State Lighting* (Vol. 5941, p. 594105). International Society for Optics and Photonics.
- Nishizawa, J., Itoh, K. ve Okuno, Y., 1985. LPE-AlGaAs and red LED (candela class), *Journal of Applied Physic*, 57, 2210-2214.
- Nuttall, D. R., Shuttleworth, R. ve Routledge, G., 2008. Design of a LED street lighting system. *Power Electronics, Machines and Drives*. 4th IET Conference, Power Electronics, Machines and Drives, 436-440
- Onaygil, S., 2016. Aydınlatma Tekniği, Verimlilik, Planlama ve Yönetim. URL adres:http://www.emo.org.tr/ekler/da88bfd57b5f39e_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=12, Erişim tarihi: 10.05.2019.
- Özkaya, M. ve Tüfekçi, T., 2004. Aydınlatma Tekniği, Birsan Yayınevi, İstanbul.

- Öztoprak, M., 2018. LED Aydınlatma Dönüşümü Ulusal Enerji Verimliliği Eylem Planı'na Girdi. URL adres: <https://www.aydinlatma.org/led-aydinlatma-donusumu-ulusal-enerji-verimliliği-eylem-planina-girdi.html> Erişim Tarihi: 16.06.2020.
- Painter, K. A. ve Farrington, D. P., 2001. Evaluating situational crime prevention using a young people's survey: Part II making sense of the elite police voice, *British Journal of Criminology*, 41, 2, 266-284.
- Pelsan Aydınlatma., 2019. <http://www.pelsan.com.tr/tr-TR/isik-nedir/26108>, Erişim tarihi: 07.03.2020
- Schlotter, P., Schmidt, R. ve Schneider, J., 1997. Luminescence conversion of blue light emitting diodes, *Applied Physics A: Materials Science & Processing*, 64, 4, 417-418.
- Schubert, E. F., 2006. *Light-Emitting Diodes*. Cambridge University Press, Edinburgh.
- Serway, R.A. ve Beichner, R. J., 2011. *Serway Fizik 2: Elektrik ve Manyetizma-Işık ve Optik*. [Serway Physics 2]. Ankara: Palme Yayıncılık.
- Steigerwald, D. A., Bhat, J. C., Collins, D., Fletcher, R. M., Holcomb, M. O., Ludowise, M. J., ... ve Rudaz, S. L., 2002. Illumination with solid state lighting technology. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 8, 2, 310-320.
- Steranka, F. M., Bhat, J., Collins, D., Cook, L., Craford, M. G., Fletcher, R., ... ve Khare, R., 2002. High power LEDs–Technology status and market applications, *Physica status solidi (a)*, 194, 2, 380-388.
- TEDAŞ., 2010. LED Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi. Eylül 2010 (Revize Mart 2019). TEDAŞ - MLZ/2010-057.C, TEDAŞ Genel Müdürlüğü, Ankara. Led Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi. URL adres: http://www.tedas.gov.tr/sx.web.docs/tedas/tedas_arge/docs/sartnameler/tedas_arge/TEDA%C5%9E-MLZ2010-057.C%202019%20siyah.pdf. Erişim tarihi: 05.06.2019
- Timinger, A. ve Ries, H., 2008. Street-lighting with LEDs. In *Illumination Optics* (Vol. 7103, p. 71030H). International Society for Optics and Photonics.
- Toy, Ö. F., 2015. *Led Tabanlı Yol Aydınlatma Armatürleri İçin Optik Tasarım*. Ankara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Fizik Mühendisliği Ana Bilim Dalı Yayınlanmamış Yüksek Lisans Tezi.
- Tsao, J. Y., 2002. Light emitting diodes (LEDs) for general illumination. *Optoelectronics Industry Development Association*, Washington DC, 289-290.

- TÜİK, Türkiye İstatistik Kurumu., 2019. TEDAŞ, Türkiye Elektrik Dağıtım ve Tüketim İstatistikleri. URL adres: http://www.tuik.gov.tr/PreTablo.do?alt_id=1029, Erişim tarihi: 17.12.2019.
- Vakrilov, N., Andonova, A. ve Kafadarova, N., 2015. Study of high power COB LED modules with respect to topology of chips. 38th International Spring Seminar on Electronics Technology (ISSE), 108-113.
- Wikipedia., 2019. Diyot ışık yayan – light-emitting diode: çalışma prensibi. URL adres: https://tr.qaz.wiki/wiki/Light-emitting_diode Erişim Tarihi: 27.02.2012.
- Wikipedia., 2020. Işık – Işık hızı – Optik. URL adres: https://tr.wikipedia.org/wiki/I%C5%9F%C4%B1k_h%C4%B1z%C4%B1 Erişim tarihi: 23.04.2020.
- Wu, H. H., Lin, K. H. ve Lin, S. T., 2012. A study on the heat dissipation of high power multi-chip COB LEDs, Microelectronics Journal, 43, 4, 280-287.
- Yadav, N. K., 2018. Monge-Ampere problems with non-quadratic cost function: application to freeform optics. Ph. D. thesis, Eindhoven University of Technology, Eindhoven.
- Yawale, P. R., Wagh, V. G. ve Shaligram, A. D., 2016. Optimization of Pole Spacing of Road Illumination System using DIALux. In National Conference on Innovative Trends in Science and Engineering, 4, 7, 192-195.
- Yılmaz, E., Erden, O. ve Kocadağ, N. Y., 2019. Sokak Aydınlatması Dönüşümü Fayda Maliyet Analizi Üzerine Bir Mühendislik Ekonomisi Çalışması, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD), 5, 3, 280-289.
- Yılmaz, E., Şahin, İ. ve Kocadağ, N. Y., 2019. LED Işık Kaynaklı, Enerji Tasarruflu ve Yüksek Verimli Ofis Aydınlatma Armatürü Tasarımı, Gazi Mühendislik Bilimleri Dergisi (GMBD), 5, 2, 138-150.
- Yurtseven, M. B. ve Onaygil, S., 2011. Katı Hal Aydınlatma ve LED Standartlarındaki Gelişmeler. VI. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu ve Sergisi.
- Yoomak, S., Jettanasen, C., Ngaopitakkul, A., Bunjongjit, S. ve Leelajindakraierk, M., 2018. Comparative study of lighting quality and power quality for LED and HPS luminaires in a roadway lighting system, Energy and Buildings, 159, 542-557.
- Zhenrong, Z., Xiang, H. ve Xu, L., 2009. Freeform surface lens for LED uniform illumination, Applied Optics, 48, 35, 6627-6634.
- Zhong, P., He, G. ve Zhang, M., 2012. Spectral optimization of the color temperature tunable white light-emitting diode (LED) cluster consisting of direct-emission blue and red LEDs and a diphosphor conversion LED, Optics express, 20, 105, A684-A693.

- URL-1< <https://www.kuark.org/2011/11/fotoelektrik-olayi-ve-sonuclari/>>, Erişim tarihi: 09.04.2020.
- URL-2<<https://www.fizikbilimi.gen.tr/cift-yarikta-girisim-young-deneyi/>>, Erişim tarihi: 02.05.2020.
- URL-3< <https://www.hknklc.com/led-light-emitting-diode-nedir-ve-tarihcesi/>>, Erişim tarihi: 22.06.2020.
- URL-4<http://www.emo.org.tr/ekler/11a405701da4a51_ek.pdf?tipi=2>, Erişim tarihi: 12.05.2020.
- URL-5<<https://www.aydinlatma.org/dogal-gunes-isiginin-spektral-dagilimi.html>>, Erişim tarihi: 03.05.2020.
- URL-6<<https://www.cree.com/led-components/media/documents/ds-XA1830.pdf>>, Erişim tarihi: 29.08.2020.
- URL-7< <https://www.aydinlatma.org/renk-sicakligi-kelvin.html>> Erişim tarihi: 29.08.2020.
- URL-8<<https://www.aydinlatma.org/isikta-renk-ve-renk-sicakligi-cct-kavrami.html>>, Erişim tarihi: 29.08.2020.
- URL-9<<https://www.ledaydinlatma.com/sayfa/led-aydinlatmada-renk-sicakligi-secimi>>, Erişim tarihi: 11.08.2020.
- URL-10<<https://www.aydinlatma.org/>>, Erişim tarihi: 29.08.2020.
- URL-11<<https://www.optikgazete.com/gundem/ustun-ozellikli-eyear-multifokal-ozel-uretim-camlar-h5513.html>>, Erişim tarihi: 21.07.2020.
- URL-12<<https://www.aydinlatma.org/lens.html>>, Erişim tarihi: 26.08.2020
- URL-13< <https://www.dialux.com/en-GB/download>, Erişim tarihi: 15.05.2019.

EKLER

Ek 1a - LED-mercek arası uzaklık 10 mm iken M1'e ait Dialux raporu

Ek 1b - LED-mercek arası uzaklık 10 mm iken M2'ye ait Dialux raporu

Ek 2a - LED-mercek arası uzaklık 12 mm iken M1'e ait Dialux raporu

Ek 2b - LED-mercek arası uzaklık 12 mm iken M2'ye ait Dialux raporu

Ek 3a - LED-mercek arası uzaklık 14 mm iken M1 ve M2'ye ait Dialux raporu

Ek 3b - LED-mercek arası uzaklık 14 mm iken M1 ve M2'ye ait Dialux raporu

Ek 4 - Akı özellikleri ($I_f = 800 \text{ mA}$ $T_j = 85 \text{ }^\circ\text{C}$)

Ek 5 - Performans gurubunun parlaklığı ($I_f = 800 \text{ mA}$ $T_j = 85 \text{ }^\circ\text{C}$)

Ek 6 - Çeşitli malzemeler için 25°C 'de termal İletkenlik ve yayılım

Ek 7- EVATEG ölçüm sonuçları ve analiz raporu

Ek 1a- LED-mercek arası uzaklık 10 mm iken M1'e ait Dialux raporu

10mm mesafe (4000lm için)

12/29/2019

DIALux

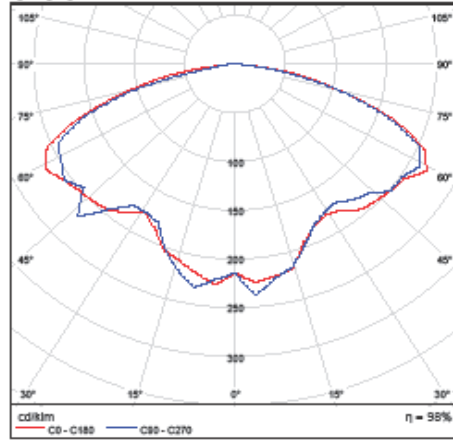
LightTools Simulation 1xunknown / LightTools Simulation - (1xunknown)

LightTools Simulation 1xunknown

Lütfen ışıklık
katalogumuzdan bir
ışıklık resmi alın.

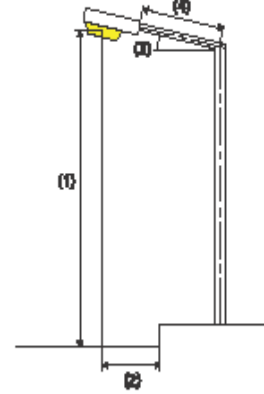
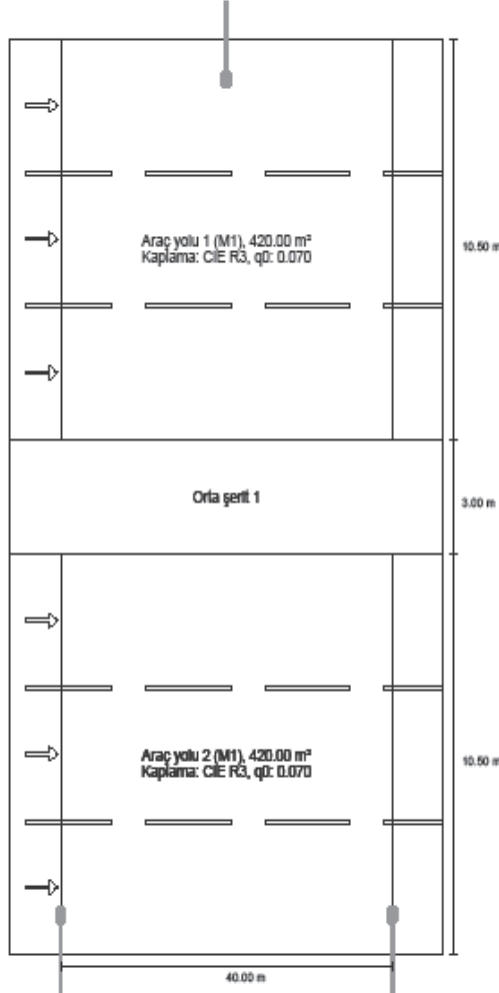
İşletme verimi: 98.14%
Lamba ışığı akışı: 80000 lm
Işıklık ışık akışı: 78508 lm
Güç: 0.1 W
Işık verimi: 785081.1 lm/W

Işık yayımı 1 / Polar LVK



Yol 1 göre EN 13201:2015

LightTools Simulation



Lamba:	1xunknown
Işık akısı (aydınlatma aygıtı):	78508.11 lm
Işık akısı (lamba):	80000.00 lm
İşletme saati	
4000 h:	100.0 %, 0.1 W
W/km:	5.0
Düzenleme:	İki tarafı kaydırılmış
Direk açılığı:	40.000 m
Taşıyıcı kol eğimi (3):	0.0°
Taşıyıcı kol uzunluğu (4):	2.000 m
Işık noktası yüksekliği (1):	14.000 m
Işık noktası fazlalığı (2):	1.000 m

ULR:	0.00
ULOR:	0.00
Maksimum ışık yeghnlığı değeri	
70° ve üzerinde:	176 cd/km²
80° ve üzerinde:	68.2 cd/km²
90° ve üzerinde:	2.86 cd/km²
Işık yoğunluğu sınıfı:	G*5

Her durumda, kullanılabilir biçimde takılmış ışıklıkların alt dikeyle verilen açıda oluşturdukları, tüm yönlerde.

* Işık yeghnlığı sınıfını hesaplamak için ışık yeghnlığı değerleri (cd/km²) EN 13201:2015 uyarınca lamba ışık akısı olarak verilmiştir.

Düzenleme kamaşma indeksi sınıfı istemlerini sağlıyor D.0

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.31	✓ 0.74	✓ 0.89	✓ 9	✓ 0.93

Araç yolu 2 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.31	✓ 0.74	✓ 0.89	✓ 9	✓ 0.93

Enerji verimliliği indikatörleri için sonuçlar

Performans yoğunluğuna ilişkin gösterge (Dp) 0.000 W/lx.m²

Enerji tüketimi yoğunluğu

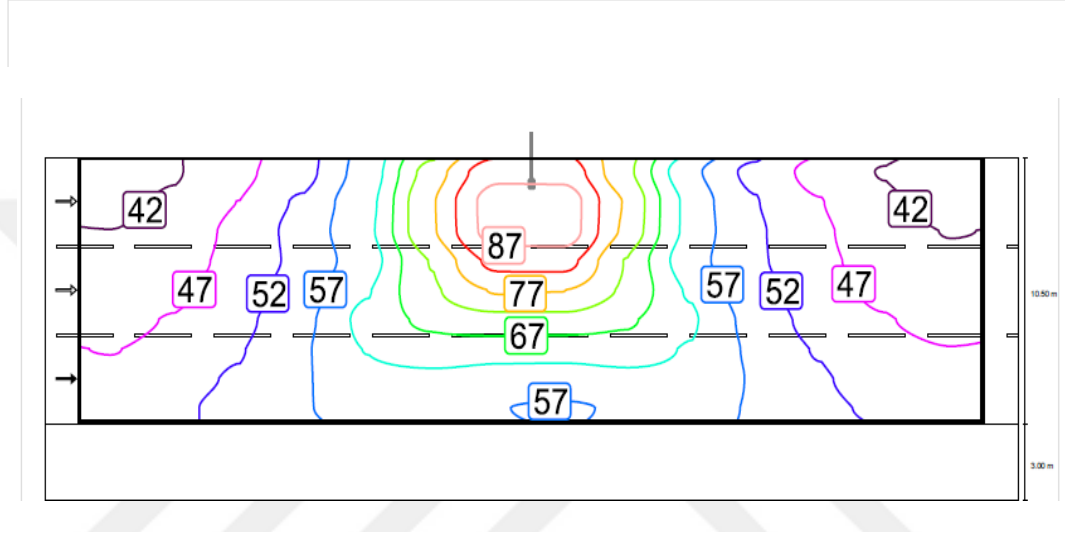
Düzenleme: 5X4 Model ref concav lens normal.ltd (0.8 0.0 kWh/m² yıl
kWh/yıl)

Araç yolu 1 (M1)

Bakım çarpanı: 0.80

Ağ: 14 x 9 Noktalar

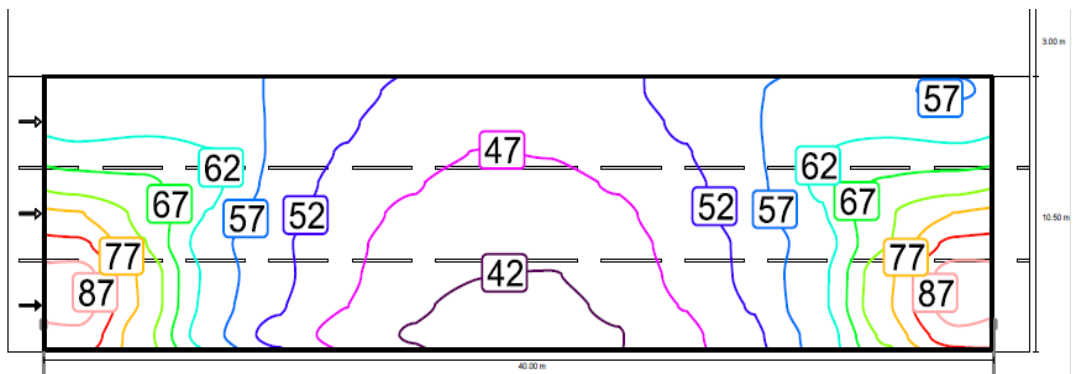
Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.31	✓ 0.74	✓ 0.89	✓ 9	✓ 0.93

Yatay aydınlık**Araç yolu 2 (M1)**

Bakım çarpanı: 0.80

Ağ: 14 x 9 Noktalar

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.31	✓ 0.74	✓ 0.89	✓ 9	✓ 0.93

Yatay aydınlık

Ek 1b- LED-mercek arası uzaklık 10 mm iken M2'ye ait Dialux raporu

10mm mercekle (4000lm ipin)

13/29/2019

DIALux

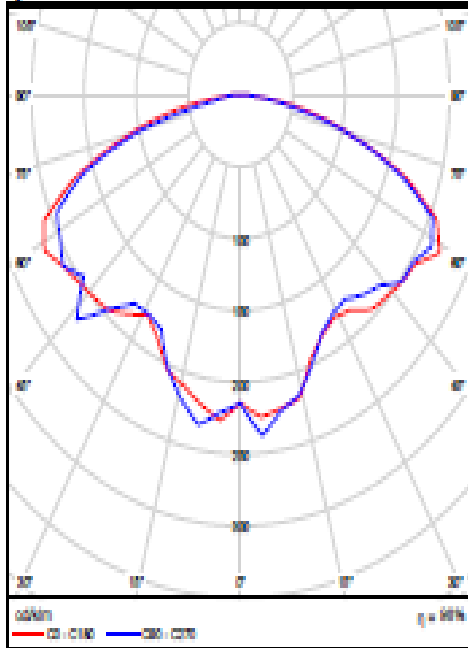
LightTools Simulation 1xunknown / LightTools Simulation - (1xunknown)

LightTools Simulation 1xunknown

Lütfen ışık
katalogumuzdan bir
ışık nesni alın.

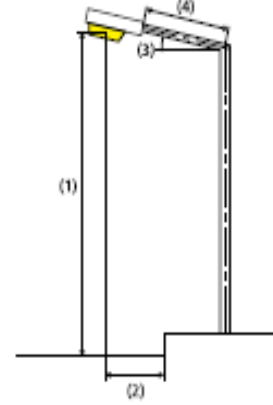
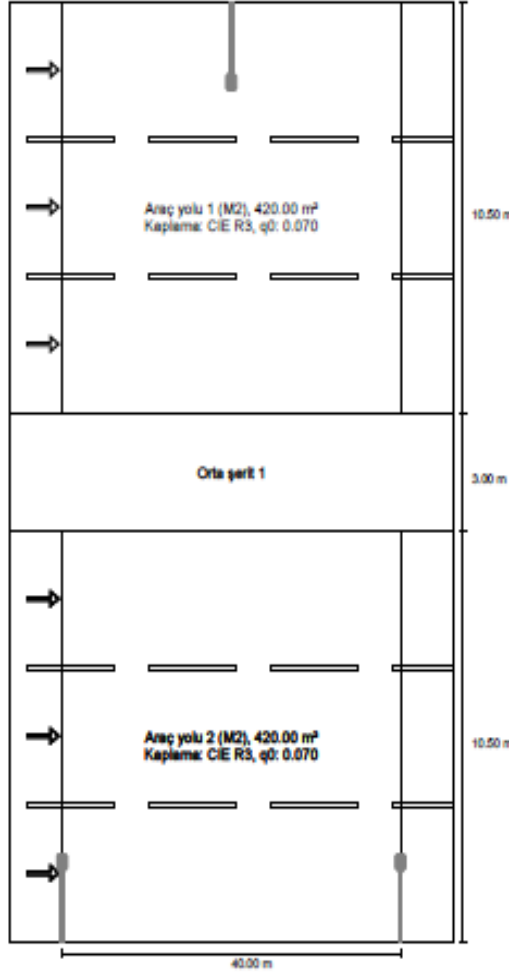
Işıltma verimi: 88.14%
Lamba ışık akısı: 80000 lm
Işıltık ışık akısı: 78508 lm
Güç: 0.1 W
Işık verimi: 785081.1 lm/W

Işık yayımı 1 / Polar LVK



Yol 1 göre EN 13201:2015

LightTools Simulation



Lamba:	1xunknown
Işık akısı (aydınlatma aygıtı):	78508.11 lm
Işık akısı (lamba):	80000.00 lm
İşletme saati	
4000 h:	100.0 %, 0.1 W
Wlm:	5.0
Düzenleme:	İki taraflı kaydırılmış
Direk açıklığı:	40.000 m
Taşıyıcı kol eğilimi (3):	0.0°
Taşıyıcı kol uzunluğu (4):	2.000 m
Işık noktası yüksekliği (1):	10.000 m
Işık noktası fazlalığı (2):	2.000 m

ULR:	0.00
ULOR:	0.00
Maksimum ışık yoğunluğu değeri	
70° ve üzerinde:	176 cd/km²
80° ve üzerinde:	68.2 cd/km²
90° ve üzerinde:	2.86 cd/km²
Işık yoğunluğu sınıfı:	G'5

Her durumda, kullanılabilir biçimde takılmış ışık kaynakları alt dikeyle verilen açıda oluyordukları, tüm yönlerde.

* Işık yoğunluğu sınıfını hesaplamak için ışık yoğunluğu değerleri [cd/km²] EN 13201:2015 uyarınca lamba ışık akısı olarak verilmiştir.

Düzenleme kamaşma indeksi sınıfı istemlerini sağlıyor D.0

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M2)

Lm [cd/m²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 4.08	✓ 0.63	✓ 0.71	-	✓ 0.84

Araç yolu 2 (M2)

Lm [cd/m²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 4.09	✓ 0.63	✓ 0.71	-	✓ 0.84

Enerji verimliliği indikatörleri için sonuçlar

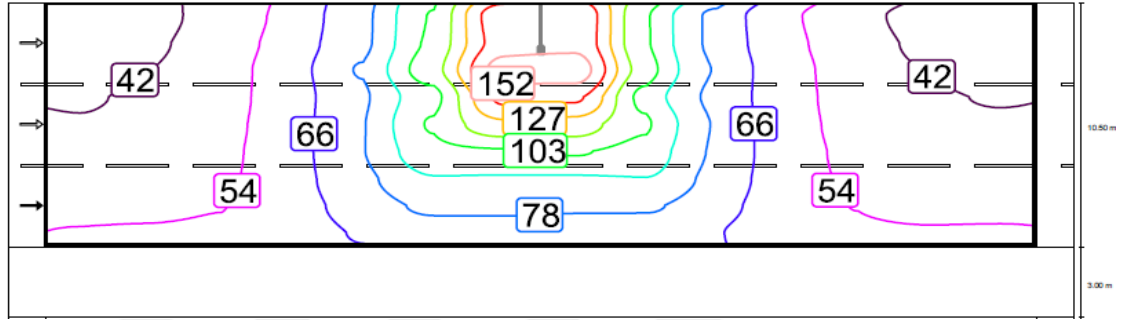
Performans yoğunluğuna ilişkin gösterge (Dp) 0.000 W/lxm²

Enerji tüketimi yoğunluğu

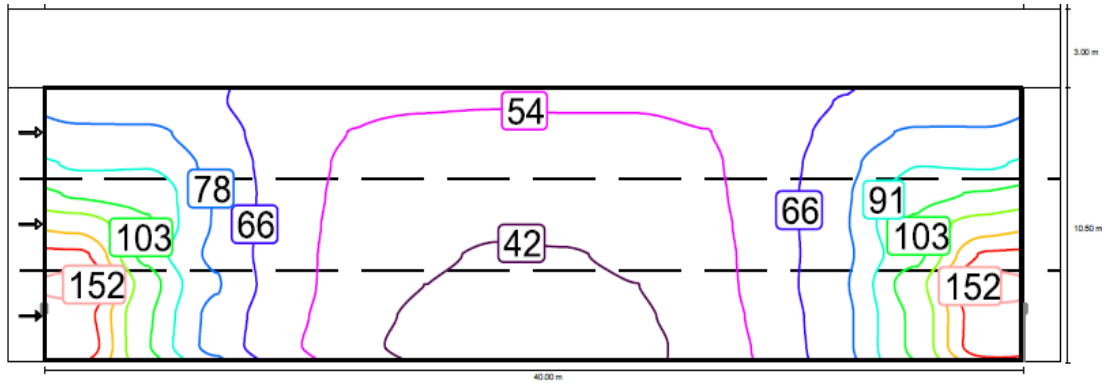
Düzenleme: 5X4 Model ref concav lens normal.lxd (0.8 kWh/yıl)
0.0 kWh/m² yıl

Araç yolu 1 (M2)Bakım çarpanı: 0.80
Ağ: 14 x 9 Noktalar

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 4.08	✓ 0.63	✓ 0.71	-	✓ 0.84

Yatay aydınlık**Araç yolu 2 (M2)**Bakım çarpanı: 0.80
Ağ: 14 x 9 Noktalar

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 4.09	✓ 0.63	✓ 0.71	-	✓ 0.84

Yatay aydınlık

Ek 2a- LED-mercek arası uzaklık 12 mm iken M1'e ait Dialux raporu

Proje 0

12/31/2019

DIALux

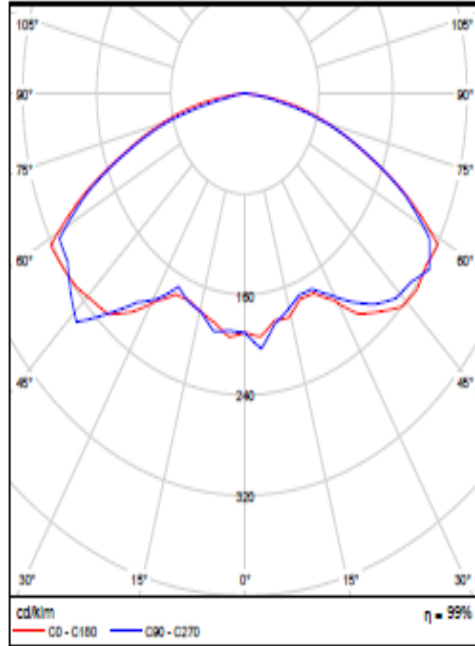
LightTools Simulation 1xunknown / LightTools Simulation - (1xunknown)

LightTools Simulation 1xunknown

Lütfen ışıklık
katalogumuzdan bir
ışıklık resmi alın.

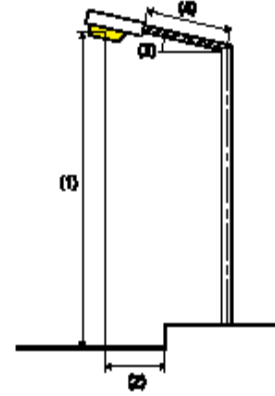
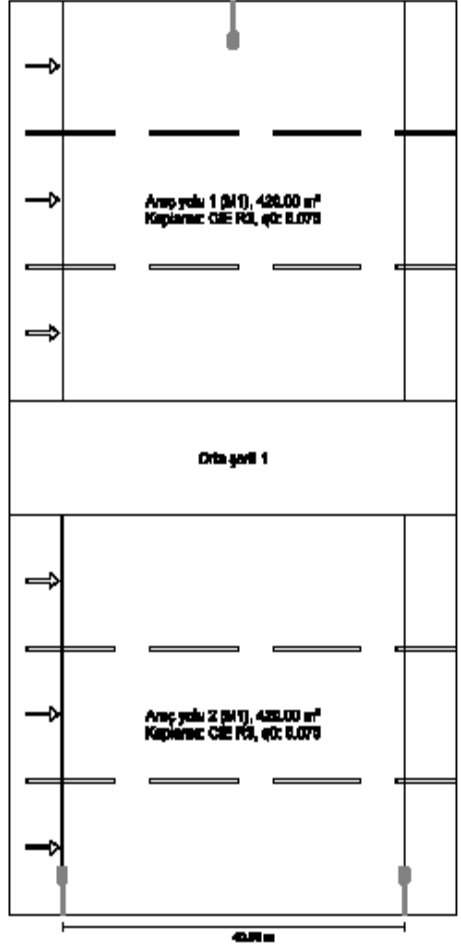
İşletme verimi: 99.08%
Lamba ışığı akışı: 80000 lm
Işıklık ışık akışı: 79262 lm
Güç: 0.1 W
Işık verimi: 792616.8 lm/W

Işık yayımı 1 / Polar LVK



Yol 1 göre EN 12291:2015

LightTools Simulation



Lambas:	1x kullanımlı
Işık akısı (aydınlatma aygıtı):	79301.00 lm
Işık akısı (lambas):	80000.00 lm
Işıltma hızı:	
4000 Hz:	100.0 %, 0.1 W
Yükseklik:	5.0
Düzenleme:	80° ışık yayılımı
Çizim açısı:	40.000 m
Taahhüt açısı (3):	0.0°
Taahhüt açısı (4):	1.000 m
Işık noktası yarıçapı (1):	14.000 m
Işık noktası yarıçapı (2):	1.000 m
ULR:	0.00
ULOR:	0.00
Minimum ışık yoğunluğu değeri:	
70° ve üzeri:	143 cd/m² *
80° ve üzeri:	55.1 cd/m² *
90° ve üzeri:	1.52 cd/m² *
Işık yoğunluğu oranı:	0%
Her durumda, kullanılabilecek ışıkta tabiiyet aydınlatma alt sınırları verilecek şekilde ayarlanmalıdır, tüm yönleri.	
* Işık yoğunluğu oranını hesaplamak için ışık yoğunluğu değeri (cd/m²) EN 12291:2015 uyarınca lamba ışık akısı ile hesaplanmalıdır.	
Düzenleme oranı 100% ile 100% arasında olmalıdır 0.0	

Değerlendirme hataları için sonuçlar
Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M1)

Lm [cd/m²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.30	✓ 0.78	✓ 0.83	✓ 7	✓ 0.91

Araç yolu 2 (M1)

Lm [cd/m²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.29	✓ 0.78	✓ 0.83	✓ 7	✓ 0.91

Enerji verimliliği indikatörleri için sonuçlar

Performans yoğunluğuna ilişkin gösterge (Dp) 0.000 W/lxm²

Enerji tüketimi yoğunluğu

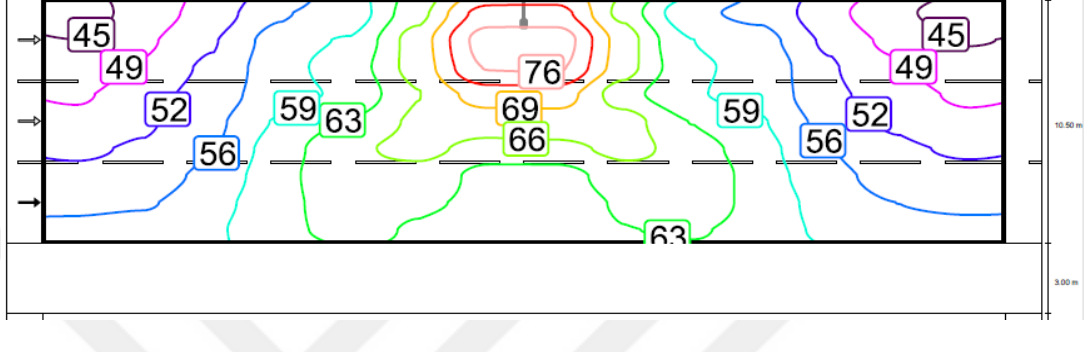
Düzenleme: 5X4 Model ref concav lens 1.2.ltd (0.8 kWh/yıl) 0.0 kWh/m² yıl

Araç yolu 1 (M1)

Bakım çarpanı: 0.80

Ağ: 14 x 9 Noktalar

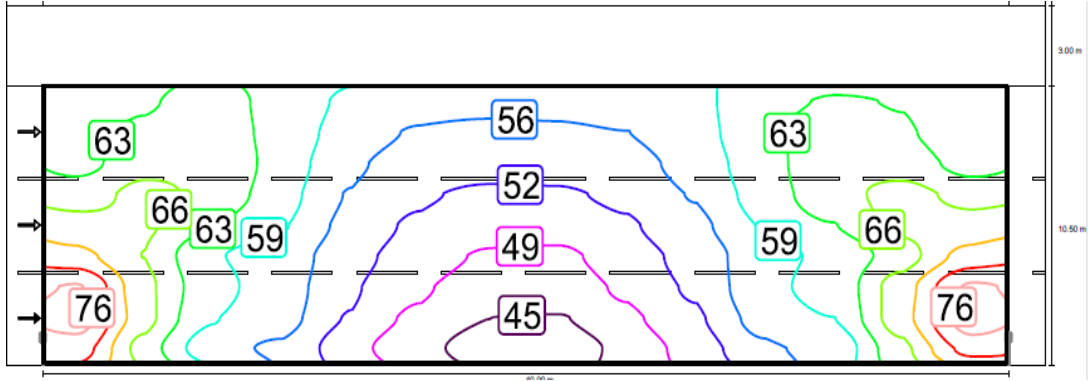
Lm [cd/m²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.30	✓ 0.78	✓ 0.83	✓ 7	✓ 0.91

Yatay aydınlık**Araç yolu 2 (M1)**

Bakım çarpanı: 0.80

Ağ: 14 x 9 Noktalar

Lm [cd/m²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.29	✓ 0.78	✓ 0.83	✓ 7	✓ 0.91

Yatay aydınlık

Ek 2b- LED-mercek arası uzaklık 12 mm iken M2'ye ait Dialux raporu

Proje 0

12/31/2019

DIALux

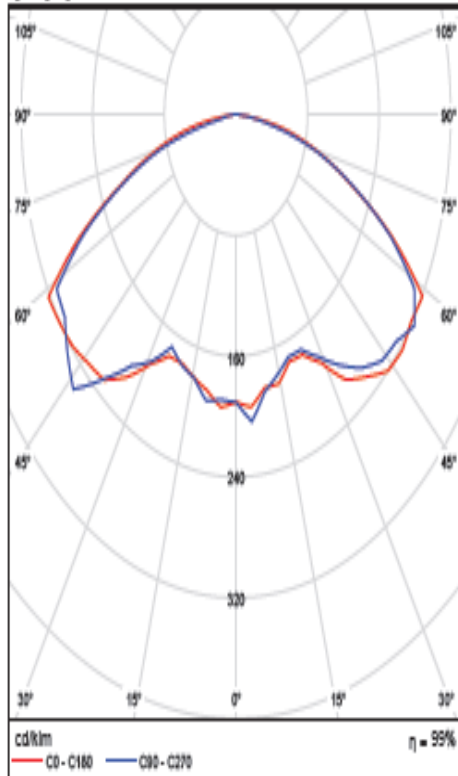
LightTools Simulation 1xunknown / LightTools Simulation - (1xunknown)

LightTools Simulation 1xunknown

Lütfen ışıklık
katalogumuzdan bir
ışıklık resmi alın.

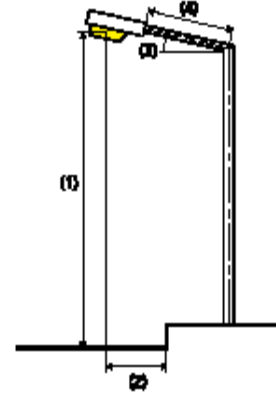
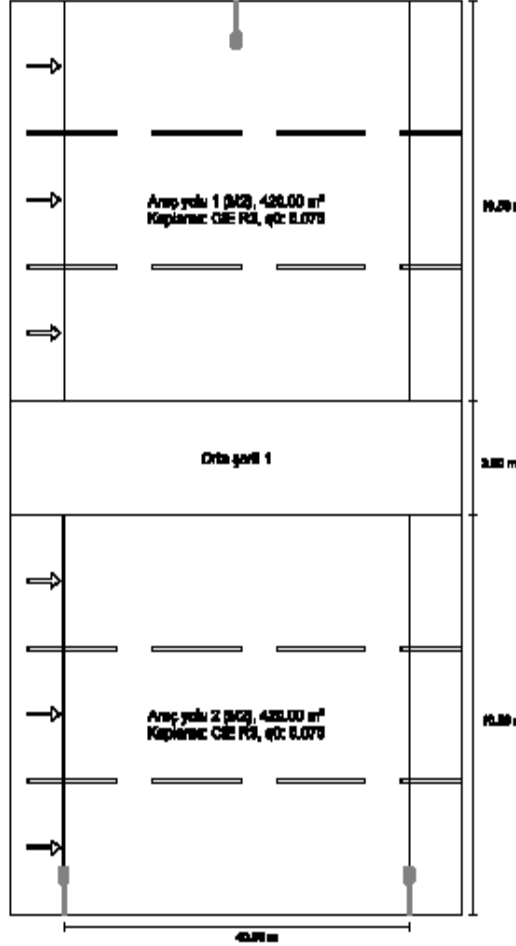
İşletme verimi: 99.08%
Lamba ışığı akışı: 80000 lm
Işıklık ışık akışı: 79262 lm
Güç: 0.1 W
Işık verimi: 792616.8 lm/W

Işık yayımı 1 / Polar LVK



Yol 1 göre EN 13201:2015

LightTools Simulation



Luminaire:	1x Luminaire
Luminaire (yükseklikten aygıt):	75001.00 m
Luminaire (luminaire):	80000.00 m
Luminaire sınıfı:	
4000 lx:	100.0 %, 0.1 W
Yükseklik:	5.0
Dışarıya:	80 luminaire
Çıkış açısı (°):	40.000 m
Taahhüt (°):	0.0°
Taahhüt (uzunluk) (°):	1.000 m
Luminaire yüksekliği (1):	12.000 m
Luminaire yüksekliği (2):	1.000 m

ULR:	0.00
ULOR:	0.00
Minimum ışık yoğunluğu değeri:	
70° ve üzeri:	143 cd/m² *
80° ve üzeri:	55.1 cd/m² *
90° ve üzeri:	1.82 cd/m² *
Işık yoğunluğu sınıfı:	G75

Her durumda, kullanılabilir ışıkta toplam aydınlatma ile ilgili veriler açıkça okutulmalıdır, tüm yönler.

* Işık yoğunluğu sınıfı hesaplamak için ışık yoğunluğu değerleri (cd/m²) EN 13201:2015 uyarınca luminaire ışık sınıfı olarak verilmektedir.

Dışarıya ışık yayılımı istenilen yönde istenilen şekilde aydınlatılır (D.D)

Değerlendirme hataları için sonuçlar

Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M2)

Lm [cd/m²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.49	✓ 0.71	✓ 0.74	✓ 8	✓ 0.91

Araç yolu 2 (M2)

Lm [cd/m²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.49	✓ 0.71	✓ 0.74	✓ 8	✓ 0.91

Enerji verimliliği indikatörleri için sonuçlar

Performans yoğunluğuna ilişkin gösterge (Dp) 0.000 W/lx·m²

Enerji tüketimi yoğunluğu

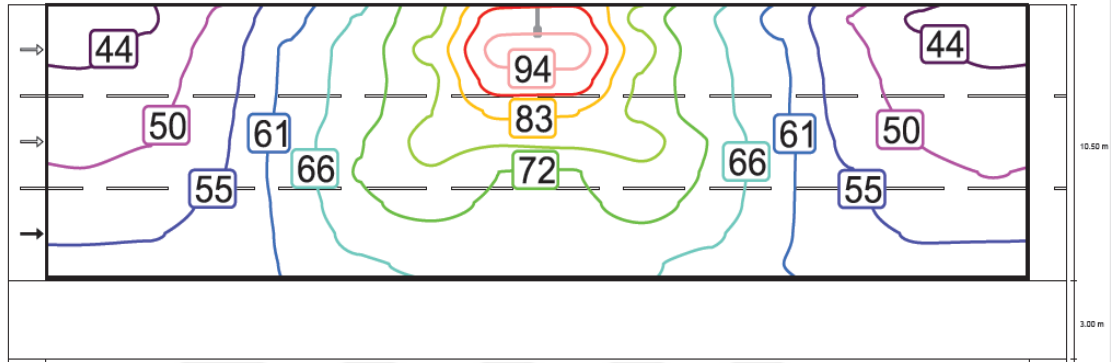
Düzenleme: 5X4 Model ref concav lens 1.2.ltd (0.8 kWh/yıl) 0.0 kWh/m² yıl

Araç yolu 1 (M2)

Bakım çarpanı: 0.80

Ağ: 14 x 9 Noktalar

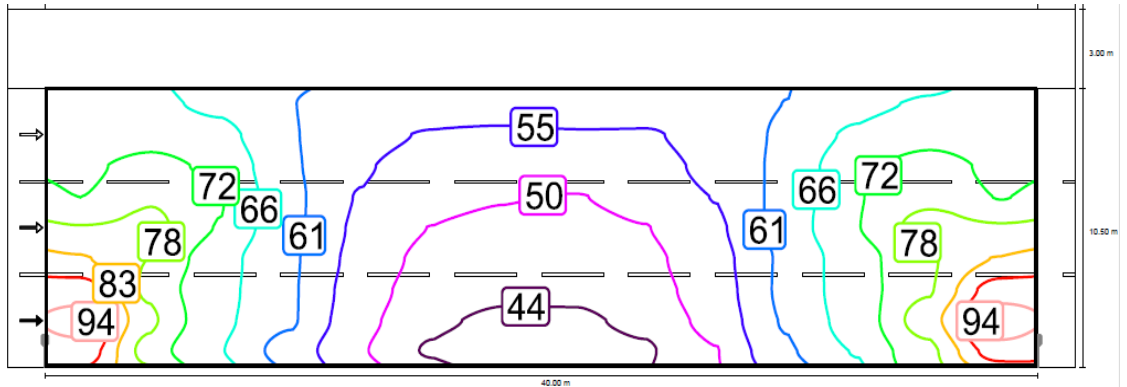
Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.49	✓ 0.71	✓ 0.74	✓ 8	✓ 0.91

Yatay aydınlık**Araç yolu 2 (M2)**

Bakım çarpanı: 0.80

Ağ: 14 x 9 Noktalar

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.49	✓ 0.71	✓ 0.74	✓ 8	✓ 0.91

Yatay aydınlık

Ek 3a - LED-mercek arası uzaklık 14 mm iken M1 ve M2'ye ait Dialux raporu

14mm mesafe M1 yolu için

1/11/2020

DIALux

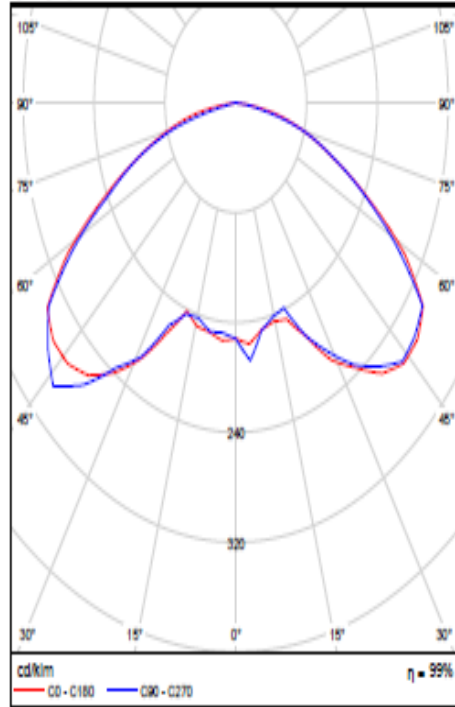
LightTools Simulation 1xunknown / LightTools Simulation - (1xunknown)

LightTools Simulation 1xunknown

Lütfen ışıklık
kataloğumuzdan bir
ışıklık resmi alın.

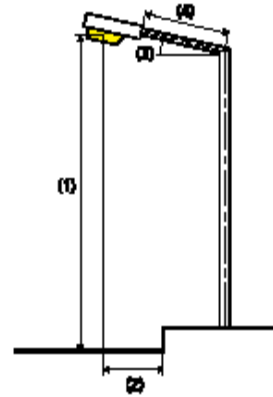
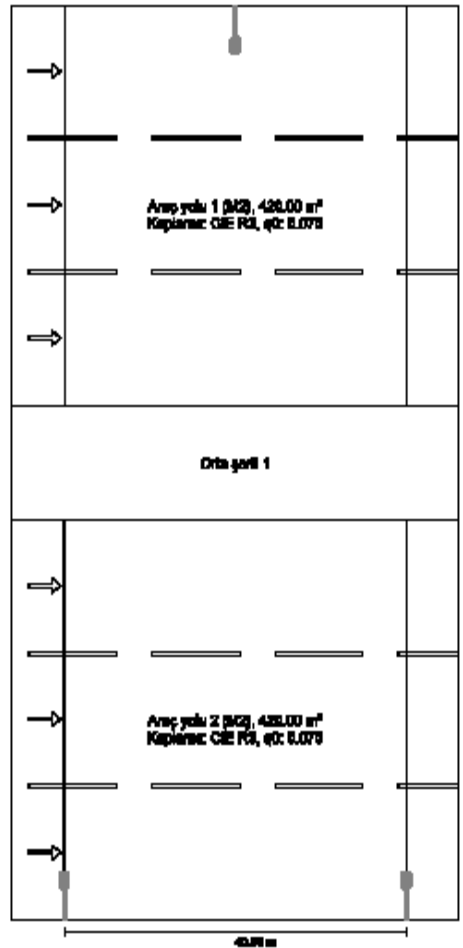
İşletme verimi: 99.39%
Lamba ışığı akışı: 80000 lm
Işıklık ışık akışı: 79515 lm
Güç: 0.1 W
Işık verimi: 795153.0 lm/W

Işık yayımı 1 / Polar LVK



Yol 1 göre EN 13201:2016

LightTools Simulation



Lambda:	1x0,0000000
İpek ölçüsü (yüklenilmesini sağlar):	70015,36 in
İpek ölçüsü (kırılma):	80000,00 in
İpelemleri sayısı	
4000 Hz	100,0 %, 0,1 W
Yüklen:	5,0
Düzenlenir:	Edi türüne boyutlandır
Dirsek açıklığı:	40,000 m
Taşıyıcı kol açılımı (3):	0,0°
Taşıyıcı kol uzunluğu (4):	1,000 m
İpek noktası yokuşluluğu (1):	12,000 m
İpek noktası yüksekliği (2):	1,000 m

ULR:	0,00
ULOR:	0,00
Maksimum ipek yüksekliği değeri	
70° ve üzerindeki:	124 cildim *
60° ve üzerindeki:	47,9 cildim *
50° ve üzerindeki:	0,00 cildim *
İpek yoğunluğu sınırı:	GPa

Hazır durumda, kullanılabilecek ipelemleri tablosu aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

* İpek yüksekliği sınırı: İlemlenmiş ipek ipek yüksekliği değeri (cildim) EN 13204-2016 uyarınca kırılma ipek değeri olarak değerlendirilir.

Düzenlenebilir ipelemleri tablosu aşağıdaki gibi sıralanmıştır.

Değerlendirme hataları için sonuçlar

Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M2)

Lm [cd/m²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.42	✓ 0.73	✗ 0.62	✓ 6	✓ 0.91

Araç yolu 2 (M2)

Lm [cd/m²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.42	✓ 0.72	✗ 0.63	✓ 6	✓ 0.91

Enerji verimliliği indikatörleri için sonuçlar

Performans yoğunluğuna ilişkin gösterge (Dp) 0.000 W/lx·m²

Enerji tüketimi yoğunluğu

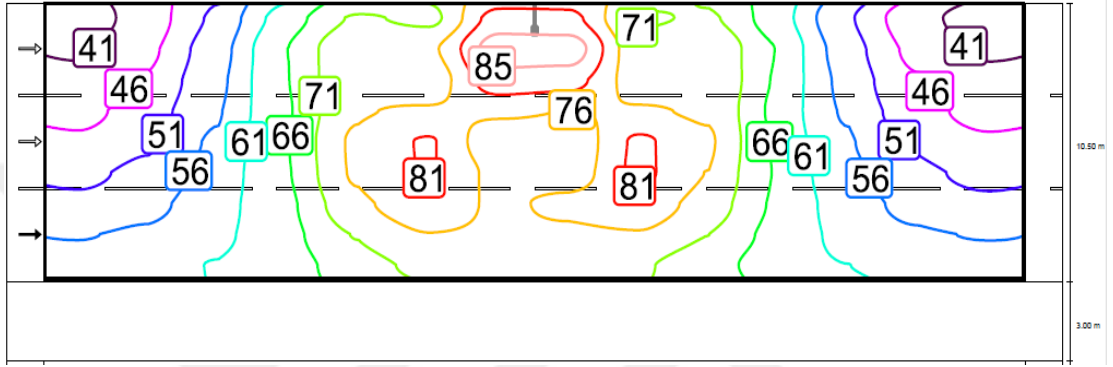
Düzenleme: 5X4 Model ref concav lens 1.1.ltd (0.8 kWh/yıl) 0.0 kWh/m² yıl

Araç yolu 1 (M2)

Bakım çarpanı: 0.80

Ağ: 14 x 9 Noktalar

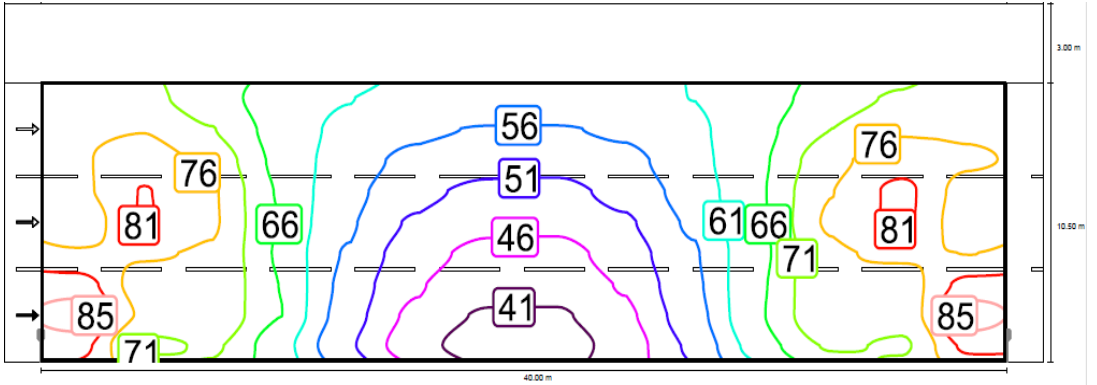
Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.42	✓ 0.73	✗ 0.62	✓ 6	✓ 0.91

Yatay aydınlık**Araç yolu 2 (M2)**

Bakım çarpanı: 0.80

Ağ: 14 x 9 Noktalar

Lm [cd/m ²] ≥ 1.50	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.42	✓ 0.72	✗ 0.63	✓ 6	✓ 0.91

Yatay aydınlık

Ek 3b - LED-mercek arası uzaklık 14 mm iken M1 ve M2'ye ait Dialux raporu

14mm mesafe M1 yolu için

1/11/2020

DIALux

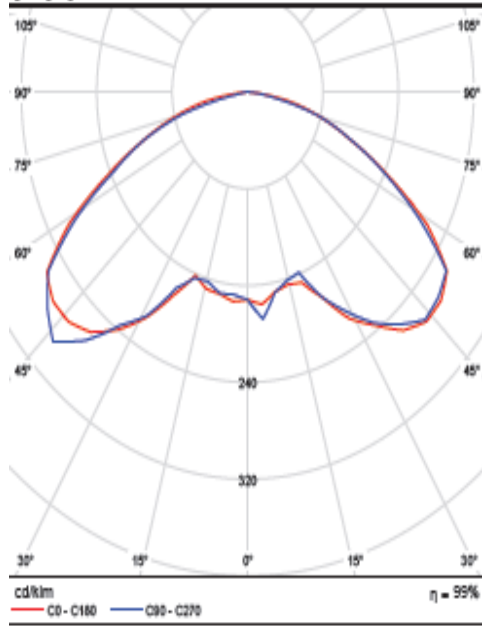
LightTools Simulation 1xunknown / LightTools Simulation - (1xunknown)

LightTools Simulation 1xunknown

Lütfen ışıklık
katalogumuzdan bir
ışıklık resmi alın.

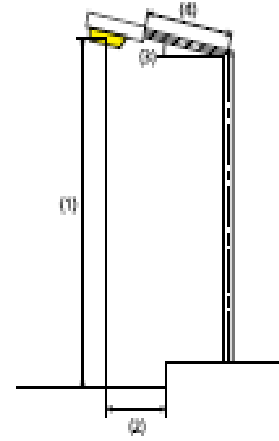
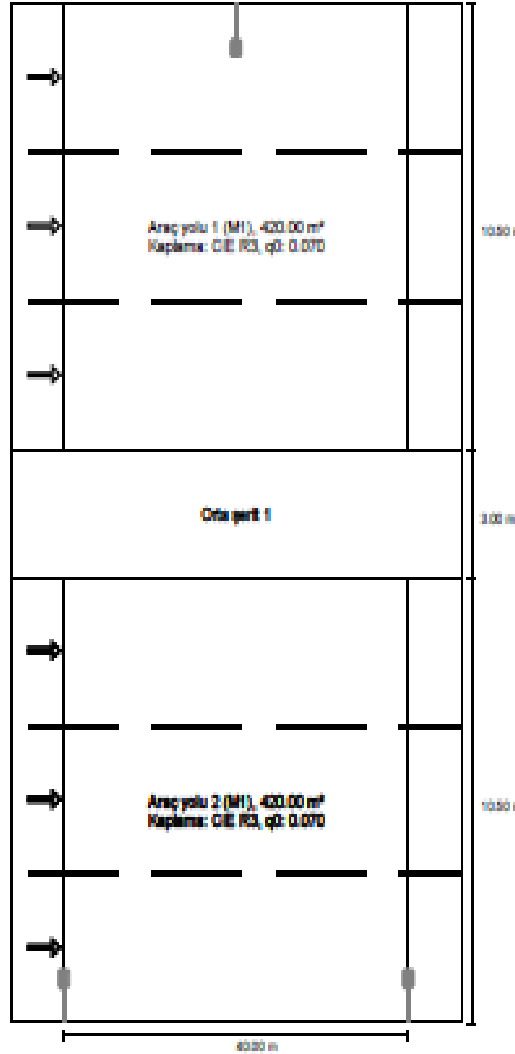
İşletme verimi: 99.39%
Lamba ışığı akışı: 80000 lm
Işıklık ışık akışı: 79515 lm
Güç: 0.1 W
Işık verimi: 795153.0 lm/W

Işık yayımı 1 / Polar LVK



Yol 1 göre EN 13201:2015

LightTools Simulation



Lamba:	Unknown
Işık akısı (aydınlatma aygıtı):	79515.30 lm
Işık akısı (lamba):	80000.00 lm
Işılama açısı:	
4000 h:	100.0 %, 0.1 W
Wlm:	5.0
Düzenleme:	iki taraflı kaydırılmış
Direk açıklığı:	40.000 m
Teğayıcı kol eğimi (3):	0.0°
Teğayıcı kol uzunluğu (4):	1.000 m
Işık noktası yüksekliği (1):	14.000 m
Işık noktası horizontali (2):	1.000 m

ULR:	0.00
LLOR:	0.00
Maksimum ışık yoğunluğu değeri	
70° ve üzerinde:	124 cd/km² *
80° ve üzerinde:	47.9 cd/km² *
90° ve üzerinde:	0.00 cd/km² *
Işık yoğunluğu sınıfı:	G*8

Her durumda, kullanılabilir bölgede beklenen ışık miktarı altı ila yedi verilen açıda oluşturulmuş, 10m yönlerde.

* Işık yoğunluğu sınıfını hesaplamak için ışık yoğunluğu değerleri [cd/km²] EN 13201:2015 uyarınca lamba ışık akısı olarak verilmiştir.

Düzenleme kumaşına indelol sınıfı istemlerini sağlıyor D.2

Değerlendirme hataları için sonuçlar

Bakım çarpanı: 0.80

Araç yolu 1 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.24	✓ 0.77	✓ 0.70	✓ 5	✓ 0.90

Araç yolu 2 (M1)

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.24	✓ 0.73	✓ 0.71	✓ 5	✓ 0.90

Enerji verimliliği indikatörleri için sonuçlar

Performans yoğunluğuna ilişkin gösterge (Dp) 0.000 W/lxm²

Enerji tüketimi yoğunluğu

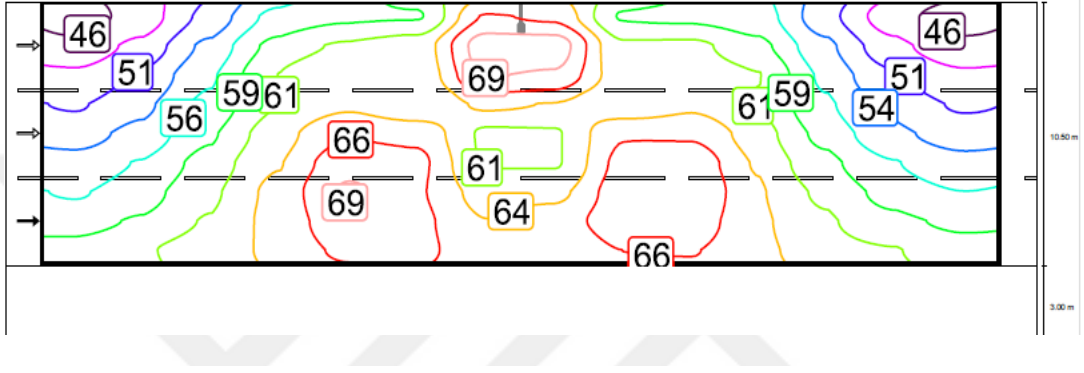
Düzenleme: 5X4 Model ref concav lens 1.1.ltd (0.8 kWh/yıl) 0.0 kWh/m² yıl

Araç yolu 1 (M1)

Bakım çarpanı: 0.80

Ağ: 14 x 9 Noktalar

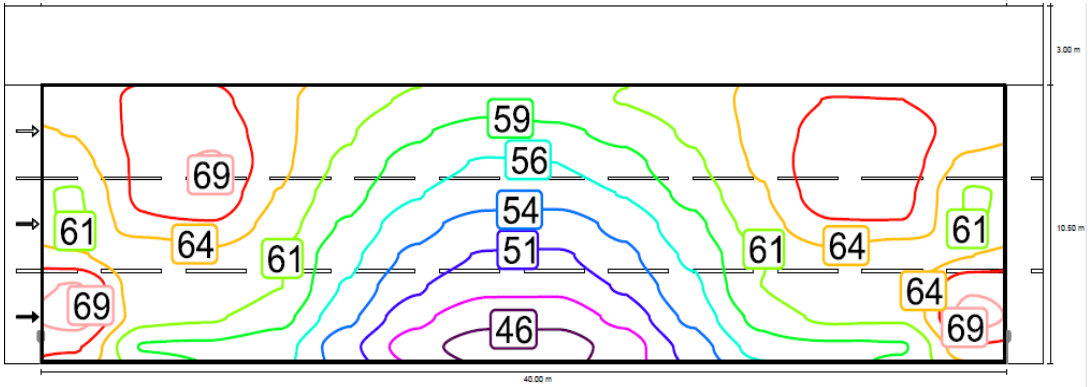
Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.24	✓ 0.77	✓ 0.70	✓ 5	✓ 0.90

Yatay aydınlık**Araç yolu 2 (M1)**

Bakım çarpanı: 0.80

Ağ: 14 x 9 Noktalar

Lm [cd/m ²] ≥ 2.00	Uo ≥ 0.40	UI ≥ 0.70	TI [%] ≤ 10	EIR ≥ 0.35
✓ 3.24	✓ 0.73	✓ 0.71	✓ 5	✓ 0.90

Yatay aydınlık

Ek 4- Akı özellikleri (I_f = 800 mA T_j = 85 °C)

CREE 

XLAMP® CXA1830 LED

FLUX CHARACTERISTICS, EASYWHITE® ORDER CODES AND BINS (I_f = 800 mA, T_j = 85 °C) - CONTINUED

Nominal CCT	CRI		Minimum Luminous Flux			2-Step		3-Step		4-Step		
	Min	Typ	Group	Flux (lm) @ 25 °C	Flux (lm) @ 25 °C	Group	Order Code	Group	Order Code	Group	Order Code	
4000 K	70	75	T4	3440	3887	40H	CXA1830-0000-000H0T1440H			40F	CXA1830-0000-000H0T1440F	
			U2	3680	4158		CXA1830-0000-000H0U2440H				CXA1830-0000-000H0U2440F	
			U4	3955	4484		CXA1830-0000-000H0U4440H				CXA1830-0000-000H0U4440F	
	80	—	T2	3200	3616	40H	CXA1830-0000-000H0T1240H	40G	CXA1830-0000-000H0T1240G	40F	CXA1830-0000-000H0T1240F	
			T4	3440	3887		CXA1830-0000-000H0T1440H				CXA1830-0000-000H0T1440F	
			U2	3680	4158		CXA1830-0000-000H0U2440H				CXA1830-0000-000H0U2440F	
	90	95	R4	2500	2800	40H	CXA1830-0000-000H0R4440H	40G	CXA1830-0000-000H0R4440G	40F	CXA1830-0000-000H0R4440F	
			U2	2700	3141		CXA1830-0000-000H0U2440H				CXA1830-0000-000H0U2440F	
			S4	2900	3379		CXA1830-0000-000H0S4440H				CXA1830-0000-000H0S4440F	
	3500 K	80	—	S4	2900	3379	35H	CXA1830-0000-000H0S4480H	35G	CXA1830-0000-000H0S4480G	35F	CXA1830-0000-000H0S4480F
				T2	3200	3616		CXA1830-0000-000H0T2480H				CXA1830-0000-000H0T2480F
				T4	3440	3887		CXA1830-0000-000H0T4480H				CXA1830-0000-000H0T4480F
93		95	R2	2400	2700	35H	CXA1830-0000-000H0R2480H	35G	CXA1830-0000-000H0R2480G	35F	CXA1830-0000-000H0R2480F	
			R4	2600	2900		CXA1830-0000-000H0R4480H				CXA1830-0000-000H0R4480F	
			U2	2700	3141		CXA1830-0000-000H0U2480H				CXA1830-0000-000H0U2480F	
3000 K	80	—	S4	2900	3379	30H	CXA1830-0000-000H0S4480H	30G	CXA1830-0000-000H0S4480G	30F	CXA1830-0000-000H0S4480F	
			T2	3200	3616		CXA1830-0000-000H0T2480H				CXA1830-0000-000H0T2480F	
			T4	3440	3887		CXA1830-0000-000H0T4480H				CXA1830-0000-000H0T4480F	
	93	95	Q4	2500	2800	30H	CXA1830-0000-000H0Q4480H	30G	CXA1830-0000-000H0Q4480G	30F	CXA1830-0000-000H0Q4480F	
			R2	2600	2900		CXA1830-0000-000H0R2480H				CXA1830-0000-000H0R2480F	
			R4	2800	3200		CXA1830-0000-000H0R4480H				CXA1830-0000-000H0R4480F	

Notes

- * Cree maintains a tolerance of ±7% on flux and power measurements, ±0.005 on chromaticity (C_x, C_y) measurements and a tolerance of ±2 on CRI measurements. See the Measurements section (page 16).
- * Cree XLamp CXA1830 LED order codes specify only a minimum flux bin and not a maximum. Cree may ship LEDs in flux bins higher than the minimum specified by the order code without advance notice. Shipments will always adhere to the chromaticity bin restrictions specified by the order code.
- * Flux values @ 25 °C are calculated and for reference only.

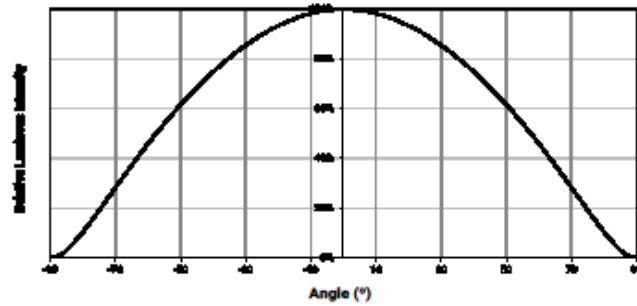
Copyright © 2013-2016 Cree, Inc. All rights reserved. The information in this document is subject to change without notice. Cree®, XLamp® and EasyWhite® are registered trademarks and the Cree logo is a trademark of Cree, Inc. UL® and the UL logo are registered trademarks of UL LLC.

Ek 5- Performans gurubunun parlaklığı ($I_f = 800 \text{ mA}$ $T_j = 85^\circ\text{C}$)

CREE 

XLAMP® CXA1830 LED

TYPICAL SPATIAL DISTRIBUTION



PERFORMANCE GROUPS - BRIGHTNESS ($I_f = 800 \text{ mA}$, $T_j = 85^\circ\text{C}$)

XLamp CXA1830 LEDs are tested for luminous flux and placed into one of the following bins.

Group Code	Minimum Luminous Flux	Maximum Luminous Flux
Q2	2100	2300
Q4	2200	2400
R2	2400	2600
R4	2600	2700
S2	2700	2900
S4	2900	3000
T2	3200	3440
T4	3440	3680
U2	3680	3955
U4	3955	4200
V2	4200	4545

Copyright © 2013-2014 Cree, Inc. All rights reserved. The information in this document is subject to change without notice. Cree®, XLamp® and EasyWhite® are registered trademarks and the Cree logo is a trademark of Cree, Inc. U.S. and the UR logo are registered trademarks of UL LLC.

Ek 6- Çeşitli malzemeler için 25°C'de termal iletkenlik ve yayılım



THERMAL MANAGEMENT OF CREE XLAMP® LEDS

possible because of other factors that must be considered such as weight, cost, and manufacturability. Each of these must be evaluated for each application to determine the best material and manufacturing process.

Cast or forged aluminum is typically used for heat sinks. Anodizing aluminum gives a heat sink a much higher (to about 0.8) emissivity than standard aluminum and helps with radiative heat transfer to the environment.

Table 3: Thermal conductivity and emissivity for various materials at 25 °C

Material	Thermal Conductivity (W/m K)	Approximate Emissivity
Acrylic	0.2	0.94
Air	0.024	Not applicable
Aluminum	120 - 240	0.02 - 0.9 (depending on finish)
Ceramics	Alumina: 15 - 40 Aluminum nitride: 100 - 200	0.4 - 0.7 0.9
Conductive polymers	3 ~ 20	Not applicable
Copper	401	0.05 - 0.8 (depending on finish)
Diamond	2000	1.0
FR4	0.2	0.7 - 0.8
Glass	1.05	0.6 - 0.97
Silicon	150	0.6
Silicon carbide	350	0.85
Silver	429	0.02 - 0.074
Stainless steel	16	0.1 - 0.9 (depending on finish)
Thermal grease/epoxies/pads	0.1 ~ 10	Not applicable
Water	0.58	0.85 - 0.99
Wood	0.17	0.8 - 0.9

Heat sink design can be very complicated and limited by many restrictions such as space constraints, cost, weight, manufacturability and countless other requirements. There is no one right answer to heat sink design and each application must be approached on a case-by-case basis, but the following general guidelines can help in the design process.

- Maximize the surface area of the heat sink to maximize its ability to convect heat away from the LED source.
- A rough estimate of approximately 5-10 in² of heat sink surface area per watt of heat can be used for a first-order estimate of heat sink size.
- Do not restrict the airflow between the fins. Understand the orientation of the heat sink in the application in which it will be used and maximize the airflow through the heat sink and around as much surface area as possible.
- Choose a material that has good thermal conductivity to spread heat away from the LEDs.
- Use high surface emissivity heat sinks to maximize thermal radiation heat transfer. Anodizing dramatically increases the emissivity of an aluminum heat sink.
- Passive (natural convection) heat sinks are always preferred for many reasons, but if appropriate, actively cooled heat sinks can significantly improve performance.
- Use of thermal modeling can alleviate repetitive prototyping and indicate design deficiencies and potential areas of improvement early in the design process.

Ek 7- EVATEG ölçüm sonuçları ve analiz raporu

 	ÖZYEGİN ÜNİVERSİTESİ EVATEG MERKEZİ (ÖZYEGİN UNIVERSITY EVATEG CENTER) Özyeğin Üniversitesi Çekmeköy Kampüsü Nişantepe Mah. Orman Sok. 34794 Çekmeköy – İSTANBUL www.evateg.com evateg.info@ozyegin.edu.tr	 Türk TEKNİK AB-1115-T
Ölçüm Sonuçları ve Analiz Raporu (Measurement Results and Analysis Report)		AB-1115-T 00853-1 30.01.2020
LABORATUVAR BİLGİSİ (LABORATORY INFORMATION)		http://www.evateg.com/
ADRES (ADDRESS)	Özyeğin Üniversitesi Çekmeköy Kampüsü Nişantepe Mah. Orman Sok. 34794 Çekmeköy – İSTANBUL	
ÇEVRE ŞARTLARI (ENVIRONMENTAL CONDITIONS)	25 °C ± 1, %40RH ± %10 Laboratuvarımızda kabul edilen ürünün 25°C'de +/- 1 sapmayla ve bağıl nemi %45'de ± %10 sapma ile ortam şartlarında standartlara uygun olarak ölçümü tamamlanmıştır.	
NUMUNE BİLGİLERİ (SAMPLE INFORMATION)		
TANIMI (DESCRIPTION)	Cadde Armatürü (LENSLI)	
MODELİ/KODU (MODEL/CODE)	Cadde-1...Cadde-15	
BEYAN GÜCÜ (RATED POWER)	110Watt	
ÇALIŞMA GERİLİMİ (RATED VOLTAGE)	220Volt	
ÇALIŞMA FREKANSI (RATED FREQUENCY)	50Hz	
ÇALIŞMA AKIMI (RATED CURRENT)	700 MA	
İŞIK KAYNAĞI TİPİ / MARKASI (LIGHT SOURCE TYPE / MARK)	LED (POWER LED)	
İŞIK KAYNAĞI AÇIKLAMASI (LIGHT SOURCE DESCRIPTION)	21 x 5 = 110W	
İŞIK KAYNAĞI SAYISI (NUMBER OF SOURCE)	21 ADET	
BALAST/LED SÜRÜCÜ BİLGİLERİ (BALAST/LED DRIVER INFORMATION)	Mean Well LPC-120	
DUY TİPİ (LAMP-HOLDER TYPE)	2"li priz	
ATEŞLEYİCİ BİLGİLERİ (IGNITOR INFORMATION)	-	
6-R.001/Rev.9/09.05.2019 2 / 17		
Sonuçlar sadece yukarıda tanımlanan numune için geçerlidir. (Results are only valid for the sample which is defined above.)		

Ek 7- Devam

 	ÖZYEGİN ÜNİVERSİTESİ EVATEG MERKEZİ (ÖZYEGİN UNIVERSITY EVATEG CENTER) Özyeğin Üniversitesi Çekmeköy Kampüsü Nişantepe Mah. Orman Sok. 34794 Çekmeköy - İSTANBUL www.evateg.com evateg.info@ozyegin.edu.tr	 Türkiye TEKNİK GÖRÜŞ YERİ AB-1115-T
Ölçüm Sonuçları ve Analiz Raporu (Measurement Results and Analysis Report)		AB-1115-T
		00853-1
		30.01.2020

ÖLÇÜM SONUÇLARI (MEASUREMENT RESULTS)	
KARARLI HAL SÜRESİ (STEADY STATE TIME)	120 dk
ORTALAMA GERİLİM (AVERAGE VOLTAGE) (V)	220 VAC
FREKANS (FREQUENCY) (HZ)	50
AKTİF GÜÇ (ACTIVE POWER) (W)	326
ORTALAMA AKIM (AVERAGE CURRENT) (mA)	2760
GÜÇ FAKTÖRÜ (POWER FACTOR) (PF)	0.536
IŞIK AKISI (LUMINOUS FLUX) (LM)	26219
VERİMLİLİK (EFFICIENCY) (LM/W)	80
MERKEZİ YOĞUNLUK (0,0) (CENTRAL INTENSITY) (CD)	10985
RENKSEL GERİVERİM İNDEKSİ (COLOR RENDERING INDEX) (CRI)	-
RENK SICAKLIĞI (COLORATED COLOR TEMPERATURE) (CCT) (K)	-

6-R.001/Rev.9/09.05.2019		4 / 17
--------------------------	--	--------

Sonuçlar sadece yukarıda tanımlanan numune için geçerlidir. (Results are only valid for the sample which is defined above.)

ÖZGEÇMİŞ

Adı ve Soyadı : Duygu Yiğit Ünlü

EĞİTİM BİLGİLERİ

Lisans : Gazi Üniversitesi, Fizik Bölümü, 2006-2010.

Yüksek Lisans : Gazi Üniversitesi, Fizik Anabilim Dalı, 2011-2014.

Doktora : Aksaray Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, 2016-2020.