

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**LED IŞIK KAYNAKLI ENERJİ VERİMLİ
ENDÜSTRİYEL AYDINLATMA ARMATÜRÜ OPTİK TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Niyazi GÜNDÜZ

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2012

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

**LED IŞIK KAYNAKLI ENERJİ VERİMLİ
ENDÜSTRİYEL AYDINLATMA ARMATÜRÜ OPTİK TASARIMI**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

**Niyazi GÜNDÜZ
(301091066)**

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sermin ONAYGİL

HAZİRAN 2012

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301091066 numaralı Yüksek Lisans Öğrencisi **Niyazi GÜNDÜZ**, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “**LED IŞIK KAYNAKLI ENERJİ VERİMLİ ENDÜSTRİYEL AYDINLATMA ARMATÜRÜ OPTİK TASARIMI**” başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı : **Prof. Dr. Sermin ONAYGİL**
İstanbul Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri : **Prof. Dr. Nurettin UMURKAN**
Yıldız Teknik Üniversitesi

Doç. Dr. Önder GÜLER
İstanbul Teknik Üniversitesi

Teslim Tarihi : **04 Mayıs 2012**
Savunma Tarihi : **07 Haziran 2012**

Aileme,

ÖNSÖZ

Çalışmalarım boyunca hoş görüsünü ve desteğini her zaman yanımda hissettiğim aileme ve bu tezin oluşmasında bana yol gösteren ve değerli bilgilerinden yararlandığım tez danışmanım Prof. Dr. Sermin ONAYGİL’e çok teşekkür ederim.

Ayrıca, çalışmam boyunca yardımlarını hiçbir zaman benden esirgemeyen, bilgi ve tecrübelerinden faydalandığım, örnek aldığım ve beraber çalışmaktan huzur ve mutluluk duyduğum Ar. Gör. Emre ERKİN, Ar. Gör. M. Berker YURTSEVEN’e ve İTÜ Enerji Enstitüsü, Enerji Planlaması ve Yönetimi A.B.D. ailesine çok teşekkür ederim.

Mayıs 2012

Niyazi GÜNDÜZ
Elektrik Mühendisi

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER	ix
KISALTMALAR	xi
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xiii
ŞEKİL LİSTESİ.....	xv
ÖZET.....	xvii
SUMMARY	xix
1. GİRİŞ	1
2. ENDÜSTRİYEL TESİSLERDE AYDINLATMA TEKNİĞİ	3
2.1 Aydınlatma Tasarım Kriterleri	3
2.1.1 Aydınlatılmış Çevre	4
2.1.2 Parıltı Dağılımı.....	4
2.1.3 Aydınlık Düzeyi	5
2.1.4 Düzgünlük.....	6
2.1.5 Kamaşma.....	7
2.1.5.1 Psikolojik Kamaşma.....	7
2.1.5.2 Kamaşmaya Karşı Ekranlama	8
2.1.5.3 Örtü Yansımaları ve Yansımış Kamaşma	8
2.2 Endüstri Tesislerinde Kullanılan Işık Kaynakları	9
2.2.1 LED'ler (Işık Yayan Diyotlar).....	11
2.2.1.1 LED'lerin Çalışma Prensibi	11
2.2.1.2 LED'lerde Beyaz Işığın Eldesi	13
2.2.1.3 LED'lerin Karakterizasyonu	16
2.2.2 Metal Halojen Lambalar	20
2.2.3 Flüoresan Lambalar.....	21
3. LED IŞIK KAYNAKLI ARMATÜR TASARIMI.....	25
3.1 Tasarım Süreçleri	25
3.1.1 Gerekli Aydınlatma Kriterlerinin Belirlenmesi	25
3.1.2 Tasarım Hedeflerinin Belirlenmesi	26
3.1.3 Optik, Isıl ve Elektriksel Verimlerin Belirlenmesi	26
3.1.3.1 Optik Verim.....	27
3.1.3.2 Isıl Verim.....	29
3.1.3.3 Elektriksel Verim	31
3.1.4 Gerekli LED Sayısının Belirlenmesi	32
3.1.5 Prototip Oluşturma	32
3.2 Optik Tasarım.....	32
3.2.1 Optik Işık Kontrolünün Fiziksel Prensipleri	33
3.2.1.1 Yansıma.....	33
3.2.1.2 Kırılma (Snell Kanunu)	34
3.2.1.3 İletim	37
3.2.1.4 Yutma	37

3.2.1.5 Difüzyon	38
3.2.2 Reflektörler (Yansıtıcılar)	39
3.2.2.1 Dairesel Reflektörler	39
3.2.2.2 Parabolik Reflektörler	40
3.2.2.3 Eliptik Reflektörler	42
3.2.2.4 Hiperbolik Reflektörler	43
3.2.3 Lensler (Mercekler) ve Prizmalar (Işık Kırıcılar)	44
3.2.3.1 Lensler (Mercekler)	44
3.2.3.2 Prizmalar (Işık Kırıcılar)	45
3.2.4 Difüzörler (Dağıtıcılar)	47
3.2.5 Optik Işık Kontrolünde Kullanılan Malzemeler	47
3.2.5.1 Cam.....	47
3.2.5.2 Plastikler	49
3.2.5.3 Metaller.....	50
3.2.5.4 Aydınlatmada Kullanılan Kaplama Yüzeyi.....	52
4. ENDÜSTRİYEL TESİSLER İÇİN LED IŞIK KAYNAKLI ARMATÜR	
OPTİK TASARIM HESAPLARI.....	55
4.1 Baz Alınan Geleneksel Yüksek Tavan Endüstriyel Armatürleri.....	55
4.1.1 Metal Halojen Işık Kaynaklı Armatürler	55
4.1.2 Flüoresan Işık Kaynaklı Armatürler.....	58
4.2 LED Işık Kaynaklı Armatür Optik Tasarımı.....	59
4.2.1 Tasarım Hedefleri ve Kriterleri	60
4.2.2 Tasarımlarda Kullanılan Elemanlar	61
4.2.2.1 LED	61
4.2.2.2 Lensler	62
4.2.2.3 PCB (Baskı Devre Kartı).....	63
4.2.2.4 Cam.....	63
4.2.2.5 Kasa	64
4.2.3 SPEOS Yazılımı ile Armatürlerin Optik Açından Tasarlanması	64
4.2.3.1 LED Sayısının Belirlenmesi	64
4.2.3.2 Armatür Elemanlarının Çizimi	67
4.3 LED, Metal Halojen ve Flüoresan Lambalı Armatürlerin Aydınlatma Tasarım	
Hesapları ve Karşılaştırmaları	75
4.3.1 Tasarımda Kullanılan Hacmin Özellikleri	75
4.3.2 Hesaplamalar	76
5. SONUÇ VE ÖNERİLER.....	81
KAYNAKLAR.....	85
ÖZGEÇMİŞ.....	87

KISALTMALAR

LED	: Işıık Yayan Diyod
CCT	: Renk Sıcaklığı
CRI	: Renksel Geriverim Endeksi
SPD	: Spektral Güç Dağılımı
CIE	: Uluslararası Aydınlatma Komisyonu
UV	: Ultraviole
PMMA	: Polimetakrilat
MH	: Metal Halojen Lamba
LOR	: Işıık Çıktı Oranı
TS	: Türk Standartı
EN	: Avrupa Standartı
UGR	: Birleşik Kamaşma Değeri

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2.1 : Endüstriyel tesislerde otomotiv sektörü için TS EN 12464-1'e göre sağlanması gereken değerler.	6
Çizelge 2.2 : Çalışma alanı ve çalışma alanını çevreleyen yüzeylerdeki ortalama aydınlık düzeylerine göre olması gereken düzgünlük değerleri.	7
Çizelge 2.3 : Belirlenmiş lamba parıltıları için minimum ekranlama açıları.	8
Çizelge 2.4 : LED'ler için beyaz ışık oluşturma yöntemlerinin üstünlükleri ve sakıncaları	15
Çizelge 2.5 : Flüoresan, metal halojen ve LED ışık kaynaklarının karşılaştırılması.	24
Çizelge 3.1 : Işık kaynaklarının ısı transfer mekanizmalarının karşılaştırılması.....	29
Çizelge 3.2 : Boşlukta, 589nm dalga boyunda ışıkla ölçülen bazı malzemelerin kırılma indisleri	35
Çizelge 4.1 : Tasarlanacak LED armatürler için tasarım hedefleri ve kriterleri.....	60
Çizelge 4.2 : CREE XM-L T5 serisi LED'in 0,7A sürme akımı için 25°C ve 90°C jonksiyon sıcaklıkları için değerleri.	62
Çizelge 4.3 : Tasarımda kullanılacak lenslerin özellikleri.....	62
Çizelge 4.4 : 12000 lümen hedeflenen armatür için üç farklı lens kullanılması durumunda gerekli LED sayıları.	65
Çizelge 4.5 : 20000 lümen hedeflenen armatür için üç farklı lens kullanılması durumunda gerekli LED sayıları.	65
Çizelge 4.6 : 12000 lümen hedeflenen armatür için üç farklı lens kullanılması durumunda gereken düzeltilmiş LED sayıları.....	66
Çizelge 4.7 : 20000 lümen hedeflenen armatür için üç farklı lens kullanılması durumunda gereken düzeltilmiş LED sayıları.	66
Çizelge 4.8 : LED dizilimleri ve MCPCB boyutları.....	69
Çizelge 4.9 : Tasarlanan armatürler için kasa, cam ve armatür boyutları.	71
Çizelge 4.10 : Tasarlanan armatürlerin optik, ısı ve elektriksel verileri.....	74
Çizelge 4.11 : LED ışık kaynaklı armatürler için aydınlatma hesabı sonuçları.	77
Çizelge 4.12 : LED ışık kaynaklı tasarımlar için öneriler.	77
Çizelge 4.13 : M.H. ışık kaynaklı armatürler için aydınlatma hesabı sonuçları.....	78
Çizelge 4.14 : Metal halojen ışık kaynaklı armatürler için öneriler.	78
Çizelge 4.15 : Flüoresan ışık kaynaklı armatürler için aydınlatma hesabı sonuçları	79
Çizelge 4.16 : Flüoresan ışık kaynaklı armatürler için öneriler.....	79
Çizelge 4.17 : LED ışık kaynaklı en iyi tasarımların NGY değerleri.....	79
Çizelge 4.18 : Metal halojen ışık kaynaklı en iyi armatürlerin NGY değerleri.....	79
Çizelge 4.19 : Flüoresan ışık kaynaklı en iyi armatürlerin NGY değerleri.	80
Çizelge 4.20 : Tasarlanan LED ışık kaynaklı armatürlerin baz metal halojen lambalı armatürlere göre tasarruf potansiyelleri.	80
Çizelge 4.21 : Tasarlanan LED ışık kaynaklı armatürlerin baz flüoresan lambalı armatürlere göre tasarruf potansiyelleri.	80

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1 : Endüstri tesislerinde kullanılan ışık kaynakları.	9
Şekil 2.2 : Elektronların boşluklarla birleşerek foton yayması.....	11
Şekil 2.3 : Tipik bir LED modülü.	12
Şekil 2.4 : LED'in ürettiği ışığın şiddetinin ve dalga boyunun ortam sıcaklığı ile değişimi [4].	12
Şekil 2.5 : Bazı bilinen yarı iletkenler için bant genişliği, dalga boyu ve göz spektral duyarlık eğrisi $V(\lambda)$ [4].	13
Şekil 2.6 : InGaN ve AlInGaP LED'lerin, 350 mA ve 25 °C çalışma koşullarında dalga boyuna göre verimlerinin değişimi.	13
Şekil 2.7 : Beyaz ışık elde etme yöntemleri.	14
Şekil 2.8 : LED ömrünün jonksiyon sıcaklığıyla değişimi.	16
Şekil 2.9 : Bir LED'in çalışmasını karakterize eden ana parametreler ve bunların etkileşimleri.	16
Şekil 2.10 : Jonksiyon sıcaklığının AlInGaP ve InGaN tabanlı LED'lerin spektral güç dağılımı ve ışık çıktı oranı üzerindeki etkisi.	17
Şekil 2.11 : PCB'nin üzerine yerleştirilmiş bir LED'in basitleştirilmiş ısı model devresi.	18
Şekil 2.12 : LED ve LED modül örnekleri.	20
Şekil 2.13 : Metal halojen lambalar.	21
Şekil 2.14 : Flüoresan lamba.	22
Şekil 2.15 : Flüoresan lambanın çalışma prensibi	23
Şekil 2.16 : Farklı flüoresan lambaların tüp çaplarının karşılaştırılması.	23
Şekil 3.1 : Örnek LED modülünden çıkan ışınların bilgisayar ortamında gösterimi.	28
Şekil 3.2 : Jonksiyon sıcaklığı artışının ışık akısına etkisi.	30
Şekil 3.3 : Armatür üç boyutlu çizimi.	30
Şekil 3.4 : Örnek bir ısı simülasyon sonucu ve hava akış yönü.	31
Şekil 3.5 : Yansıma tipleri.	34
Şekil 3.6 : Kırılma ve Snell kanunu.	35
Şekil 3.7 : Toplam içsel yansıma.	36
Şekil 3.8 : Beyaz ışığın dağılma etkisi.	37
Şekil 3.9 : Işık ışınlarının iletimi.	37
Şekil 3.10 : Yutmanın Lambert kanunu.	38
Şekil 3.11 : Difüz iletim ve yansıma.	38
Şekil 3.12 : Dairesel-Konkav bir reflektörden yansıyan ışık.	40
Şekil 3.13 : Parabolik yansıma.	41
Şekil 3.14 : 200W Tungsten halojen lambanın 29mm odak uzunluğuna sahip parabolik bir reflektördeki ışık dağılım eğrisi.	42
Şekil 3.15 : Parabolik louvre yapısı.	42
Şekil 3.16 : Eliptik reflektör.	43

Şekil 3.17 : Hiperbolik reflektör.	44
Şekil 3.18 : Lens çeşitleri.	44
Şekil 3.19 : Paralel ışık ışını solda konveks ya da birleşen, sağda konkav ya da dağılan lens şeklinde yansır.	45
Şekil 3.20 : Solda dağılan ışık ışınının konveks lensten, sağda birleşen ışık ışınının konkav lensten yansması gösterilmiştir.	45
Şekil 3.21 : Bir prizmada ışığın kırılışları.	46
Şekil 3.22 : (a) Plastik prizmatik dağıtıcı ve levha altının ayrıntılı fotoğrafı, (b) camın dış tarafındaki çizgisel prizmacıklar.	46
Şekil 3.23 : (a) Dışında çizgisel prizmacıklar bulunan akrilikten yapılmış bir yansıtıcı, (b) bir prizmacıktaki yansıma ve geçirmenin açıklanması.	47
Şekil 4.1 : Philips Performalux endüstriyel tip armatürü.	56
Şekil 4.2 : Performalux dar açılı armatür ışık dağılım eğrisi.	57
Şekil 4.3 : Performalux orta açılı armatür ışık dağılım eğrisi.	57
Şekil 4.4 : Performalux geniş açılı armatür ışık dağılım eğrisi.	57
Şekil 4.5 : EAE 4x58W T8 flüoresan lambalı armatür ve ışık dağılım eğrisi.	58
Şekil 4.6 : EAE 2x58W T8 flüoresan lambalı armatür ve ışık dağılım eğrisi.	58
Şekil 4.7 : CREE Xlamp XM-L serisi LED.	61
Şekil 4.8 : Örnek bir MCPCB.	63
Şekil 4.9 : Schott BK7 camın yutma değişim grafiği.	64
Şekil 4.10 : Tina3 W lens geometrik boyutları.	67
Şekil 4.11 : Tina3 W lens ışık dağılımı.	67
Şekil 4.12 : Tina3 WW lens geometrik boyutları.	68
Şekil 4.13 : Tina3 WW lens ışık dağılımı.	68
Şekil 4.14 : Tina3 WWW lens geometrik boyutları.	68
Şekil 4.15 : Tina3 WWW lens ışık dağılımı.	69
Şekil 4.16 : Örnek bir MCPCB tasarımı.	70
Şekil 4.17 : Örnek bir tasarım için kasa boyutları.	70
Şekil 4.18 : A_{dar} armatürünün görünümü ve ışık dağılımı.	71
Şekil 4.19 : A_{orta} armatürünün görünümü ve ışık dağılımı.	71
Şekil 4.20 : $A_{geniş}$ armatürünün görünümü ve ışık dağılımı.	72
Şekil 4.21 : B_{dar} armatürünün görünümü ve ışık dağılımı.	72
Şekil 4.22 : B_{orta} armatürünün görünümü ve ışık dağılımı.	72
Şekil 4.23 : $B_{geniş}$ armatürünün görünümü ve ışık dağılımı.	73
Şekil 4.24 : Tasarımı çalıştırmadan önceki armatürün son hali.	73
Şekil 4.25 : Örnek bir çalışma hacmi.	76

LED IŞIK KAYNAKLI ENERJİ VERİMLİ ENDÜSTRİYEL AYDINLATMA ARMATÜRÜ OPTİK TASARIMI

ÖZET

Gelişen teknoloji ile birlikte insanoğlunun enerjiye olan talebi hergün artmaktadır. Yeryüzünün sınırlı kaynakları ve sürdürülebilirlik kavramı düşünüldüğünde, gelecek kuşaklara daha temiz ve yaşanabilir bir çevre bırakmak için enerji verimli sistemlerin kullanılması gerekmektedir. Bu anlamda, elektrik enerjisi tüketimi içinde önemli bir paya sahip olan aydınlatma sistemlerinde en etkili elemanlardan biri olan enerji verimli armatürlerin kullanımı da üzerinde çalışılması gereken bir konu olarak karşımıza çıkmaktadır.

Ülkemizde tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık yarısının harcandığı endüstriyel tesislerde enerji verimli armatürlerin kullanıldığı tesisatlarla önemli enerji tasarrufu sağlanmasının yanı sıra, iş verimi de artırılarak ülke gayri safi milli hasılamıza önemli katkılar yapılabilmektedir. Bu kapsamda, endüstriyel tesisler için tasarlanan enerji verimli armatürlerin uzun ömürlü, bakım ve işletme masraflarının az olması, görsel, güvenlik ve aydınlatma kriterleri açısından gerekli özellikleri sağlaması esastır. Armatür tasarımında en önemli ve en kritik süreçlerden biri optik tasarımıdır. Çünkü çıplak lamba her zaman istenilen ışık dağılımını vermeyebilir. Bu yüzden ışığa yön vermek, onu daha verimli kullanmak adına verimli optik tasarımlar yapılmalıdır. LED (ışık yayan diyet) ışık kaynaklarının etkinlik faktörü değerlerinin yükselmesi ile genel aydınlatmada kullanımları da artırmıştır. Ancak LED'lerin geleneksel lambalardan farklı oluşu tasarım süreçlerinin daha farklı ele alınmasını gerektirmektedir. Bu çalışmalarda optik tasarım programlarının bilinçli bir şekilde kullanılmaları büyük kolaylık sağlayabilmektedir.

Endüstriyel tesislerde görsel konfor, görsel performans ve güvenlik kriterleri çerçevesinde aydınlatma çözümleri sunulmalıdır. Ülkemizde kabul edilen TS EN 12464-1 iş mahallerinin aydınlatılması standartında belirtilen aydınlatma kriterlerine uygun aydınlatma çözümleri yapılması gerekmektedir. Bu çalışmada da bu standart esas kabul edilmiş ve hesaplamalar buna göre yapılmıştır.

Çalışma kapsamında endüstriyel tesislerde aydınlatma tasarım kriterleri açıklanmış ve LED ışık kaynakları ile geleneksel lambalardan endüstriyel tesislerde özellikle yüksek tavanlı üretim hollerinde kullanılmaları en uygun lamba tipleri olan metal halojen ve flüoresan lambalar incelenmiştir. LED ışık kaynaklı armatür tasarım süreçleri ve optik ışık kontrolünün temel prensipleri verilip, optik ışık kontrolünde kullanılan malzemeler de incelenerek optik tasarım anlatılmıştır. Daha sonra, enerji verimli çözümler üretebilmek için LED ışık kaynaklı armatürler tasarlanmıştır. Endüstriyel üretim holünü temsil edebilecek taban alanı sabit, yükseklikleri 6, 8, 10 ve 12 m olarak değişen bir hacimde 200, 300 ve 500 lx ortalama aydınlık düzeyleri için ortalama düzgünlüğü sağlanacak şekilde, tez kapsamında tasarlanan armatürler kullanılarak aydınlatma tasarım hesapları yapılmıştır. Bu hesaplar 150W ve 250W metal halojen lambalı, 2x58W ve 4x58W flüoresan lambalı yüksek tavan armatürleri

kullanılarak gerçekleştirilen aydınlatma tasarım sonuçları ile karşılaştırılmış ve enerji verimli armatürler belirlenmiştir. LED ışık kaynaklı armatür tasarımları yapılırken ısıl ve elektriksel verimler günümüz koşullarında ulaşılabilen değerlerde kabul edilmiş, armatürlerin sadece optik tasarımları detaylı bir şekilde gerçekleştirilmiştir.

Çalışma sonucunda elde edilen verilere göre, iyi tasarlanmış LED ışık kaynaklı armatürlerle gerçekleştirilen tesisatlarda, baz alınan 150W ve 250W metal halojen lambalı armatürlere göre %26,6 ile %32,9 arasında, 2x58W ve 4x58W flüoresan lambalı armatürlere göre ise %9,1 ile %23,9 arasında enerji tasarrufu sağlanabildiği belirlenmiştir.

LED BASED ENERGY EFFICIENT INDUSTRIAL LUMINAIRE OPTICAL DESIGN

SUMMARY

Energy demand of human kind is increasing day by day with developing technology. Energy efficient systems must be preferred in order to leave a viable environment to the future generations by regarding limited sources of the earth and sustainability concept. In this manner, when the lighting systems, which have important amount within electrical energy consumption, are considered, the usage of energy efficient luminaires is quite crucial.

In Turkey, the approximately half of electrical energy are consumed by industry. Hence, the usage of energy efficient luminaires in industry provide energy saving and make a major contribution to gross national product. In addition to this, it is essential that the energy efficient luminaires must have long life, low maintenance and operating costs and provide the necessary specifications in terms of visual, safety and lighting criteria for industrial lighting.

Optical design is one of the most important and critical processes in luminaire design. This is because; the bare lamp might not provide the desired light distribution all the time. Therefore, efficient optical design must be made to direct the light and to use it more efficiently. Admittedly, the increase in the efficacies of LED (light emitting diode) light sources lead an increase of usage of LEDs in general lighting applications. However, since LEDs are different from the conventional light sources, the design procces must be investigated seperately. Hence, making use of optical design softwares consciously shall provide substantial convenience when making designs.

Lighting solutions are provided at the industrial facilities with the concerns of visual comfort, visual performance and security criteria. These solutions must be carried out according to the lighting of the work environments standard TS EN 12464-1, which is accepted in Turkey. In this study, these standards have been considered and the calculations have been done accordingly.

It has been aimed in this thesis that how much energy efficient the use of LED based luminaires in industrial facilities instead of the conventional luminaires based on 150W and 250W metal halogen lamps, 2x58W and 4x58W fluorescent lamps are. Since the ceiling heights can be changed for every industrial facility, it is obvious that one luminous flux and light distribution curve for luminaire can not be enough. Therefore, while LED based luminaires are designed, the equivalent luminous fluxes are selected 12000 lm and 20000 lm as a design criteria because of the based conventional luminaires' luminous flux. Besides, it has been elaborated that based conventional luminaires are the most efficient inside their group and goaled energy saving potential for the best luminaires.

In the second chapter of thesis, the lighting criteria in industrial facilities have been clarified and LED light sources, metal halogen and fluorescent lamps from conventional light sources, which are most suitable lamp types for high-ceiling industrial facilities, have been analyzed.

In the third chapter of thesis, luminaire design process of LEDs and the fundamental principles of the optic light control have been presented while the optical design and the optic materials used in the lighting control is being investigated and explained.

In the fourth chapter of thesis, in order to yield energy efficient solutions, LED based luminaires have been designed. Luminaire calculations have been done in an environment, which represents industrial production hall, has 16 m width, 40 m length for base area and changing heights of 6, 8, 10 and 12 m where the illuminances are 200, 300 and 500 lx. For this environment, it has been taken that working plane is 1 m, maintenance factor is 0,8 and it was considered that all luminaires are surface mounted for all calculations. While LED based luminaire's designs are made, the thermal and electrical efficiencies were accepted in a considerable range and thus, luminaire has been designed and analyzed only optically. These calculations are compared with results for IP65 class high-bay luminaires, which have 150W and 250W metal halogen lamps, 2x58W and 4x58W fluorescent lamps, and energy efficient luminaires are determined.

In fifth and last chapter of thesis, results and suggests for the future studies have been given according to the obtained data.

According to the this data, the use of well-designed LED based luminaires instead of based conventional high-bay luminaires, provide energy saving and represent energy efficient lighting installations in the same industrial production hall for 200 and 300 lx illuminance; with the use of wide beam in 6 and 8 m height, with the use of medium beam in 10 and 12 m height; for 500 lx illuminance; with the use of wide beam in 6 m height, with the use of medium beam in 8 and 10 m height, with the use of narrow beam in 12 m height. Therefore, more efficient lighting systems can be obtained by luminaires that have narrow beam when the ceiling heights are increased. In addition to this, while it is suggested using of luminaires that have a lower luminous flux (e.g. 12000 lm) in low ceiling heights (e.g. 6 and 8 m), it is suggested using of luminaires that have a higher luminous flux (e.g. 20000 lm) in high ceiling heights (e.g. 10, 12 m and above) because of low luminaire quantities and initial investment cost of installation of lighting fixture.

Selecting the length of luminaires' suspension fittings of various heights to provide the same results of the calculations will be possible for a higher ceiling heights. Also, the ceiling, wall and floor reflection coefficients in the place that will be illuminated affect uniformity and glare. Hence, the use of light-colors for ceiling, wall and floor and keeping them clean in an industrial environment will be extremely useful.

Due to the properties of SPEOS optical design program used in this study, the glare ratios of luminaire excluded. Since the solving of glare problem is crucial in small-sized and intensive light flux LED based lighting solutions, it will be useful for the future studies.

Consequently, the well-designed luminaires with LEDs result between %26,6 and %32,9 energy saving than those of the conventional luminaires employed with 150W and 250W metal halogen lamps, and result between %9,1 and %23,9 energy saving

than those of the conventional luminaires employed with 2x58W and 4x58W fluorescent lamps. Thus, according to the obtained simulation results, although the using of LED based luminaires in industry is quite efficient, the initial investment cost of installation and pay back time should be considered for energy efficiency and saving potential.

1. GİRİŞ

Günümüzde enerji ihtiyacının giderek artması ve ülkemizde toplam tüketilen elektrik enerjisi içerisinde, aydınlatma payının %20 civarında olması aydınlatma mühendislerini enerji verimli armatürler üretmeye zorlamıştır. Gelişen teknoloji ile son yıllarda çok güncel bir konu haline gelen LED'lerin etkinlik faktörü değerlerinin [lm/W] giderek artması, uzun ömürlü olmaları, renksel geri verimlerinin iyi olması ve civa gibi zararlı gazlar içermemesi gibi özelliklerinden dolayı, önce dekoratif ve iç aydınlatma uygulamalarında daha sonra da dış aydınlatma uygulamalarında kullanımları giderek artmaktadır.

Endüstriyel tesislerin toplam tüketilen elektrik enerjisi içerisinde %47,6 gibi bir paya sahip olması [1], aydınlatma açısından enerji verimli uygulamalar olarak LED ışık kaynaklı armatürlerin kullanımını tetiklemiş ve tez çalışmasının hedefini oluşturmuştur.

Aydınlatma armatürü tasarımı ışık kaynağının seçimi ile başladığı için, kullanılacak ışık kaynaklarına göre armatür tasarımının da farklı ele alınması gerekmektedir. LED'lerin geleneksel ışık kaynaklarından değişik bir yapıya sahip olması, LED ışık kaynaklı armatür tasarımını çok daha farklı bir yapıya büründürmüş ve farklı tasarım kriterlerinin oluşmasına yol açmıştır.

Tezde, endüstriyel tesislerde aydınlatma kriterleri verilmiş, yüksek tavanlı endüstriyel tesislerde gerek yapıları gerekse renksel geriverim özellikleri nedeni ile sıklıkla kullanılan geleneksel lambalardan metal halojen ve flüoresan lambalar ile LED'lerin yapıları, olumlu ve olumsuz yanları ile birlikte anlatılmıştır. Daha sonra, LED ışık kaynaklı armatür tasarım süreçlerine yer verilerek, optik tasarım için gerekli bilgiler olan optik fizik ile ilgili temel büyüklükler anlatılmış, reflektör, lens yapıları ve optik ışığı geçiren malzemeler incelenmiştir. Son olarak da, yüksek tavanlı endüstriyel tesislerde kullanılan 150W ve 250W metal halojen lambalı armatürler ile 2x58W ve 4x58W flüoresan lambalı armatürlerin yerini alabilecek LED'li armatürler hedeflenerek armatür tasarımları gerçekleştirilmiştir. Endüstriyel

tesislerin farklı yükseklik ve koşullara sahip olduğu düşünöldüğünde, tek bir ışık akısına ve dağılımına sahip bir armatürün farklı yüksekliklerde benzer sonuçlar vermeyeceği beklenir. Bu yüzden, 150W metal halojen lambalı armatürün ve 2x58W flüoresan lambalı armatürün eşdeğeri olarak 12000 lümen ışık akısı, 250W metal halojen lambalı armatürün ve 4x58W flüoresan lambalı armatürün eşdeğeri olabilmesi için de 20000 lümen ışık akısı hedeflenmiş ve LED armatürler farklı ışık dağılımına sahip lensler ile (dar, orta, geniş) farklı optik özellikli olarak tasarlanmıştır. Armatürler tasarlanırken ısı ve elektriksel verimleri günümüz koşullarında ulaşılabilen değerler çerçevesinde sabit alınarak armatürlerin optik tasarımları yapılmıştır. Enerji verimli çözümler sunan LED armatür tasarımları, endüstriyel tesislerde üretim hollerini temsil edecek şekilde belirlenen, çalışma düzlemi 1 m olan ve tavan yüksekliği 6, 8, 10 ve 12 m olarak değişen bir hacim için, verimleri piyasa koşullarında yüksek, IP65 koruma sınıfına sahip, 150W ve 250W, dar, orta ve geniş açılı ışık dağılımına sahip metal halojen lambalı, 2x58W ve 4x58W flüoresan lambalı armatürler baz alınarak karşılaştırılmış ve enerji verimli çözümler belirlenmiştir.

2. ENDÜSTRİYEL TESİSLERDE AYDINLATMA TEKNİĞİ

Endüstriyel aydınlatma, küçük bir atölyeden büyük bir fabrika holüne birçok farklı çalışma alanlarının ve bölgelerinin aydınlatılmasını kapsar. Endüstriyel tesislerde çalışma alanının tasarımı ya da tesisde bulunan farklı proses ve cihazlar nedeni ile genel aydınlatmanın yanı sıra lokal ve özel aydınlatılmalar da gerekebilir. Söz konusu endüstriyel tesislerde iş güvenliği ve verimlilik açısından kesinlikle ilgili standartlarda verilen minimum aydınlatma kriterleri sağlanmalıdır.

Endüstriyel tesislerde aydınlatma açısından göz önüne alınması gereken dört fiziksel büyüklük vardır. Bunlar; çalışma hacminde sağlanması gereken minimum aydınlık düzeyi, kamaşma sınırlandırma değeri, renksel geri verim endeksi ve düzgünlüktür. Olması gereken minimum aydınlık düzeyi değeri (E_m), maksimum kamaşma sınırlandırması (UGR) ve minimum renksel geri verim endeksi (CRI) - (Birimi: R_a) değerleri TS EN 12464-1 standartında örnek hacimler için tanımlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında, “TS EN 12464 Işık ve Işıklandırma – İş Mahallerinin Aydınlatılması – Bölüm 1: Kapalı Alandaki İş Mahalleri” standardı esas kabul edilmiştir. Bu standartta tanımlanan endüstriyel faaliyetler ve el sanatları; tarım, fırınlar, çimento, çimento ürünleri, beton, tuğla, seramik, fayans, cam, kimya, plastik ve kauçuk endüstrisi, gıda maddeleri ve lüks gıda endüstrisi, elektrik endüstrisi, dökümhaneler ve metal döküm, kuaförler, kuyumculuk imalat, çamaşırhaneler ve kuru temizleme, deri ve deri ürünleri, metal işleme, kağıt ve kağıt ürünleri, güç istasyonları, matbaalar, haddehaneler, demir ve çelik işleri, tekstil üretim ve işleme, araç üretimi, ahşap işleme alanlarıdır. Standartta endüstride karşılaşılan bu çalışma alanları için sağlanması gereken aydınlatma tasarım kriterleri verilmiştir.

2.1 Aydınlatma Tasarım Kriterleri

Endüstri tesislerinde amaç, iş verimini artırmak, iş kazalarını önlemek için görme koşullarını iyileştiren düzeyde düzgün ve kamaşmasız bir aydınlatma yaratılmasıdır. Bu da amaca uygun ışık kaynağı, armatürlerin doğru seçimi ve yerleştirilmeleri ile mümkün olmaktadır.

2.1.1 Aydınlatılmış Çevre

İyi bir aydınlatma uygulaması için, gerekli aydınlık düzeyinin yanında, nitelik ve nicelik açısından da ihtiyaçların sağlanması temel esastır.

Aydınlatma ihtiyaçları üç temel başlık altına toplanabilir:

- Görsel Konfor: çalışanların kendini iyi hissedebileceği bir ortamın yaratılması, dolaylı olarak yüksek üretim seviyesine katkı sağlar.
- Görsel Performans: çalışanların görsel görevlerini, farklı koşullar ve daha uzun süreler boyunca uygulayabilmeleri için gerekli koşullara sahip ortamın yaratılması.
- Güvenlik.

Aydınlatılmış bir çevreyi nitelik ve nicelik açısından etkileyebilecek en önemli parametreler;

- Parıltı dağılımı,
- Aydınlık düzeyi,
- Kamaşma,
- Işığın yönlülüğü,
- Renksel geriverim ve ışığın renksel görünümü,
- Fliker (Işıktaki titreşimler),
- Gün ışığı'dır.

2.1.2 Parıltı Dağılımı

Bakış alanındaki parıltı dağılımı, iş görünebilirliğini etkileyen gözün adaptasyon seviyesini kontrol eder.

İyi dengelenmiş bir adaptasyon parıltısına aşağıdaki üç fonksiyon için ihtiyaç duyulmaktadır.

- Görsel duyarlılık (Görmenin keskinliği),
- Kontrast hassaslığı (Küçük göreceli parıltı farklılıklarının ayrımı),
- Göze ait fonksiyonların verimliliği (Göz merceği uyumu, yakınsaklık, göz bebeğinin daralıp genişlemesi, göz hareketleri gibi).

Bakılan alandaki parıltı dağılımı aynı zamanda görsel konforu da etkiler. Bu yüzden,

- Kamaşmayı artıracak çok yüksek parıltılardan,
- Gözün adaptasyon sürekliliği nedeni ile yorulmaya neden olabilecek çok yüksek parıltı kontrastlarından,
- Sönük ve uyarıcı olmayan çalışma alanlarına neden olabilecek çok düşük parıltılardan ve çok düşük parıltı kontrastlarından kaçınılmalıdır.

Hacimdeki tüm yüzeylerin parıltıları önemlidir. Yüzey parıltıları, aydınlık düzeyleri ve yansıtma faktörleri ile belirlenir. Çalışma hacimlerindeki yüzeyler için önerilen yansıtma faktörü değer aralıkları aşağıda verilmektedir [2].

- Tavanlar için: 0,6 ile 0,9 arasında,
- Duvarlar için: 0,3 ile 0,8 arasında,
- Çalışma düzlemleri için: 0,2 ile 0,6 arasında,
- Zemin için: 0,1 ile 0,5 arasındadır.

2.1.3 Aydınlık Düzeyi

İş yapılan çalışma düzlemi ve onu çevreleyen yüzeylerin aydınlık düzeyleri çalışanların görsel konfor ve performansını önemli ölçüde etkiler.

Endüstriyel tesislerde, görsel konfor ve performansın sağlanması için gereken minimum aydınlık düzeyi değerleri TS EN 12464-1 standartında kapalı alanlar için verilmiştir. Bu değerler için örnek olarak endüstriyel tesisler içerisindeki otomotiv sektörü için aydınlatma kriterleri Çizelge 2.1’de gösterilmektedir.

Kullanıcının yaşı ve tesisat koşullarına bakılmaksızın çalışma alanlarında standartta verilen ortalama aydınlık düzeyi değerleri sağlanmalıdır. Bu standatta önerilen değerler ortalama 30 yaşındaki bir kullanıcı esas alınarak belirlendiği için, kullanıcıların yaşı yüksek olduğunda aydınlık düzeyi değerinin yükseltilmesi görsel performansı olumlu yönde etkileyecektir. Standartta verilen değerler normal görme koşulları için geçerlidir ve aşağıdaki faktörler dikkate alınarak hesaplanmıştır.

- Görsel konfor ve iyi hissetme gibi psikolojik özellikler,
- Yapılacak iş için gereksinimler,
- Görsel ergonomi,
- Pratiksel deneyim,
- Güvenlik ve ekonomi.

Eğer görsel koşullar normal varsayımlardan farklı ise aydınlık düzeyi değeri (20 - 30 - 50 - 75 - 100 - 150 - 200 - 300 - 500 - 750 - 1000 - 1500 - 2000 - 3000 – 5000 lx) ölçeğinden biri olacak şekilde ayarlanabilir [2].

Sağlanması gereken aydınlık düzeyi değerleri aşağıdaki koşullar olduğunda arttırılmalıdır.

- Görsel iş kritik,
- Hataların düzeltilmesinin maliyeti yüksek,
- Kesin ve yüksek performans çok önemli,
- Çalışanların görsel kapasitesi normalin altında,
- Çalışma detayları normalden çok küçük veya düşük kontrastlı,
- Çalışma normalden uzun bir zaman için dikkate alındığında.

Aydınlık düzeyi değerleri aşağıdaki durumlar gerçekleştiğinde azaltılabilir.

- Çalışma detayları normalden çok büyük veya yüksek kontrastlı,
- Çalışma normalden kısa bir zaman için dikkate alındığında.

Çizelge 2.1 : Endüstriyel tesislerde otomotiv sektörü için TS EN 12464-1’e göre sağlanması gereken değerler.

İç Alan, Görev ya da Etkinlik Türü	E_m [lx]	UGR _L	Ra
Montaj	500	22	80
Boya, Cila, Püskürtme Odaları	750	22	80
Boyama: dokunma, denetim	1000	19	90
İç döşeme üretimi (insanlı)	1000	19	80
Son denetim	1000	19	80

2.1.4 Düzgünlük

Minimum aydınlık düzeyinin (E_{min}), ortalama aydınlık düzeyine (E_{ort}) oranı olarak hesaplanan düzgünlük değerleri, çalışma düzlemi ve çevre yüzeyler için Çizelge 2.2’de gösterilmiştir [2].

Çizelge 2.2 : Çalışma alanı ve çalışma alanını çevreleyen yüzeylerdeki ortalama aydınlık düzeylerine göre olması gereken düzgünlük değerleri.

Çalışma Alanı Aydınlik Düzeyi [lx]	Çalışma Alanlarını Çevreleyen Yüzeylerin Ortalama Aydınlik Düzeyi [lx]
≥ 750	500
500	300
300	200
≤ 200	E_{hedef}
Düzgünlük $\geq 0,7$	Düzgünlük $\geq 0,5$

2.1.5 Kamaşma

Kamaşma, bakış alanı içerisindeki parlak alanlar tarafından üretilen bir duydur ve psikolojik kamaşma ya da fizyolojik kamaşma olarak nitelendirilidir. Aynasal yüzeylerdeki yansımalar ile meydana gelen kamaşma ise genellikle örtü yansımaları veya yansımış kamaşma olarak bilinir [2].

Hatalardan, yorulmalardan ve kazalardan kaçınmak için kamaşmanın sınırlandırılması çok önemlidir.

İç çalışma alanlarında, psikolojik kamaşma parlak armatürlerden veya pencerelerden kaynaklanır. Psikolojik kamaşma sınırlandırıldığında, fizyolojik kamaşma açısından önemli bir sorunla karşılaşılmaz.

2.1.5.1 Psikolojik Kamaşma

Doğrudan iç aydınlatma tesisatlarındaki armatürlerin neden olduğu psikolojik kamaşma oranı, CIE tarafından belirlenen UGR (Unified Glare Rating) yöntemine göre formül 2.1 kullanılarak belirlenebilmektedir [2].

$$UGR = 8 \log_{10} \left(\frac{0.25}{L_b} \sum \frac{L^2 \omega}{p^2} \right) \quad (2.1)$$

Burada,

- L_b Fon parıltısı [cd/m^2], E_{ind}/π formülü ile hesaplanır. E_{ind} , gözlemcisinin gözündeki düşey endirek aydınlık düzeyidir.
- L Gözlemci bakış doğrultusundaki her bir armatürün ışık yayan yüzeylerinin parıltısı [cd/m^2],
- Ω Gözlemci gözü ile her bir armatürün ışık yayan yüzeylerinin katı açısı [str],

- p Her armatürün bakış doğrultusundan uzaklığı ile bağlantılı Guth pozisyon endeksi.

UGR değerlerinin standartta verilen değerleri aşmaması gerekir.

Oda içerisindeki UGR değişiklikleri yukarıdaki formül kullanılarak farklı gözlemci konumları için belirlenebilir. Ancak bu koşullar için olması gereken sınırlamalar hala araştırma aşamasındadır.

Pencerelerden kaynaklanan psikolojik kamaşma hala üzerinde çalışılan bir konu olup, herhangi bir kamaşma oranı metodu mevcut değildir.

2.1.5.2 Kamaşmaya Karşı Ekranlama

Parlak ışık kaynakları kamaşmaya neden olur ve cisimlerin görünürlüğünü azaltır. Bu durumdan kaçınmak için örnek olarak lambalar uygun bir şekilde ekranlanır veya pencereler, panjurlar ile ışığa karşı korunur. Belirlenmiş lamba parlıtları için minimum ekranlama açıları Çizelge 2.3’de verilmektedir [2].

Çizelge 2.3 : Belirlenmiş lamba parlıtları için minimum ekranlama açıları.

Lamba Parlıtları [cd/m ²]	Minimum Ekranlama Açısı
20 < L < 50	15 °
50 < L < 500	20 °
≥ 500	30 °

2.1.5.3 Örtü Yansımaları ve Yansımış Kamaşma

Görsel faaliyetlerde yüksek aydınlık yansımalar, görülebilirliği genellikle zararlı bir şekilde değiştirebilir. Örtü yansımaları ve yansımış kamaşma aşağıdaki önlemler ile azaltılabilir ya da engellenebilir.

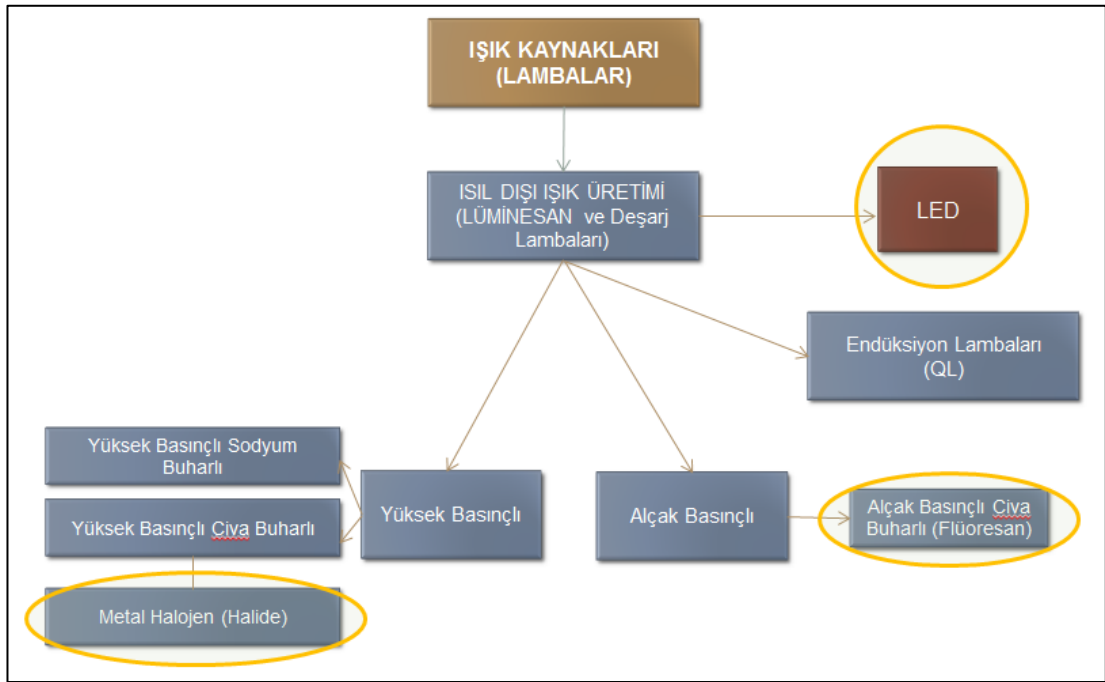
- Armatürlerin ve çalışma yerlerinin düzenlenmesi,
- Yüzey yapısı (mat yüzeyler),
- Armatürlerin ışık yayan (aydınlık) alanlarının artırılması,
- Parlak tavan ve parlak duvarların kullanılması.

2.2 Endüstri Tesislerinde Kullanılan Işık Kaynakları

Endüstriyel tesislerin üretim holleri ve iç hacimlerinde genellikle flüoresan lambalar, rengi düzenlenmiş yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar, yüksek basınçlı civa buharlı lambalar, endüksiyon lambaları ve metal halojen lambalar kullanılmaktadır. Buna ek olarak son yıllarda LED ışık kaynaklı armatürler de kullanılmaya başlanmıştır.

Bu çalışma kapsamında LED ışık kaynakları kullanılarak yapılan tasarımların endüstriyel tesislerde çok sıklıkla kullanılan metal halojen lambalar ve flüoresan lambalar ile karşılaştırılması amaçlandığı için, LED'ler, metal halojen lambalar ve flüoresan lambalar bölüm 2.2.1, 2.2.2 ve 2.2.3'de ayrıntılı olarak anlatılmıştır.

Endüstriyel tesislerde kullanılan ışık kaynakları ve çalışma kapsamında detaylı olarak anlatılan ışık kaynakları Şekil 2.1'de verilmektedir.



Şekil 2.1 : Endüstri tesislerinde kullanılan ışık kaynakları.

Üretim hollerinin genel aydınlatmaları için çizgisel ve noktasal olmak üzere iki temel tip çözüm önerilmektedir. Çizgisel çözüm için önerilen armatürler genellikle tüp flüoresan lambalı armatürlerdir. Noktasal çözümler ise, daha çok yüksek tavanlı hacimlerde içlerinde yüksek güçlü noktasal ışık kaynakları bulunan sanayi tipi armatürlerle gerçekleştirilmektedir. Ancak son yıllarda tüp flüoresan lamba ve armatür reflektör tekniğinde gerçekleşen teknolojik ilerlemeler ile bu tip ışık

kaynakları ile de yüksek tavanlarda çözümler yaratılabilmektedir. Bir endüstri tesisinde hangi tip armatürün kullanılacağını belirleyen en önemli faktör tavan yüksekliğidir. Tesisat tipine karar verilirken “tavan yüksekliği” önemli bir parametredir. Tavan yüksekliği 6 metreden düşük olan tesislerde çizgisel, 12 metreden yüksek olanlarda noktasal ışık kaynaklı çözümlerin uygulanması önerilmektedir. Tavan yüksekliği 6 metre ila 12 metre arasında olduğunda ise, hem çizgisel, hem de noktasal ışık kaynaklı tesisatlar kullanılabilmektedir. Seçimin endüstri tipine, ortam ve bakım koşullarına bağlı olarak gerekli lamba karakteristik değerlerine göre yapılması gerektiği söylenen bu tavan yüksekliklerinde, doğru tesisatlara karar verebilmek için yol gösterici uygulamalara ihtiyaç vardır [6].

Endüstri tesislerinde kullanılacak ışık kaynaklarının etkinlik faktörleri yüksek ve ömürleri uzun olmalıdır. Kirlenmenin de fazla olduğu geniş hacimli üretim hollerinde tavan ve duvarlardan yansıyan ışığın katkısı yok denecek kadar az olduğu için armatürler direkt ışık dağılımlı olmalıdır. Armatürler ayrıca, ortamda olası toz, kir, nem ve patlayıcı gazlara karşı korunmalı, elle dokunulabilecek mesafelerde olanlar ise tamamen izole olmalıdır [6].

Çizgisel çözümler tüp şeklindeki flüoresan lambalarla veya LED’lerin çizgisel şekilde yerleştirilmesi ile gerçekleştirilmektedir. Noktasal çözümler ise deşarj lambalarının şekilleri gereği yuvarlak yapıda olup, LED’ler ile de yuvarlak bir PCB üzerine dizilim ile aynı şekilde çözümler sağlanabilir. Işığı çalışma düzlemlerine yönlendiren reflektör düzenekleri veya lensler de aydınlatmanın verimini önemli ölçüde artırmaktadır.

Geleneksel aydınlatma çözümleri açısından bakıldığında, günümüzde yüksek tavanlı endüstriyel tesislerin genel üretim holü aydınlatmalarında metal halojen lambalar sıklıkla kullanılmaktadır. Canlı ve ferah çalışma ortamlarının yaratılması istendiğinde renk özellikleri çok iyi olan seramik deşarj tüplü metal halojen lambalar da iyi bir seçenek olmaktadır. Renksel geri verim özelliğinin çok önemli olmadığı uygulamalarda ise ömürleri daha uzun, yanma konumları sorunsuz olan rengi düzenlenmiş yüksek basınçlı sodyum buharlı lambalar enerji verimliliği açısından göz ardı edilmemesi gereken ışık kaynaklarıdır. Ayrıca sanayi tipi armatürlerin içinde yüksek güçlü kompakt flüoresan lambalar ile yine yüksek güçlü tüp flüoresan lambaların dörtlü olarak kullanıldığı endüstriyel armatürler de yüksek tavanlı üretim holleri için uygun çözümler olabilmektedir. Diğer yandan, özellikle bakım

alışmalarının zorlaştığı çok yüksek tavanlı hacimlerde veya düşük tavanlı hacimlerde de uzun ömürlü, renksel geri verimleri yüksek, ışık akıları kolaylıkla ayarlanabilen LED ışık kaynaklarının kullanımı enerji verimli çözümler sunabilmektedir [6].

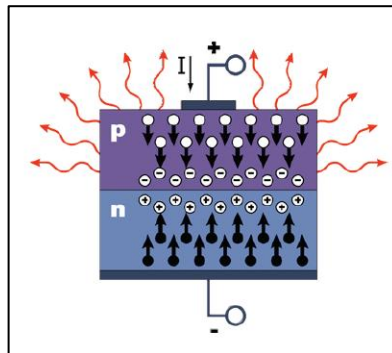
2.2.1 LED'ler (Işık Yayan Diyotlar)

Katı hal aydınlatması denilince genellikle ışık yayan diyotlar, organik ışık yayan diyotlar ve ışık yayan polimerler anlaşılmaktadır. Diğer yandan hala katı hal için resmi bir tanım yoktur ve katı-hal, yarı iletken kristal olarak da adlandırılmaktadır.

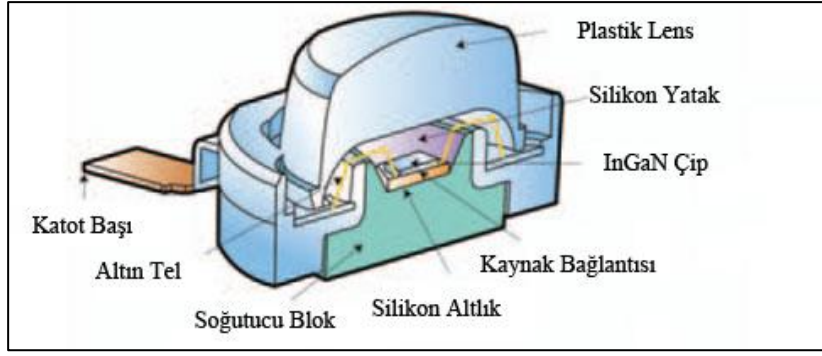
Bu bölümde katı hal aydınlatmasından ışık yayan diyotlar (LED'ler) incelenmiştir.

2.2.1.1 LED'lerin alışma Prensibi

Elektronların tek yönlü hareketine izin veren LED'ler, üzerinden elektrik akımı geçirildiğinde ışık yayan elektronik elemanlardır. Normal diyotlar gibi LED'ler de, bir p-n jonksiyonu oluşturmak için, yabancı maddeler katılarak saflığı bozulmuş yarı iletken malzemelerden üretilirler. P-tipi bir silikon malzeme ile N tipi bir silikon malzeme yanyana getirilerek LED yapısı oluşturulur. P-tipi yarı iletken enerji kaynağının pozitif tarafına, N-tipi yarı iletken de negatif tarafına bağlandığında pozitif taraftan (anot), negatif tarafa (katot) elektrik akımı geçer. Elektronlar ise negatif taraftan pozitif tarafa geçerken bir boşluk ile çiftleşirler ve foton yayarlar, bu sürece elektro-lüminesan denir. LED'ler bu şekilde ışık yayarlar. Bu süreç şekil 2.2'de gösterilmiştir. Eğer, yarı iletkenin pozitif tarafı kaynağın negatif tarafına, negatif tarafı da pozitif tarafına bağlanırsa herhangi bir elektron ve akım geçişi olmayacağından, ışık yayınımı da söz konusu olmaz. LED'lerin yapısı, tipik bir LED modülü için şekil 2.3'de gösterilmiştir.

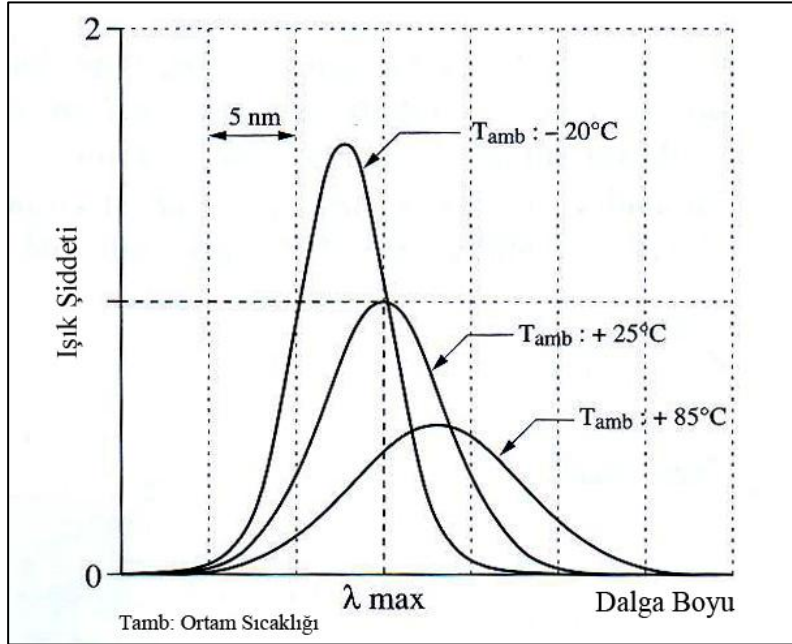


şekil 2.2 : Elektronların boşluklarla birleşerek foton yayması.



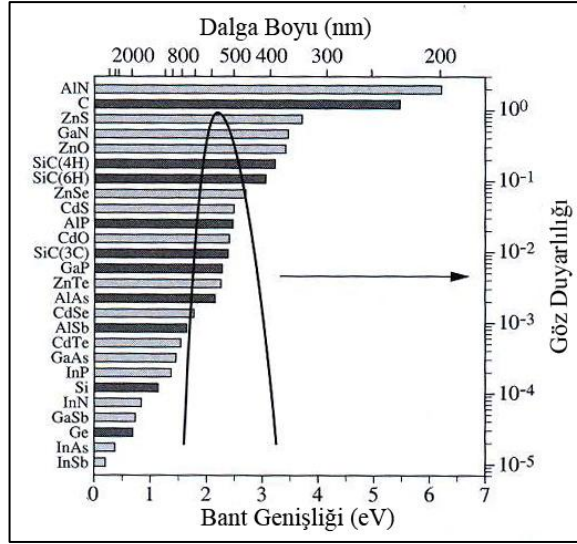
Şekil 2.3 : Tipik bir LED modülü.

Genel olarak tek renk ışık yayan (monokromatik) LED'lerin verimi de yaydıkları ışığın dalga boyu ile ilgilidir. İlk ticari LED, sadece kırmızı ışık üretmiş olmasına karşın günümüzde LED'ler artık görülebilir spektrumdaki tüm dalgaboylarını üretebilmektedir. LED'lerin rengi, jonksiyon sıcaklığıyla ilişkilidir. Eğer sıcaklık artarsa, dalgaboyu sprektumu değişmekte, ışık akıları ve etkinlik faktörleri düşmektedir. Bu konuda yapılan çalışmalar, sıcaklık arttıkça renk spektrumunun daha uzun dalga boyu (kızılötesi) yönünde değiştiğini göstermektedir (Şekil 2.4).



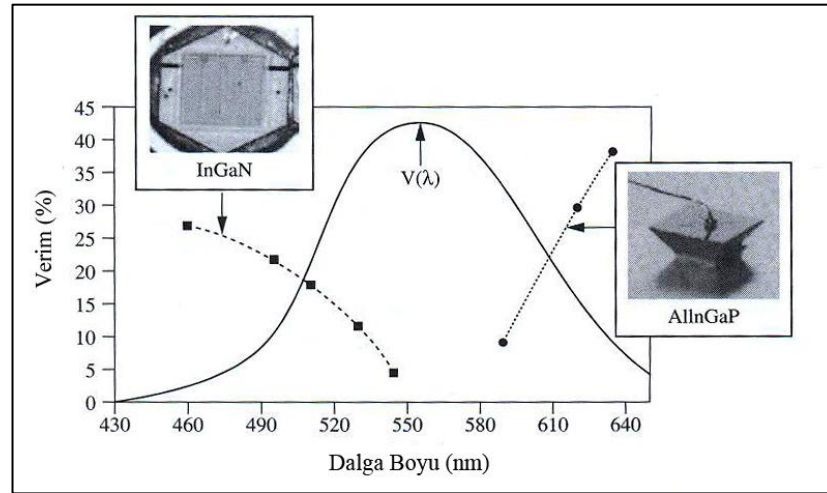
Şekil 2.4 : LED'in ürettiği ışığın şiddetinin ve dalga boyunun ortam sıcaklığı ile değişimi [4].

Bilinen bazı malzemelerin yarı iletken bant genişliği ve yaydığı ışığın dalga boyu Şekil 2.5'de gösterilmektedir. Bant genişliği arttıkça yarı iletkenin kapsadığı elektromanyetik spektrum da genişlemektedir.



Şekil 2.5 : Bazı bilinen yarı iletkenler için bant genişliği, dalga boyu ve göz spektral duyarlılık eğrisi $V(\lambda)$ [4].

Farklı malzemeler için verim, yaydıkları spektruma göre değişmektedir. Bu durum Şekil 2.6'da gösterilmiştir [4]. Gözün maksimum spektral duyarlılığında (555 nm) günümüzde en çok kullanılan alüminyum indiyum galyum fosfat (AlInGaP) ve indiyum galyum nitrat (InGaN)'ın verimlerinin düştüğü gözlemlenmektedir.



Şekil 2.6 : InGaN ve AlInGaP LED'lerin, 350 mA ve 25 °C çalışma koşullarında dalga boyuna göre verimlerinin değişimi.

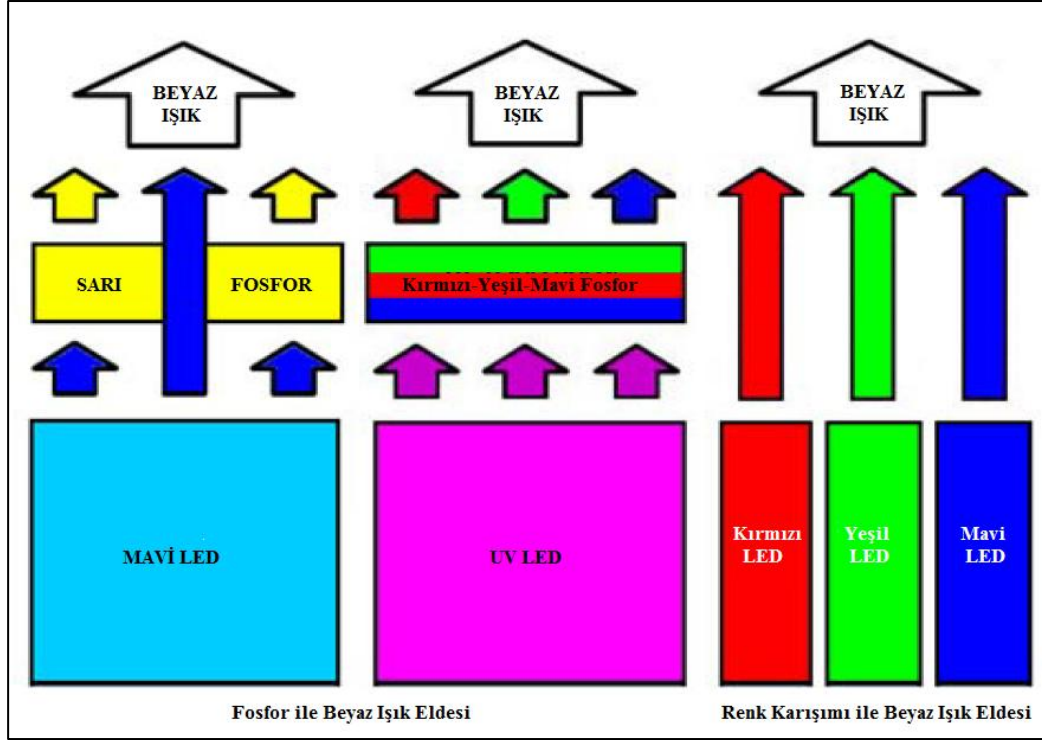
2.2.1.2 LED'lerde Beyaz Işığın Eldesi

LED'ler ile beyaz ışık elde etmek için günümüzde üç ana yöntem kullanılmaktadır.

1. Görünür bölgenin (380-780 nm.), kısa dalga boyu bölümünde ışık yayan bir diyodu fosfor ile kaplayarak daha uzun dalga boylarında ışık elde etmek,

2. UV bölgede ışık yayan bir diyodun radyasyonlarını fosfor ile kaplayarak görünür bölgede ışık vermesini sağlamak,
3. Kırmızı, Yeşil ve Mavi diyet birarada kullanılarak beyaz ışık elde etmek.

Bu üç ana yöntem Şekil 2.7’de gösterilmiştir [5].



Şekil 2.7 : Beyaz ışık elde etme yöntemleri.

Birinci yöntem, kısa dalga boyunda radyasyon yayan bir diyodun, daha uzun dalga boyunda radyasyon yayan bir fosfor tabakasından geçirilerek kısa dalga boylu radyasyonunun absorblanması ve daha uzun dalga boyunda yayılmasının sağlanması olarak tanımlanabilir. Birçok firma, bu yöntemle yüksek güçlü LED'ler üretebilmektedir. Örnek olarak In ve GaN yarı iletkenlerinin bir araya gelmesiyle oluşturulmuş mavi bir diyet, YAG-Ce (İtiryum Aliminyum Garnet-Seryum) fosfor kaplanıp 5500 Kelvin sıcaklığında beyaz ışık elde edilebilmektedir. Sarı fosfor üzerine ek olarak kırmızı fosfor da kaplanarak 3200 Kelvin sıcaklıklarına ulaşmak mümkündür. Fakat, ek olarak kaplanan fosfor tabakaları, etkinliği önemli ölçüde düşürmektedir. Bu yöntemin en belirgin sakıncaları aşağıda sıralanmaktadır:

- Hale efekti oluşabilir (Diodun direkt ışığına karşı, fosforun ışığının yayıcı bir karakter göstermesi).
- Sarı fosforun mavi radyasyonu soğurması zordur (verim düşer).

İkinci yöntem, flüoresan lamba çalışma prensibi ile aynıdır. Ultraviyole bölgede radyasyon yayan bir diyodun, bir veya bir kaç fosfor tabakası ile görünür radyasyon bölgesinde ışık yayması sağlanabilir. Bu yöntemin en önemli üstünlüğü, elde edilen renksel geriveriminin iyi olmasıdır.

Üçüncü yöntem kırmızı, yeşil ve mavi LED'lerin radyasyonlarının karıştırılıp beyaz renk elde edilmesidir. Bu yöntem ile renk çeşitliliği de elde edilirken en önemli sakıncası, her diyodun ayrı ayrı kontrol edilme gerekliliğidir. Bu yüzden maliyetli ve tasarlanması zor sistemlerdir. Ayrıca renksel geriverimleri diğer yöntemlere kıyasla daha azdır. Günümüzde genel aydınlatma uygulamalarında pek fazla kullanılmamakla birlikte dekoratif amaçlı kullanımı çok yaygındır.

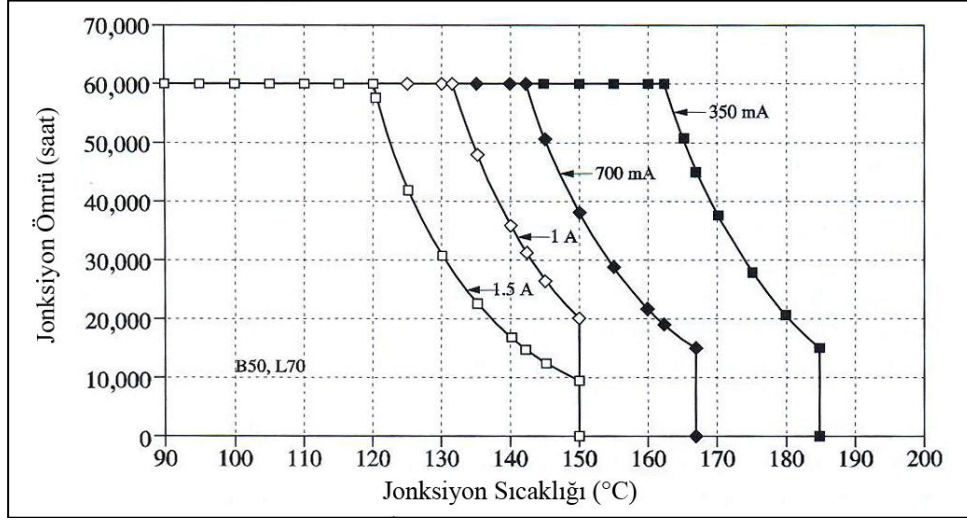
3 yöntemin toplu halde üstünlük ve sakıncaları Çizelge 2.4'de verilmektedir.

Çizelge 2.4 : LED'ler için beyaz ışık oluşturma yöntemlerinin üstünlükleri ve sakıncaları

	Üstünlükleri	Sakıncaları
Yöntem 1	• İyi etkinlik faktörü • Farklı renk sıcaklıkları • İyi renksel geriverim	• Sınırlı renk imkanı • Hale efekti
Yöntem 2	• Düzgünlük • Geniş beyaz renk sıcaklığı seçenekleri	• Düşük etkinlik faktörü • Yüksek güce ulaşamama • UV ışınlarının önlenememesi
Yöntem 3	• Dinamik renk kontrolü • Geniş renk seçeneği	• Karışık elektronik kontrol • Sıcaklıktan etkilenme • Düşük renksel geriverim

LED üreticileri genel olarak LED ömrünü 100 000 saat olarak açıklamaktadır. LED standartlarında iki ayrı ömür tanımı yapılmaktadır; L70 (ilk andaki ışık akısının %70 oranında azalınca kadar geçen süre) ve L50 (ilk andaki ışık akısının %50 oranında azalınca kadar geçen süre). Sistem ömrü (LED ışık kaynağı ile birlikte kullanılan armatür gövdesi, kontrol elemanları ve elektriksel devrelerin ömrü) veya jonksiyon ömrü konusunda standartlarda herhangi bir açıklama yoktur. LED'ler 24 saatlik ilk kullanım süresinden sonra test edilmektedir (konvansiyonel ışık kaynakları için bu süre 100 saattir). Belirli bir örneklem içindeki LED'lerin %50'sinin, nominal ışık akısının %70'ini vermesi beklenmektedir (B50, L70). LED'lerin ömürleri jonksiyon sıcaklığına ve uygulanan akıma bağlıdır. Katalog değerleri 25°C jonksiyon sıcaklığı için geçerlidir. İyi bir ısıl tasarım olmadığında, LED'lerin ömürleri önemli ölçüde

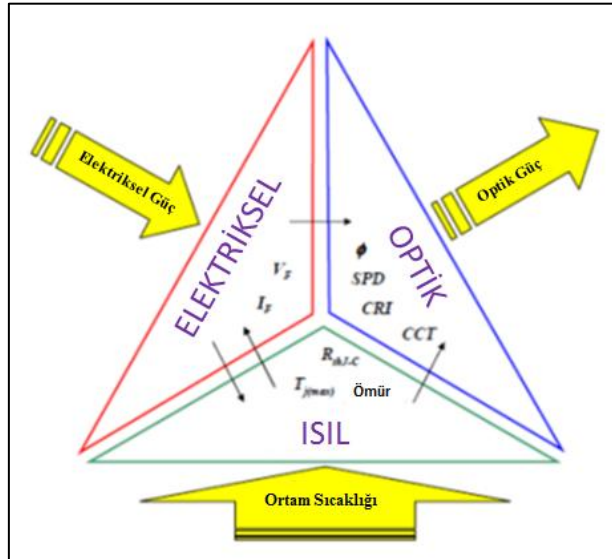
düşmektedir. Şekil 2.8’de B50, L70 ömür tanımı için örnek bir çalışma verilmektedir [4].



Şekil 2.8 : LED ömrünün jonksiyon sıcaklığıyla değişimi.

2.2.1.3 LED’lerin Karakterizasyonu

LED’ler gibi opto-elektronik aygıtlar genellikle optik, elektriksel ve ısı parametreleri ile karakterize edilir. Bu durum Şekil 2.9’da gösterilmiştir [5].



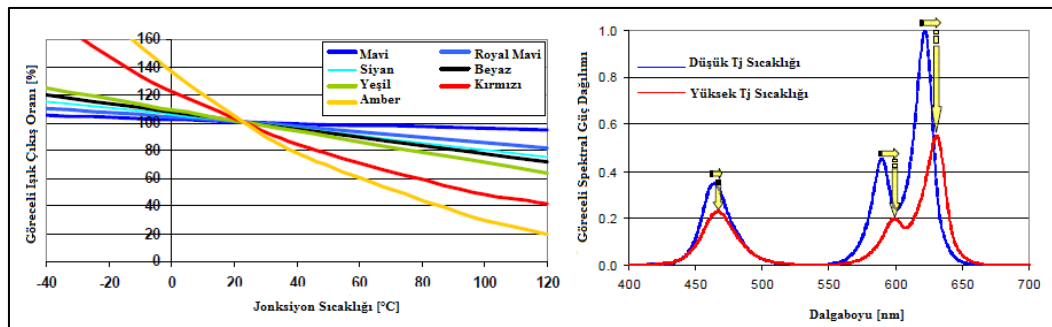
Şekil 2.9 : Bir LED’in çalışmasını karakterize eden ana parametreler ve bunların etkileşimleri.

Elektriksel olarak bir LED, sürme akımı (I_F) ve sürme gerilimi (V_F) ile karakterize edilir. LED’ler akım kontrollü aygıtlar olarak adlandırılırken, Akım-Gerilim (I-V) eğrileri yardımıyla sürme akımı, sürme geriliminin bir fonksiyonu olarak belirlenir.

LED üreticileri kataloglarında nominal ve maksimum sürme akım ve gerilim değerlerini vermektedir.

LED'leri optik açıdan karakterize etmek için bir kaç parametre kullanılır. LED'in tipine (renkli veya beyaz LED oluşuna) göre değişen ana parametreler; spektral güç dağılımı (SPD), ışık dağılımı, ışık hüzme açısı, renksel geri verim endeksi (CRI), renk sıcaklığı (CCT), tepe dalga boyu, baskın dalga boyu, ışık akısı, ışık şiddeti ve etkinlik faktörü değeridir. Bir LED'in elektriksel ve optik performansı onun ısı karakteristiği ile ilişkilidir. Yarı iletken yapıdaki düzgünsüzlüklerden dolayı oluşan verimsizlikler LED paketi yapısında ısı kayıplara neden olur. Bu ısı kayıpları azaltmak için jonksiyon sıcaklığını izin verilen maksimum sıcaklık değerinin altında tutmak gerekir. LED'lerde ısı kayıpları azaltmak için soğutucu üniteler kullanılır. Bir LED'in ısı performansının ana parametresi p-n jonksiyon ve lehimleme noktası arasındaki ısı direncidir. LED'in jonksiyon sıcaklığındaki değişim optik ve elektriksel özelliklerini etkiler.

LED'in çalışma karakterizasyonunu etkileyen diğer önemli parametreler, sürme gerilimi-sıcaklık [$\text{mV}/^{\circ}\text{C}$] katsayısı ve baskın dalga genişliği-sıcaklık [$\text{nm}/^{\circ}\text{C}$] katsayısıdır. Bu katsayılar optik, ısı ve elektriksel parametreler arasındaki bağımlılıkları gösterir. Ayrıca bu parametreler farklı LED çeşitleri arasındaki optik ve spektral farklılıkları da ifade edebilmektedir. Örneğin, AlInGaP LED'ler (kırmızı, amber ve sarı) jonksiyon sıcaklığı değişimlerine InGaN tabanlı (mavi, siyan, yeşil ve fosfor ile üretilmiş beyaz) LED'lerden daha hassastırlar. Isıl davranış farklılıkları Şekil 2.10'da gösterilmiştir [5].

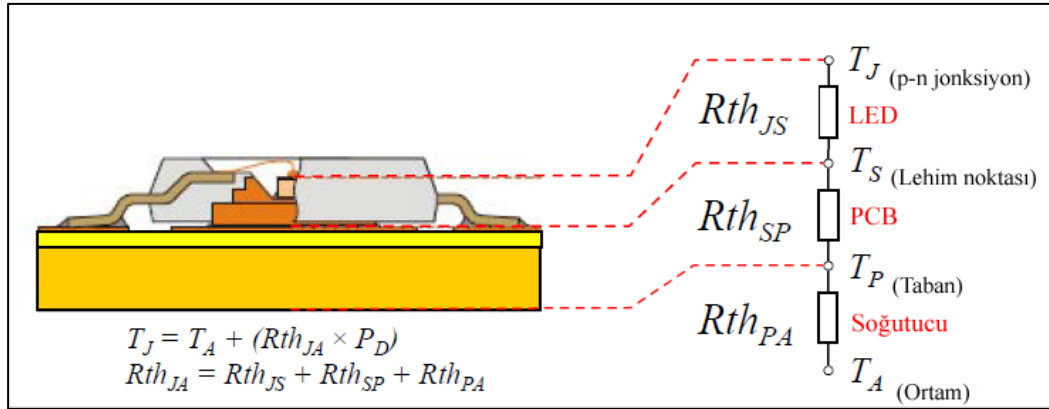


Şekil 2.10 : Jonksiyon sıcaklığının AlInGaP ve InGaN tabanlı LED'lerin spektral güç dağılımı ve ışık çıktı oranı üzerindeki etkisi.

P-n jonksiyonunun çalışma sıcaklığı bir LED'in optik ve elektriksel karakteristiklerini etkiler. Bu yüzden ısı tasarım, LED ışık motoru (LED ışık kaynakları, soğutucu, sürücü. vb. elemanları içinde barındıran yapı) tasarım

süreçlerinin başlarında hesaba katılması gereken en önemli parametrelerden biridir. LED'ler genellikle bir soğutucuya yapıştırılmış olan bir devre kartı (PCB) üzerine yerleştirilir. Basitleştirilmiş ısıl model devresi ve temel eşitlikler Şekil 2.11'de gösterilmiştir [5]. Burada;

R_{thJA}	p-n jonksiyonu ve ortam arasındaki ısıl direnç,
R_{thJS}	p-n jonksiyonu ve lehimleme noktası arasındaki ısıl direnç,
R_{thSP}	lehimleme noktası ve LED'in tabanı arasındaki ısıl direnç,
R_{thPA}	LED'in tabanı ile ortam arasındaki ısıl dirençdir.



Şekil 2.11 : PCB'nin üzerine yerleştirilmiş bir LED'in basitleştirilmiş ısıl model devresi.

Fiziğin temel kanunları dikkate alındığında, flüoresan ve enkandesan lambalarda enerjinin ışıığa dönüşüm oranları kısıtlıdır. 2800 °K sıcaklığa sahip bir siyah cisim ışıyıcı, enerjisinin büyük bir kısmını kızıl ötesi spektrum bölümünde yayar. Bu yüzden, bir enkandesan lambanın enerjisinin sadece yaklaşık %5'i görünür spektrumda yayılır. Flüoresan lambadaki civa deşarjı temel anlamda 254 nm ultraviole dalga boyunda meydana gelir. UV-radyasyon flüoresan tozları ile ışıığa çevrildiğinde, lamba enerjisinin %50'sinden fazlasını kaybeder. Flüoresan lambalarda tüketilen elektrik enerjisinin yaklaşık %25'i görünür spektrumda radyasyon enerjisine çevrilebilmektedir.

LED teknolojisi de, flüoresan lambadaki fosfor ile görünür spektrumda ışık eldesine benzer fiziğin temel kanunları ile açıklanabilmektedir. Teorik olarak LED'lerde, elektrik enerjisinden ışık enerjisine dönüşümde %100 verimlilik sağlanabilir.

Ancak genel aydınlatma için gerekli olan beyaz ışıklı LED'in etkinlik faktörü değerleri arzu edilen dalga boylarına ve renksel geri verim endeksine bağlıdır.

Zukauskas ve diğerkleri (2002) iki, üç, dört ve beş LED çipi kullanarak beyaz LED için optimal sınırları hesaplamışlardır. Buna göre;

- η_v 430 lm/W ve CRI 3 (2 LED kullanımı ile)
- η_v 366 lm/W ve CRI 85 (3 LED kullanımı ile)
- η_v 332 lm/W ve CRI 98 (4 LED kullanımı ile)
- η_v 324 lm/W ve CRI 99 (5 LED kullanımı ile)

400 lm/W civarında etkinlik faktörü değerkleri 3 LED kullanımı ile elde edilebilir, fakat bu durumda renksel geri verim endeksi (CRI) 50'nin altında kalmaktadır. Zukauskas ve diğerkleri (2008) aynı zamanda farklı renk sıcaklıklarında etkinlik faktörü değeri göreceli olarak yüksek (250 – 280 lm/W) olan fosfor kullanımı ile beyaz LED elde etme yönteminin iyi bir renksel geri verim sağladığını da göstermişlerdir. Günümüzde ileri aydınlatma sistemlerinde daha fazla akıllı özellikler istenmektedir. Bu bağlamda, LED tabanlı aydınlatma sistemleri kolay kontrol özelliklerinden ötürü önemli bir üstünlük sağlamaktadırlar. LED'lerin doğasından gelen yüksek enerji tasarruf potansiyeli ile birleşmiş akıllı çözümler çok çeşitli uygulamalarda geçerli olabilecek çözümler sunabilmektedir.

Aşağıda LED'lerin olumlu ve olumsuz özellikleri maddeler halinde sıralanmaya çalışılmıştır.

LED'lerin olumlu yanları:

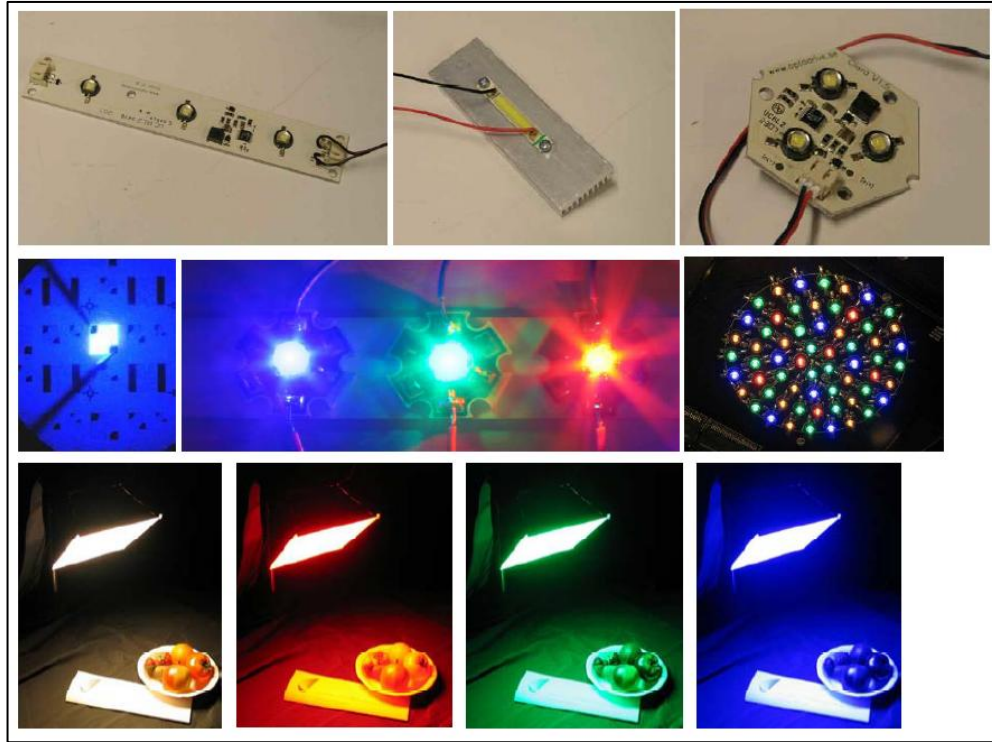
- Küçük boyutludurlar (Soğutucu büyük olabilir),
- Fiziksel olarak sağlamdırlar,
- Uzun ömürlüdürler (Uygun bir ısı tasarım ile),
- Anahtarlamının ömür üzerinde bir etkisi yoktur,
- Düşük ortam sıcaklıklarındaki çalışmaları mükemmeldir,
- Yüksek etkinlik faktörü değerklerine sahiptirler (LED'ler çok hızlı gelişmektedir ve etkinlik faktörü değerkleri de sürekli değişmektedir),
- Renk değişim olanağı sağlarlar,
- Işınımında optik ısınma yoktur,
- Civa gibi zararlı gazlar içermezler. Çevre dostudurlar.

LED'lerin olumsuz yanları:

- Yüksek fiyatlıdırlar,

- Düşük ışık akısı / paket,
- Renksel geri verimleri düşük olabilir,
- Küçük lamba boyutlarında yüksek ışık çıkışından ötürü kamaşma riski vardır,
- Isıl tasarıma ihtiyaç vardır,
- Standardizasyon eksiklikleri mevcuttur.

Şekil 2.12’de LED ve LED modüllerden örnekler verilmiştir.



Şekil 2.12 : LED ve LED modül örnekleri.

2.2.2 Metal Halojen Lambalar

Etkinlik faktörü değerini ve yüksek basınçlı civa buharlı lambaların renksel geriverimini artırmak için, deşarj tüpüne metal parçacıkları karışımının eklenmesi faydalıdır. Bu eklentiler ark deşarjında kendi çizgisel spektrumlarını yayarlar ve daha fazla ışık rengi çeşitliliği sağlarlar. Yeterli buhar basıncı için, ana metallerin yerine metal halojenlerin (iyot veya brom içeren) kullanımı daha uygun olmaktadır. Buhar deşarjın yüksek sıcaklık bölgesine eriştiğinde, moleküller çözünmeye uğrar, metal atomları uyarılır ve ışınım yayılır.

Metal halojen lambaların tipik olarak etkinlik faktörü değerleri 50 ile 100 lm/W; renk sıcaklıkları da 3000 ile 6000 K° arasındadır. Renksel geriverimleri (CRI) ise 70 ile

90 değerlerini alabilmektedir. Lambaların ekonomik ömürleri ise 6000 ile 12000 saat olarak açıklanmaktadır [5].

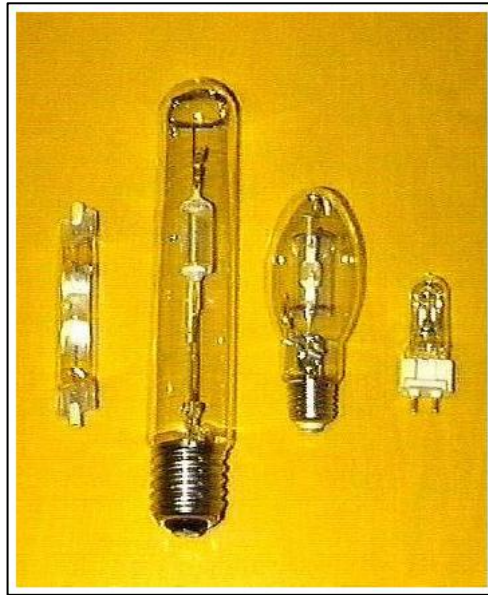
Metal halojen lambaların olumlu yanları,

- İyi etkinlik faktörü,
- İyi renksel geriverim,
- Farklı renk sıcaklıklarına sahip olmalarıdır.

Metal halojen lambaların olumsuz yanları,

- Pahalı oluşları,
- Ateşleme ve tekrar yanma zamanlarının 2 ile 5 dakika arasında oluşu,
- Gerilim değişimlerine karşı hassas oluşları,
- Yanma sırasında lambalar arasında renk sıcaklıkları farklılıkları. Bu farklılıklar seramik metal halojen lambaların kullanımı ile azaltılabilir.

Şekil 2.13’de soldan sağa nominal güçlerde, farklı boyut ve şekillerde 150W, 400W, 75W ve 70W metal halojen lambalar gösterilmiştir.



Şekil 2.13 : Metal halojen lambalar.

2.2.3 Flüoresan Lambalar

Flüoresan lambalar, ağırlıklı olarak civa içerisindeki deşarj ile üretilen ultraviyole ışınımın tarafından etkinleştirilmiş flüoresan tozları ile ışık üreten alçak basınçlı gaz deşarjlı ışık kaynaklarıdır. Lambalar genellikle iki ucunda elektrot bulunduran uzun

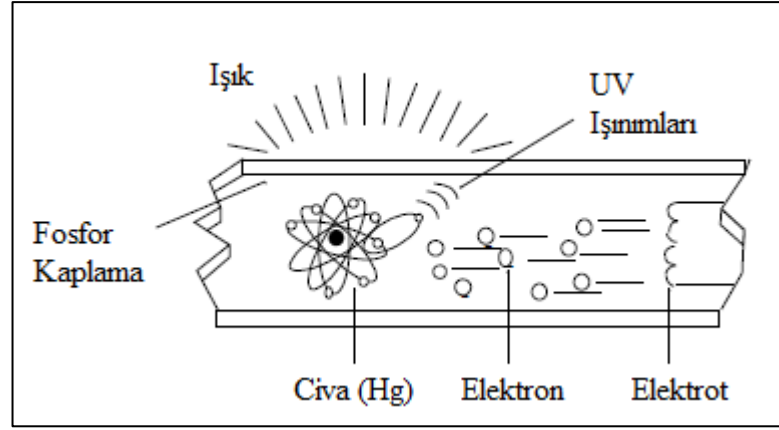
tüp şeklinde, çalışması için az miktarda asal gaz ile düşük basınçta civa buharı içeren bir yapıdadır. Emisyonun çoğunluğu (%95'i) UV bölgede meydana gelir ve ana emisyon piklerinin dalga boyları 254 nm ve 185 nm'dir. Bu yüzden, UV ışınımın tüpün içerisindeki fosfor tabakası ile ışığa çevrilir. Bir UV-foton sadece bir görünebilir foton ürettiğinden, başlangıç foton enerjisinin %65'i ısı yayılımı olarak kaybolur. Diğer bir taraftan, yayılan ışığın son spektral dağılımı farklı fosfor kombinasyonları kullanımı ile değiştirilebilir. Renk sıcaklıkları 2700 °K (sıcak-beyaz) ve 6500 °K'den (günüşiği) 17 000 °K'e kadar değişebilir. Renksel geriverim endeksleri ise 50 ile 95 arasındadır. En yeni T5 flüoresan lambanın balast kayıpları hariç etkinlik faktörü değeri 100 lm/W'a ulaşmıştır. Loşlaştırma (dimming) normal ışık akısının %1'ine kadar mümkündür. Hatta özel yüksek gerilimli puls devreleri ile normal ışık akısı değeri %0.01'e kadar loşlaştırılabilir [5]. Tipik bir flüoresan lamba Şekil 2.14'de gösterilmiştir.



Şekil 2.14 : Flüoresan lamba.

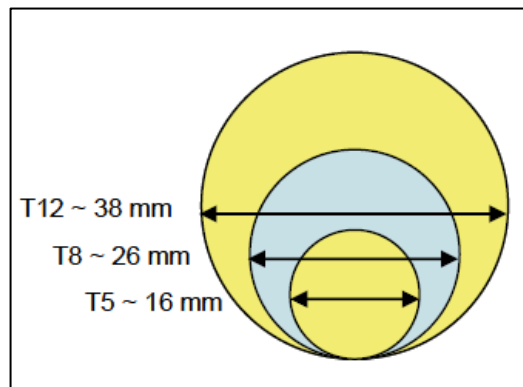
Genel olarak flüoresan lambanın çalışma prensibi; elektrik düğmesine basıldığında flüoresanın bir ucundaki flamanından diğerine bir ark oluşur. Bu ark, camın içerisindeki civayı buharlaştırır ve bu buhar elektrik yüklenerek ultraviyole ışınları saçmaya başlar. Ultraviyole ışınların tüpün içindeki fosfor tozlarına çarpmasıyla da görülen parlak ışık oluşur. Bu durum Şekil 2.15'de gösterilmiştir.

Floresan lambalar enkandesan lambalar gibi doğrudan şebekeye bağlanarak kullanılamazlar. Devreden akan akımı sınırlayan bazı elemanlara ihtiyaç duyarlar. Bu elemanlara balast adı verilmektedir. Manyetik ve elektronik olmak üzere iki çeşit balast tipi mevcuttur. Ateşlemenin başlaması için önce elektrotların ısıtılması gerekeceğinden lambaya başlangıçta yüksek bir gerilim uygulanması gerekir.



Şekil 2.15 : Flüoresan lambanın çalışma prensibi

Flüoresan lambaların zaman ile performansları ve etkinlik faktörü değerleri artmıştır. Eskiden T12 (lamba çapı 38mm) olan lambaların zamanla T8 daha sonra da T5 olarak çapları küçültülmüş, etkinlik faktörü değerleri artmıştır. T5 lamba iyi bir etkinlik faktörü değerine (100 lm/W) sahiptir ve T8 lambalara göre daha yüksek ortam sıcaklığında çalışabilmektedir. T5 lambaların boyu T8 lambalardan daha kısadır ve kesinlikle elektronik balast ile birlikte kullanılmaları gerekmektedir. Lamba çapları daraldıkça ışığı daha efektif yönlendirebilen T5 lambalı armatürlerin ışık çıktı oranları T8 lambalı armatürlere göre daha yüksektir. Flüoresan lambaların performansları ortam sıcaklığına göre değişir. T5 lambalar en iyi performanslarını 35 °C’de gösterirken, T8 lambalar için bu değer 25 °C’dır. İç aydınlatma tesisatlarında armatür içerisindeki sıcaklığın 35 °C olması ihtimali daha gerçekçidir. Farklı flüoresan lambaların tüp çaplarının karşılaştırılması Şekil 2.16’da gösterilmiştir [5].



Şekil 2.16 : Farklı flüoresan lambaların tüp çaplarının karşılaştırılması.

Flüoresan lambaların olumlu yanları,

- Ucuzdurlar,
- Etkinlik faktörü değerleri iyidir,

- Lambaların ömürleri uzundur (10 000 – 25 000 saat),
- Renk sıcaklığı ve renksel geriverim çeşitliliği fazladır.

Flüoresan lambaların olumsuz yanları,

- Ortam sıcaklığı lambanın çalışmasını ve ışık çıktı oranını etkiler,
- Yardımcı bir elemana ihtiyaç duyarlar (balast, starter ya da elektronik balast),
- Civa içerirler.

Çizelge 2.5’de flüoresan, metal halojen ve LED ışık kaynaklarının karşılaştırmaları verilmiştir.

Çizelge 2.5 : Flüoresan, metal halojen ve LED ışık kaynaklarının karşılaştırılması.

Işık Kaynakları	Flüoresan Lambalar	Metal Halojen Lambalar	LED’ler
Çalışma/Tekrar Çalışma Zamanı	Hemen (Elektronik Balast ile)	4-6 dk	Hemen
Etkinlik Faktörü [lm/W]	66 - 100	50 - 100	100+ (tek bir Led için @85°C)
Ekonomik Ömür [saat]	5000 - 25000	6000 - 12000	30000 – 70000
Renk Sıcaklığı [°K]	2700 - 6500	3000 - 6000	2600 – 8300
Renksel Geriverim Endeksi	50 - 95	70 - 90	90 - 65

3. LED IŞIK KAYNAKLI ARMATÜR TASARIMI

Bu bölümde LED ışık kaynaklı armatür tasarım süreçleri verilerek optik tasarım ve optik ışık kontrolünde kullanılan malzemeler anlatılmıştır.

3.1 Tasarım Süreçleri

LED ışık kaynaklı armatür tasarımında temel olarak iki yol izlenebilir. Bunlar; mevcut bir armatür içerisine LED bazlı bir ışık kaynağı yerleştirmek ya da LED bazlı yeni bir armatür tasarlamaktır. LED ışık kaynaklı yeni bir armatür tasarımı veriminin, mevcut armatüre LED ışık kaynaklarının yerleştirilmesine göre daha yüksek olması beklenir. Çünkü yeni tasarımda, LED'lerin elektriksel, optik ve ısı performansları dikkate alınabilecektir. Buna karşın, mevcut bir armatür içine uygun bir şekilde LED ışık kaynağının yerleştirilmesi ile elde edilecek armatür tasarımı, daha önce kullanılan başka ışık kaynağına göre oluşturulduğu için, daha verimsiz olabilecektir.

Genel olarak, LED ışık kaynaklı verimi yüksek bir armatür geliştirilirken aşağıdaki adımlar izlenmelidir [7]:

- Gerekli aydınlatma kriterlerinin belirlenmesi,
- Belirlenen aydınlatma kriterlerine göre tasarım hedeflerinin belirlenmesi,
- Optik, ısı ve elektriksel verimlerin belirlenmesi,
- Verimlere göre gerekli LED ışık kaynağı teknik özelliklerinin ve sayısının belirlenmesi,
- Prototip üretilerek simülasyon sonuçları ile gerçek verilerin karşılaştırılması.

3.1.1 Gerekli Aydınlatma Kriterlerinin Belirlenmesi

LED ışık kaynaklı armatürler, kullanılması amaçlanan ortamlarda konfor ve emniyet açısından gerekli olan minimum aydınlatma kriterlerini sağlamalıdır. Bu nedenle, aydınlatma kriterlerinin tasarım hedeflerinden önce belirlenmesi gerekmektedir. Bu

adımında, tasarlanacak armatürün kullanılacağı alanlar için geçerli mevcut standart ve öneriler incelenmelidir. Farklı bir yaklaşım olarak da, mevcut armatürlerin fotometrik özelliklerinin belirlenmesi ve bu özelliklerine göre kullanılabilecekleri uygulama alanlarının sınıflandırılması yapılabilir. Armatür tasarımının bu ilk adımında kullanılabilecek armatür karakteristik değerleri aşağıda sıralanmıştır:

- LED renk sıcaklığı,
- LED renksel geri verim endeksi,
- LED etkinlik faktörü [lm/W],
- Toplam ışık akısı,
- Işık dağılım eğrileri,
- Kamaşma sınırlaması.

3.1.2 Tasarım Hedeflerinin Belirlenmesi

Aydınlatma kriterleri belirlendikten sonra tasarım hedefleri konulmalıdır. Kritik tasarım hedefleri armatür toplam ışık çıktısı ve çekilen güç ile ilgili olacaktır. LED'lerin armatür içine yerleştirildiklerinde verdikleri ışık akılarının, çıplak haldeki ışık akılarına oranı, ışık çıktısı oranı (LOR: Light Output Ratio) olarak adlandırılır. Tasarım hedeflerinden biri bu oranın yüksek olmasıdır. Tasarım hedefleri olarak alınabilecek diğer kriterler aşağıda sıralanmaktadır:

- Armatürden çıkan toplam ışık akısı [lm],
- Işık dağılım eğrileri,
- Jonksiyon (Bağlantı noktası) sıcaklığı (LED'lerin çalışma sıcaklığı) [$^{\circ}\text{C}$],
- Armatür toplam gücü (yardımcı elemanlar dahil) [W],
- Armatür etkinlik faktörü [lm/W],
- Armatür ömrü [saat],
- Armatür maliyeti [TL].

3.1.3 Optik, Isıl ve Elektriksel Verimlerin Belirlenmesi

Tasarım sürecinde en önemli konulardan biri kullanılan LED ışık kaynağı sayısıdır. LED sayısı direkt olarak ışık akısı, güç tüketimi ve armatür maliyetini etkilemektedir. Hedeflenen ışık akısını, LED'lerin katalogda verilen ışık akısı değerine bölüp, kullanılacak LED sayısını hesaplamak çok kullanılan bir yöntemdir.

Bu şekilde yapılan bir tasarım ile doğru sonuçlar almak ve istenen aydınlatma kriterlerini sağlamak mümkün olmayabilir. LED'lerin ışık akıları jonksiyon sıcaklığı, sürme akımı gibi birçok faktöre bağlıdır. Gerekli LED sayısını kesin olarak belirlemek için optik, ısı kayıplar göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yüzden tasarımların bilgisayar ortamında gerek optik gerekse ısı yönünden analizi önemlidir.

Optik verim, armatürün optik tasarımı ile ilgilidir. Armatür içindeki kayıplar nedeni ile, dışarı verilen ışık akısı azalmaktadır. Kayıplar ışığın armatür tarafından yutulması veya armatür içine geri yansiyıp azalması sonucu ortaya çıkabilir. Verim, LED'lerin armatür içindeki yerleşimi, armatürün fiziksel özellikleri, kullanılan malzeme gibi etkenlerle değişmektedir.

Isıl verim, LED'lerin jonksiyon sıcaklığına bağlıdır. Işık akısı, sıcaklık yükselişi ile düşmektedir. Çoğu üretici firmanın LED kataloğu 25°C jonksiyon sıcaklığındaki ışık akısını vermektedir. Gerçek çalışma koşullarında sıcaklık değeri bu değerin üstüne çıktığı için, armatürün ısı analizi yapılarak LED'lerin çalışma sıcaklığı belirlenmeli ve katalog verileri yerine bu sıcaklığa göre belirlenen ışık akıları kullanılmalıdır.

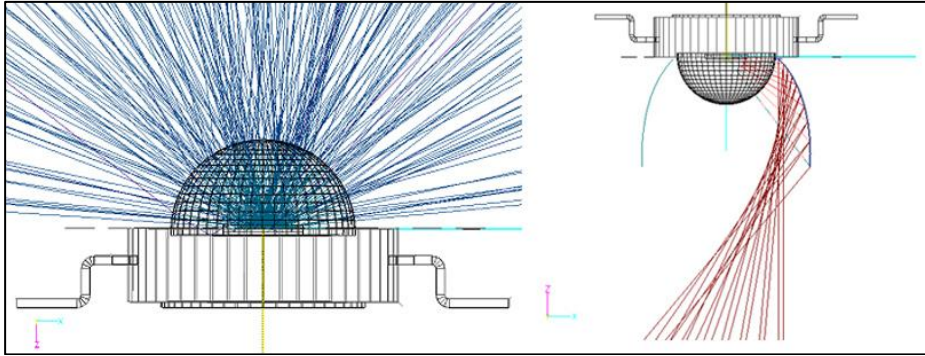
LED sürücüler şebekeden aldıkları gücü, LED'lerin çalışması için gerekli sabit akıma çevirirler. Bu dönüşüm %100 verimli değildir. Standart sürücülerin verimi %80-94 civarındadır [8]. Sürücü verimi aynı zamanda yüke de bağlıdır. Sürücüler düşük yüklerde çalıştırıldıklarında verimleri daha da düşmektedir. Bu nedenle sürücü seçimi ya da armatür tasarımında bu noktalara dikkat edilmeli, toplam armatür verimi hesaplanırken sürücü kayıpları da dikkate alınmalıdır.

3.1.3.1 Optik Verim

Armatürlerde optik kontrol elemanları olarak reflektörler (yansıtıcılar), lensler (mercekler), difüzörler (yayıcılar), yönlendiriciler, petekler, ekranlar sayılabilir. Optik verimin her zaman çok yüksek olması birinci amaç olmayabilir. Çünkü yüksek optik verimli armatürlerle gerçekleştirilen aydınlatmalarda, kamaşma sorunlarının yanı sıra düzgünlük değerlerinin sağlanması problemleri de gözlemlenebilir. Bu yüzden görsel konfor ve verim optimize edilmesi gereken ayrı bir konu olarak ele alınmalıdır.

Günümüzde ışığın izleyeceği yolu belirlemek ve yüzeyler üzerine düşen ışık miktarını tahmin etmek için bilgisayar programları kullanılmaktadır. Bunların sık

kullanılanlarına örnek olarak Optisworks, Lighttools, ASAP, Lucidshape ve Photopia gibi programlar verilebilir. Bu programlar önceden kütüphanelerinde tanımlı olan ışık kaynaklarını kullanarak simülasyonlar gerçekleştirebilmektedir. Optik tasarım programları, ışık kaynaklarından çıkan ışınların sayısının belirlenmesine olanak tanımaktadır. Bir ışık kaynağından dış ortama ışın yollanmasına “ışık bombardımanı” adı verilmektedir. Işık kaynağından dış ortama yollanan ışın sayısı, simülasyonun hassasiyetini belirler. Yüksek ışın miktarı ile yapılan hesaplamalar, hesap kesinliğini arttırırken, simülasyon süresini uzatmaktadır.



Şekil 3.1 : Örnek LED modülünden çıkan ışınların bilgisayar ortamında gösterimi.

LED çipinde üretilen ışık birçok malzemeden geçerek ortama yayılır. Farklı malzemeler ışığı farklı şekilde geçirdiği için ışık miktarı azalır ve yönü değişir. Bilgisayar programlarından iyi sonuç almak için kullanılan malzemelerin özelliklerinin programa çok iyi tanıtılmış olması gereklidir. Şekil 3.1’de tekil bir LED modülünden çıkan ışınlar ve yayıcı bir LED modülünden çıkan ışığın yansyarak yayılımının bilgisayar ortamındaki simülasyonu gösterilmektedir [7].

Bilgisayar yazılımları kullanılarak, belirli LED modülleri için farklı armatür tasarımları yapılabilir ve elde edilebilecek ışık dağılım eğrileri tahmin edilebilir. Bu çalışmalarda en önemli ve kritik nokta kullanılacak LED modüllerinin simülasyon programlarına doğru tanıtılmış olmasıdır. Genel olarak LED üreticileri, kendi LED modüllerinin tekil olarak ışık dağılım eğrilerini farklı programlarda kullanılmak üzere paylaşmaktadır. Tasarımcılar da bu standart dosyaları kullanarak kendi tasarımlarını gerçekleştirebilmektedir. Ancak LED modülü bir armatür içine çok sayıda yanyana yerleştirildiğinde, optik verimliliği ve ışık çıktı oranı azalabilmektedir. LED ışık kaynaklarının ışık akılarının armatür içinde ne kadar azaldığının belirlenmesi, kullanılacak LED sayısına göre optik verimdeki düşme oranı doğru armatür tasarımlarında üzerinde önemle durulması gereken konulardır.

3.1.3.2 Isıl Verim

LED ışık kaynaklı aydınlatma armatürlerinde üretilen ısınn dış ortama transferi diğer ışık kaynaklarından farklıdır. Konvansiyonel ışık kaynakları üretilen ısıyı genel olarak ışınnım (radyasyon) yolu ile transfer ettikleri için, LED ışık kaynaklı armatür tasarımlarının da birçoğu hala bilinen ışınnım esasına göre gerçekleştirilmektedir. LED’ler ürettikleri ısıyı ancak iletim yoluyla dışarı transfer edebilmektedir. Bu farklılık LED’ler ile çalışacak sistemler tasarlanırken farklı ısı transfer seçeneklerinin düşünülmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. LED’lerde üretilen ısıyı dışarı transfer edebilmek için ona “ısı” bir yol çizilmesi gerekmektedir. Bu yüzden LED ışık kaynaklarının kullanılacağı armatür tasarımlarında, ısı iletim esaslı tasarımlarla sorunların çözümülenmesi gerekmektedir. Çizelge 3.1’de örnek ışık kaynaklarının farklı ısı iletim mekanizmalarındaki ısı kaybı yüzdeleri listelenmiştir.

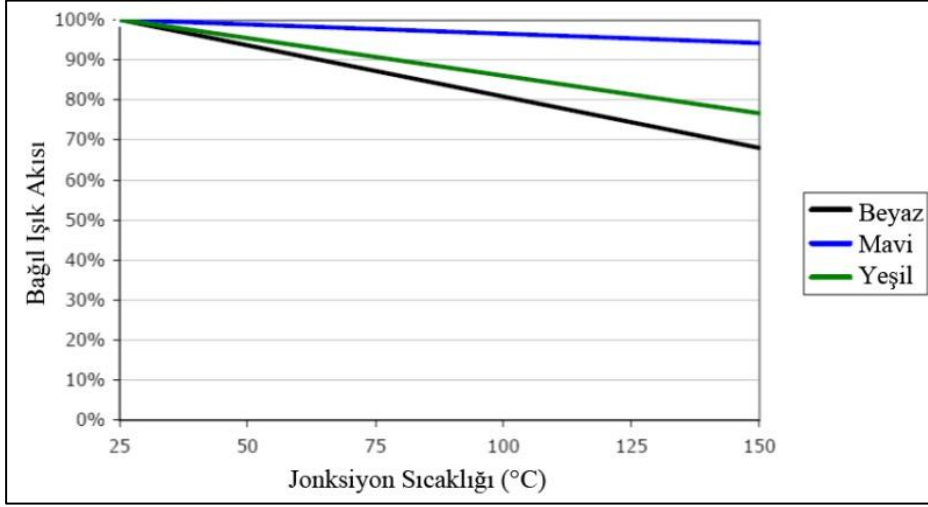
Çizelge 3.1 : Işık kaynaklarının ısı transfer mekanizmalarının karşılaştırılması

Işık Kaynağı	Işınım (%)	Taşınım (%)	İletim (%)
Enkandesen	>90	<5	<5
Flüoresan	40	40	20
HID	>90	<5	<5
LED	<5	<5	>90

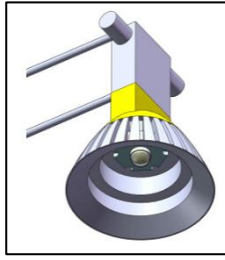
LED’lerin jonksiyon sıcaklığı arttıkça ürettikleri ışık miktarları düşmektedir. Şekil 3.2’de farklı jonksiyon sıcaklıkları için, farklı renklerde ışık yayan LED’lerin ışık akılarındaki değişim gösterilmektedir. Maksimum ışık akısının 25°C’de elde edildiği kabul edilmiştir. Şekil 3.2’den görüldüğü gibi, sıcaklık arttıkça ışık akısı önemli oranlarda düşmektedir. Bu nedenle, LED’lerin sadece katalog değerleri ile armatür tasarımları yapıldığında, gerçek kullanımlarda hedeflenenden daha düşük ışık akıları elde edilebilmektedir [8]. Uygulamada bu sorunlardan kaçınmak için armatürün ısı davranışının detaylı olarak incelenmesi gerekmektedir.

Armatürlerin ısı analizlerinin yapılabilmesi için literatürde birçok program mevcuttur. Bütün programlar temelde sonlu elemanlar, sonlu farklar vb. gibi matematiksel yöntemleri kullanarak, armatür içindeki sıcaklık dağılımını ve hava hareketini tahmin edebilmektedir. Son yıllarda özellikle LED alanında özelleşmiş yazılımlar da geliştirilmiştir. Bu yazılımlarda, farklı LED modüllerinin malzeme ve ısı davranışları veri olarak kullanılmaktadır. Öncelikle LED ışık kaynaklarının ve

armatür geometrisinin, herhangi bir üç boyutlu çizim programı ile simülasyona uygun hale getirilmesi gerekmektedir. Şekil 3.3’de örnek bir çizim gösterilmiştir.



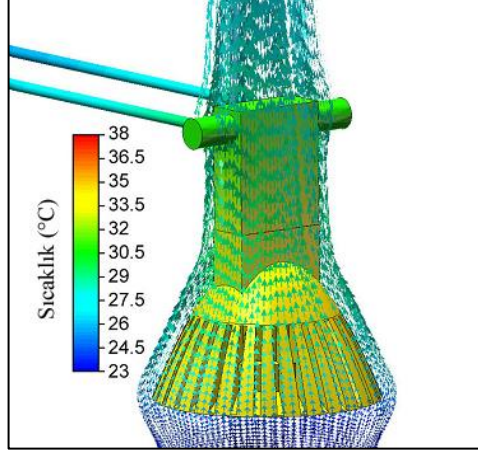
Şekil 3.2 : Jonksiyon sıcaklığı artışının ışık akısına etkisi.



Şekil 3.3 : Armatür üç boyutlu çizimi.

LED’in ısı bilgisi ölçüm yolu ile ya da üretici firmanın ilgili dokümanlarından elde edilebilir. Henüz ısı verilerin sunumu ile ilgili bir standart oluşturulmadığı için, farklı üreticilerin verileri de farklı formatta olabilmektedir. Oluşturulan model ile ilgili veriler programa girildikten sonra, armatür yüzeyi küçük elemanlara bölünerek hesaplamalar yapılmaya başlanır. Bu işleme ağ oluşturma adı verilmektedir. Oluşturulan ağın sıklığı hesaplama süresini ve doğruluğunu etkilemektedir. Ağın çok sık olması, yani çok küçük parçalardan oluşması hesap zamanını uzatmakta, ama diğer yandan hassasiyeti arttırmaktadır. Bu yüzden kritik noktalardaki (LED modül çevresi gibi) ağ sıklığı daha fazla yapılmaktadır. Armatürün çalışma sıcaklığını ve içindeki sıcaklık dağılımını etkileyen diğer bir parametre de ortam sıcaklığı olduğu için, yazılıma ortam sıcaklığı değeri de veri olarak girilmelidir. Yazılım LED’in ısı bilgisini ve ortam sıcaklığını kullanarak armatür içinde bir sıcaklık dağılımı ve hava hareketi belirlemektedir. LED’li armatürlerde genel olarak aktif soğutma bulunmamaktadır. Armatür içindeki hava hareketi, doğal taşınım yoluyla oluşmaktadır. Bu olay sonucunda sıcaklık değişiminden oluşan yoğunluk farkı

nedeniyle de bir hava hareketi oluşmaktadır. Bazı hesaplamalı akışkanlar dinamiği programları, doğal taşınımı çözerek hava akış yönünü de tayin edebilmektedir. Hava yönü ve sıcaklığının yazılım yardımı ile tahmin edilmesi, daha uygun soğutma kanallarının ve soğutma bloklarının tasarlanmasına yardımcı olabilmektedir. Şekil 3.4’de örnek bir armatürün sıcaklık dağılımı ve hava akış yönü gösterilmektedir [7].



Şekil 3.4 : Örnek bir ısı simülasyonu sonucu ve hava akış yönü.

Bilgisayar yazılımları yardımıyla gerçekleştirilen simülasyonlar sayesinde, kullanılacak LED’lerin armatür içinde kaç dereceye kadar ısınabilecekleri tahmin edilebilmektedir. Bu da tasarımcıyı ve üreticiyi bir çok prototip yaparak deneme yanılma yoluyla sıcaklık tahmin etme işleminden kurtarabilmektedir. Tasarımda ısı analiz programlarının kullanılması hem zaman hem de maliyet yönünden fayda sağlamaktadır. LED’lerin çalışma sıcaklığı belirlendikten sonra, üretici katalog verilerinden bu sıcaklıkta ışık akısı miktarlarındaki azalma oranları ve ısı verimleri hesaplanarak, elde edilebilecek ışık akısı değeri doğru olarak belirlenebilmektedir.

3.1.3.3 Elektriksel Verim

LED’lerin çalışması için gerekli yardımcı eleman olan sürücüler de %100 verimli değildir. Sürücüdeki kayıpların artması, çekilen toplam armatür gücünün yükselmesine ve elektriksel kayıpların ısı formunda ortaya çıkmasına neden olmakta ve bunların sonucunda toplam armatür verimi azalmaktadır. Standart tip LED sürücülerinin verimleri %80-90 arasındadır [9]. Sürücülerin kısmi yükte çalıştırılmaları da sürücü verimini etkileyen faktörlerden biridir. LED’li armatür tasarımlarında toplam güce uygun sürücünün seçilmesi, armatür verimi için önemli bir kriterdir.

3.1.4 Gerekli LED Sayısının Belirlenmesi

Verimler hesaplandıktan sonra, istenilen toplam ışık akısı değerini sağlayacak LED sayısı hesaplanmalıdır. Tasarım aşamasında hedeflenen ışık akısı değeri, optik ve ısı verimlerin çarpımına bölünerek, armatür formunda gereken ışık akısı değeri hesaplanır. Bulunan bu değer tek bir LED'in üretici tarafından verilen ışık akısı değerine bölünerek de gerekli LED ışık kaynağı sayısı bulunur. Elektriksel verim sadece çekilen gücü etkilediği için, ışık akısı hesabında dikkate alınmaz.

$$\begin{aligned} \text{Gereken Işık Akısı} &= \text{Hedeflenen Işık Akısı} / (\eta_{\text{ısı}} \times \eta_{\text{optik}}) \\ \text{LED Sayısı} &= \text{Gereken Işık Akısı} / \text{Tek LED Işık Akısı} \end{aligned} \quad (3.1)$$

3.1.5 Prototip Oluşturma

Bilgisayar destekli simülasyon programları kullanılarak ısı ve optik simülasyonlar gerçekleştirildikten sonra, armatür tasarımı tamamlanır. Bu tasarımlara göre kalıplar oluşturularak armatür prototipi üretilir. Üretilen prototipin simülasyon sonuçları ile laboratuvar koşullarında ölçülecek gerçek verileri karşılaştırılarak, hedeflenen tasarım değerleri kontrol edilir. Herhangi bir uyumsuzluk halinde geriye dönük düzeltmelerin yapılması gerekebilir.

3.2 Optik Tasarım

Armatür tasarımının en önemli ve en kritik bölümlerinden birisi optik tasarım sürecidir. Lambaların ışık şiddeti dağılımları hedef alan üzerinde arzu edilen ışık şiddeti dağılımlarını sağlamadığından ışığı kontrol etmek üzere reflektörler, lensler, prizmalar ve dağıtıcılar gibi optik elemanlar kullanılır.

Bir tasarım yapılırken amaç, olası en iyi ışık dağılımını elde etmek, sistemi en az ışık kaybı ile çözmek, armatür görünümünün iyi olması, karışık üretim süreçleri içermemesi ve mümkün olduğunca ucuz olmasıdır. Bu gerekliliklerden bazıları birbirleri ile çelişebileceğinden, tasarımın her aşamasında optimizasyon çok önemlidir. Örneğin; en iyi ışık dağılımını sağlayan ve çok güzel bir görünüme sahip olan bir armatür üretim süreçleri açısından karışık ve pahalı olabilir.

Son yıllarda, tasarımcılar armatürlerin optik performanslarını tahmin edebilmek için çeşitli yazılımlar kullanmaktadır. Fakat, kullanılan yazılımlar ne kadar iyi olursa

olsun, üretim toleransları gibi nedenlerden ötürü armatür hakkında tam bir tahmin sağlayamamaktadır. Bu yüzden, yazılım ile elde edilen son tasarımın prototipi oluşturulmalı ve fotometrik açıdan test edilmelidir.

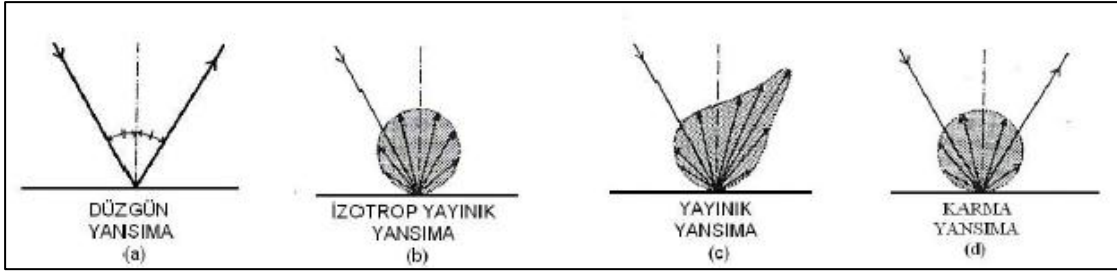
3.2.1 Optik Işık Kontrolünün Fiziksel Prensipleri

Işık birçok şekilde kontrol edilebilir. Bunlardan en önemlileri; yansıma, kırılma, iletim, yutma, difüzyon, girişim, difraksiyon ve polarizasyondur. Bunlardan ilk beşi geometrik optik, son üçü ise fiziksel optik ile açıklanır. Geometrik optik ışığın yansıması, kırılması ve aynalar, prizmalar ve lensler gibi basit optik elemanların kullanımının temellerini açıklarken, fiziksel optik ışık dalgalarının birbirine girişimi, difraksiyon ve polarizasyon olaylarını açıklar. Fiziksel optiğe bir örnek olarak aynasal yüzeylerde yansımayı engelleyici veya artırıcı ince film kaplamalar gösterilebilir. Genel olarak, geometrik optik iki ortam arasındaki belirli bir açıya sahip yansıyan ya da kırılan ışık ışınları ile ilgilenirken, fiziksel optik ise daha temel anlamda ışığın elektromanyetik dalga formatında olması ile ilgilenir [10].

Bu çalışmada geometrik optik ile ilgili kavramlar esas alınarak açıklanmıştır.

3.2.1.1 Yansıma

Yansıma, ışığın geldiği yüzeyden oranı, biçimi, doğrultusu, tayfsal yapısı nasıl olursa olsun, geri dönmesidir. Işığın yansıması, iki ortamı ayıran bir yüzeyde, bir nesnenin yüzeyinde düşünülecek bir olaydır. Bir yüzeyden yansıyan ışık, o yüzeyde absorbe edileceğinden bu oran yüzeye gelen ışığın ufak ya da büyük bir bölümü olabilir. Bu oran yüzeyin yansıtma çarpanı (ρ) ile belirlenir. Bu oran büyük ise yüzeyden yansıyan ışık çok, küçük ise yüzeyden yansıyan ışık oranı az olacaktır. Bu oran 1 ise ortama gelen ışığın ortamdaki yansıyan ışığa eşit olması beklenir. Yüzeyden yansıyan ışığın, hangi doğrultuya ne oranda yansıyacağı ise yüzeyin ışığı yansıtma biçimi ile belirlenir ve doğrudan doğruya yüzeyin doku özelliği ile ilgilidir. Yansıma biçimleri, düzgün (aynasal yansıma), izotropik yansıma, yayınık yansıma, karışık yansıma olmak üzere dört temel gruba ayrılır [11]. Şekil 3.5’de yansıma tipleri verilmiştir.



Şekil 3.5 : Yansımalar tipleri.

Düzgün (aynasal) yansıma, ışığın ayna gibi veya parlak, pürüzsüz bir yüzeyden geldiği açıya eşit olan açı ile yüzeyden ayrılması olayıdır.

İzotropik yansıma, mat bir yüzeye gelen ışığın farklı açılarla yansıması ile meydana gelir. Aynı zamanda bu yansıma Lambert saçılması veya difüzyonu olarak da adlandırılır.

Yayınlık yansıma, düzgün yansıma ile izotropik yansımanın oluşturduğu iki sınır durum arasındaki ara yansıma biçimidir.

Karma yansıma ise düzgün yansıma ile izotropik yansıma ya da yayınlık yansıma biçimlerinin birlikte olması durumudur.

3.2.1.2 Kırılma (Snell Kanunu)

Işık bir malzemeden diğerine geçerken kırılır-bükülür ve hızı değişir. İki faktör kırılmayı etkiler. Bunlar, ışığın gelme açısı (Θ) ve malzemenin kırılma indisidir (n). Herhangi bir malzemenin kırılma indisi 3.2 formülü ile belirlenir.

$$n = \text{ışığın boşluktaki hızı} / \text{ışığın malzeme içerisindeki hızı} = c / v \quad (3.2)$$

Işığın havadaki hızı hemen hemen boşluktaki hızına eşit olduğundan hava için kırılma indisi “1” olarak düşünülebilir ($n_{\text{hava}} = 1.000293$). Işığın hızı bir malzemeden diğerine geçerken azalacağından kırılma indisi hemen hemen tüm malzemeler için 1’den büyüktür [12].

Kırılma olayı Snell Kanunu ile açıklanır. Bu ise;

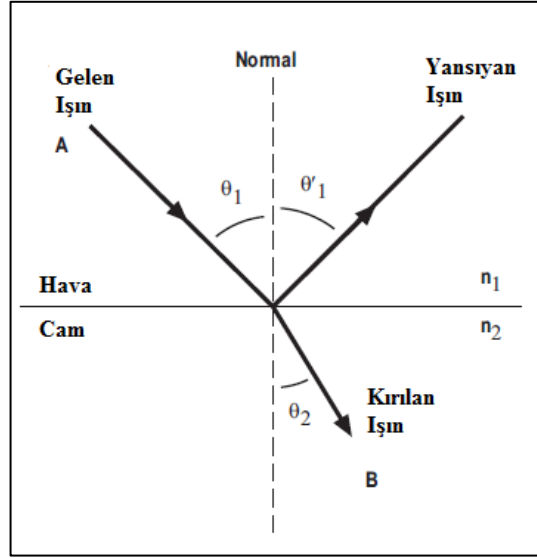
$$n_1 \sin \Theta_1 = n_2 \sin \Theta_2 \quad (3.3)$$

Burada,

n_1 Birinci ortamın kırılma indisi,

n_2 İkinci ortamın kırılma indisi,

- θ_1 Gelen ışık ışınlarının normal ile yaptığı açı,
 θ'_1 Yansıyan ışık ışınlarının normal ile yaptığı açı,
 θ_2 Kırılan ışık ışınlarının normal ile yaptığı açı.



Şekil 3.6 : Kırılma ve Snell kanunu.

Şekil 3.6’da gösterilen bu kanuna göre, ışık ışınları yüksek kırılma indisine sahip bir ortamdan düşük kırılma indisine sahip bir ortama geçerken ($n_1 > n_2$) normalden dışa doğru sapar. Aynı zamanda ışık ışınları düşük kırılma indisi bir ortamdan yüksek kırılma indisine sahip bir ortama geçerken ($n_1 < n_2$) normale doğru bükülür.

Bazı maddelerin kırılma indisleri aşağıdaki Çizelge 3.2’de verilmiştir [13].

Çizelge 3.2 : Boşlukta, 589nm dalga boyunda ışıkla ölçülen bazı malzemelerin kırılma indisleri

MADDELER	n (Kırılma Indisi)	MALZEMELER	n (Kırılma Indisi)
Hava	1,0003	Flint Camı	1,66
Benzin	1,5	Gliserin	1,47
Karbon Disülfür	1,63	Polistiren	1,49
Mısır Şurubu	2,21	Kuarz Camı	1,46
Elmas	2,42	Sodyum Klorid	1,54
Etil Alkol	1,36	Su	1,33
Galyum Arsenid (Yarı iletken)	3,4	Buz	1,31
Üfleme Düz Cam	1,52	Germanyum	4,1
Zirkon	1,92	Silikon	3,5

Yansıma ve Kırılma İndisi

Saydam bir madde tüm ışığı geçirmesine rağmen iki yüzeyin herbirinden ışığın belli bir kısmını da yansıtır. Bu yansıma kırılma indisinde bir değişiklik oluncaya kadar

devam eder. Işık ışınlarının gelme açısı 0° olduğunda, yansımanın Fresnel Kanunu bu etki miktarını etkiler [12].

$$r_\lambda = (n_2 - n_1)^2 / (n_2 + n_1)^2 \quad (3.4)$$

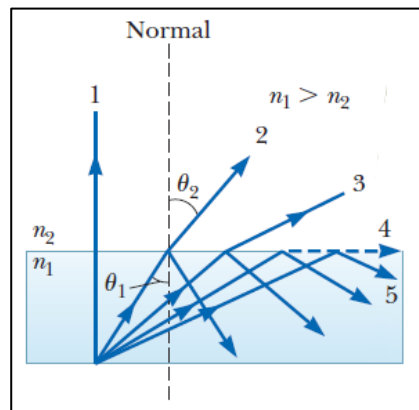
Burada,

- r_λ Yansıma kaybı,
- n_1 Birinci ortamın kırılma indisi,
- n_2 İkinci ortamın kırılma indisi.

Örneğin, ışık ışınları gelme açısı 0° olacak şekilde havadan ($n_{\text{hava}} = 1$) cam bir malzemeye ($n_{\text{cam}} = 1,5$) geçtiğinde, yukarıdaki formüle değerler konulduğunda görülecektir ki iki ortam sınırında yansıma kaybı %4 olacaktır. Buradan şu sonuca varılabilir, ışık ışınlarının bir ortama gelme açısı arttıkça yansıma yapan ışık ışınlarının sayısı da artacaktır.

Toplam İçsel Yansıma (Total Internal Reflection - TIR)

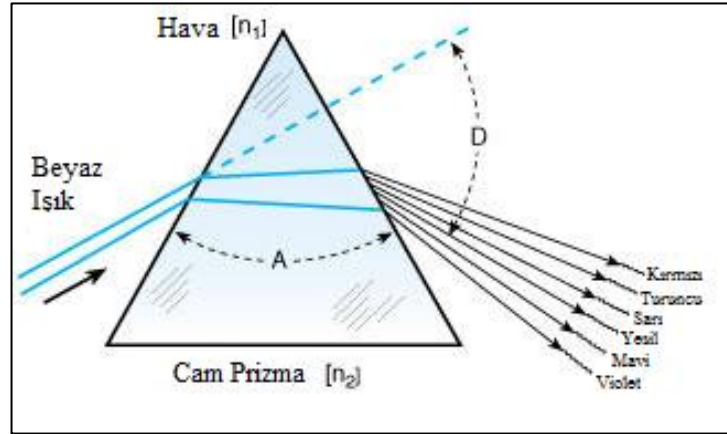
Snell Kanununa göre ışık, kırılma indisi yüksek bir malzemeden düşük bir malzemeye geçerken (örneğin; ışığın camdan havaya geçmesi gibi) kırılan ışık normalden sapmaktadır. Bu fenomen toplam içsel yansıma olarak adlandırılmaktadır. Işık ışınlarının açısı normalden uzağa doğru arttığında, açı kritik açı (θ_c) diye adlandırılan değere ulaşır ve iki ortam arasında yani sınır boyunca diğer malzemeye geçer veya yansır. Işığın kritik açıdan daha yüksek gelme açılarında ise, bütün ışıklar geldiği ortama doğru yansır. Şekil 3.7 ışığın farklı gelme açılarında bu olayı açıklar [14]. Burada 1, 2 ve 3 no'lu ışınların gelme açıları kritik açıdan (θ_c) daha küçük bir açıya sahipken, 4 no'lu ışın kritik açıya eşit, 5 no'lu ışın ise kritik açıdan büyük bir açıdır [12].



Şekil 3.7 : Toplam içsel yansıma.

Işığın Dağılma Etkisi (Dispersion)

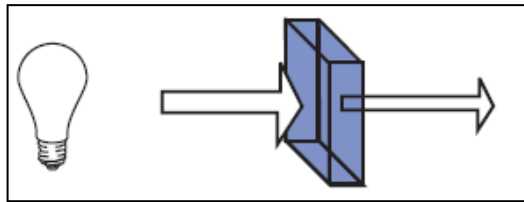
Kırılma indisi gelen ışığın dalga boyuna bağlı olarak değişir. Malzemeler tipik olarak kısa dalga boyları için yüksek kırılma indisine sahiptirler. Bu yüzden mavi ışık kırmızı ışıktan daha fazla kırılır. Buna örnek olarak beyaz ışığın birbirine paralel olmayan iki yüzeye sahip bir prizmadan geçişi verilebilir. Şekil 3.8’de beyaz ışığın böyle bir prizmadan geçerken spektral komponentlerine ayrılması gösterilmiştir [15].



Şekil 3.8 : Beyaz ışığın dağılma etkisi.

3.2.1.3 İletim

Işık bir malzemedan geçerken iletilir. Yutma, yansıma, difüzyon hepsi ışığın iletilmesini etkiler. Şekil 3.9’da ışığın iletilmesi gösterilmiştir.



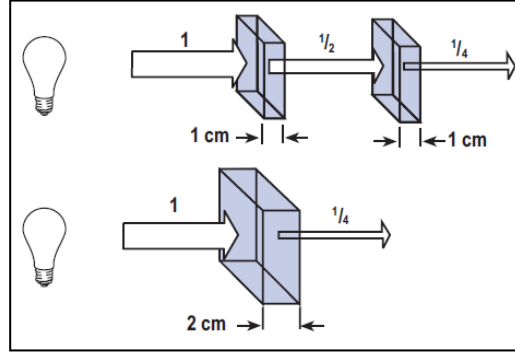
Şekil 3.9 : Işık ışınlarının iletimi.

3.2.1.4 Yutma

Bir malzeme üzerine gelen ışığın hepsini ya da belli bir kısmını yutar ve bunu genellikle ısı enerjisine çevirir. Birçok malzeme bazı dalga boylarındaki ışığı geçirirken, bazı dalga boylarını da yutmaktadır. Buna *selektif yutma* denir.

Lambert Kanununa göre, ışık eşit kalınlıklara sahip iki homojen malzemedan geçerken aynı oranda yutma etkisi de gerçekleşir. Şekil 3.10’da aynı homojenlikte 1 cm kalınlıktaki iki aynı malzemedan ayrı ayrı ışığın geçişi ile 2 cm kalınlıkta tek bir

malzemeden geçişinde yutma oranlarının aynı olacağı gösterilmiştir. Bu iki örnekte ışığın %75'inin yutulduğu görülmektedir [12].



Şekil 3.10 : Yutmanın Lambert kanunu.

Bu eksponensiyel ilişki 3.5 formülü ile ifade edilir.

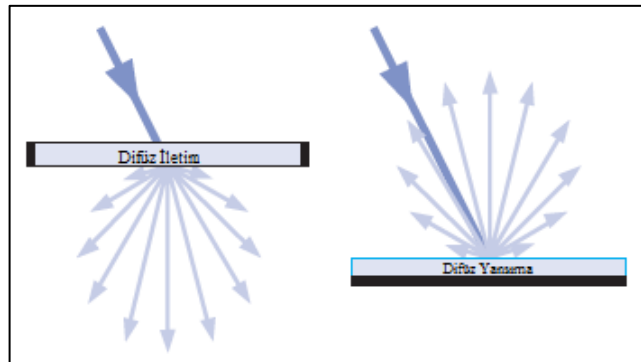
$$I = I_0 \times e^{-\alpha x} \quad (3.5)$$

Burada,

- I İletilen ışığın yoğunluğu,
- I_0 Malzemeye gelen ışığın yoğunluğu (Yüzey yansımaları hariç),
- α Ters uzunluk birimindeki yutma faktörü ,
- x Ürünün kalınlığı (α ile kalınlıklar aynı birimlerde ölçülmüş). (Not: Doğru sonuçlar için herbir dalga boyu farklı şekilde düşünülmelidir.)

3.2.1.5 Difüzyon

Yansımada anlatıldığı üzere, ışık çok iyi düzgün bir yüzeye çarptığında yansıma aynasal olmaktadır. Işık pürüzlü bir yüzeye çarptığında ise ışık bir çok doğrultuda yansıyabilir veya iletilebilir. Buna *difüzyon ya da saçılma* denir [12]. Şekil 3.11’de difüz iletim ve yansıma gösterilmiştir.



Şekil 3.11 : Difüz iletim ve yansıma.

Difüz iletim veya yansımanın miktarı iki faktöre göre değişmektedir. Bunlar;

- İki ortam arasındaki kırılma indislerindeki farklılıklar,
- Işığın dalga boyuna oranla difüz malzemesindeki moleküllerin şekli ve boyutudur.

Örneğin, havadaki moleküller daha kısa dalga boylarındaki ışığı düzgün bir şekilde dağıtarak bize mavi bir gökyüzü sağlamaktadır.

3.2.2 Reflektörler (Yansıtıcılar)

Bu bölümde dairesel, parabolik, eliptik ve hiperbolik reflektörlerin yapıları incelenmiştir.

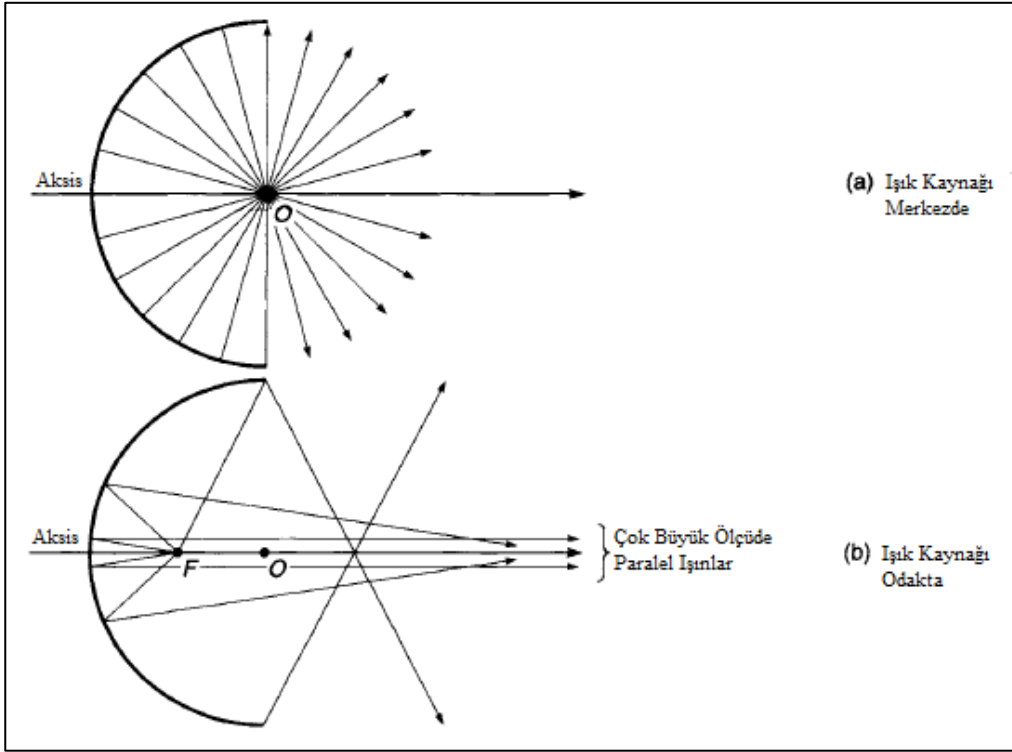
3.2.2.1 Dairesel Reflektörler

Dairesel yapıdaki reflektörler bir kürenin veya silindirin bir parçası gibi düşünülebilir. Silindirik yapıdaki sistemler genellikle lineer ışık kaynakları için kullanılırken küre yapısındaki sistemler yaklaşık olarak noktasal ışık kaynakları için kullanılmaktadır.

Şekil 3.12 dairesel veya konkav bir reflektör kullanımını göstermektedir. Her iki örnekte de “O” noktası merkez noktası iken “F” odak noktasıdır. Şekil 3.12 (a)’da ışık kaynağı merkeze yerleştirilmiştir. Burada ışınların dairenin iç yüzeyinden yansıyarak yine “O” noktası üzerine düştüğü görülmektedir. Uygulamada lambaların üzerine düşen bu ışınları minimize etmek için, lambaların flamanları veya ark tüpleri “O”nun ilerisine veya gerisine (odak tarafına doğru) yerleştirilmelidir. Bu şekilde lamba üzerinde ışık enerjiden dolayı oluşan istenmeyen ısı enerjisi azaltılabilir [16].

Şekil 3.12 (b), bu tip reflektörlerin daha kullanışlı bir modelidir. Burada ışık kaynağı odak noktasına yerleştirilmiştir. Odak noktası, merkez yani “O” noktası ile reflektörün iç kısmının başlangıcı arasında olup odak ile merkez noktası arasındaki mesafe ile odak noktası ile reflektörün iç kısmı arasındaki mesafe aynıdır. Burada odak noktasına yerleştirilmiş ışık kaynağından 10° ve altında çıkan ışınların çok büyük ölçüde aksise paralel olarak yansıdığı görülmektedir [16].

Diğer bir taraftan, parabol ve elips şeklindeki sistemler ışığı ileriye iletme anlamında daha fazla verim sağlamak ve lambadan çıkan ışık akısını daha fazla kontrol edebilmektedir.



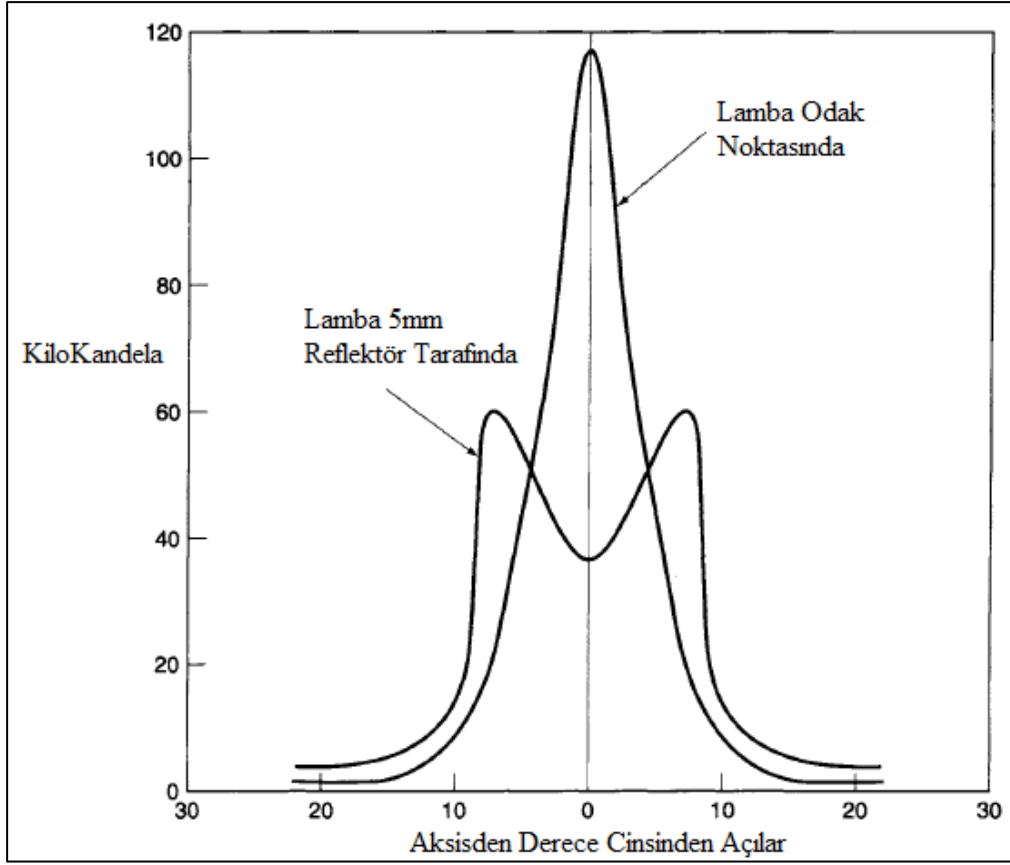
Şekil 3.12 : Dairesel-Konkav bir reflektörden yansıyan ışık.

3.2.2.2 Parabolik Reflektörler

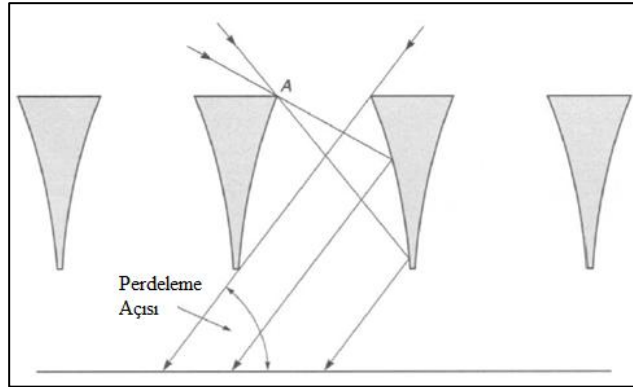
Bir kaynaktan çıkan ışık ışınlarını toplayıp birbirine paralel olarak yansıtan sistemler parabolik reflektörlerdir. Parabolün eşitliği 3.6 formülü ile verilmiştir.

$$y^2 = 4ax \quad (3.6)$$

Şekil 3.13’de bir parabol formu gösterilmiştir. Burada “O” parabolün merkezi, “F” odak noktasıdır. Burada ışık kaynağı odak noktasına yerleştirilmiş ve birbirine paralel yansıyan ışınlar sağlanmıştır. Odak noktasına 2a uzaklıkta olan dikey çizgi doğrultmandır. Odak noktasından reflektör üzerindeki herhangi bir “P” noktasına olan uzaklık (x+a) , “P” noktasından doğrultmana olan yatay uzaklığa eşittir [16].



Şekil 3.14 : 200W Tungsten halojen lambanın 29mm odak uzunluğuna sahip parabolik bir reflektördeki ışık dağılım eğrisi.



Şekil 3.15 : Parabolik louvre yapısı.

3.2.2.3 Eliptik Reflektörler

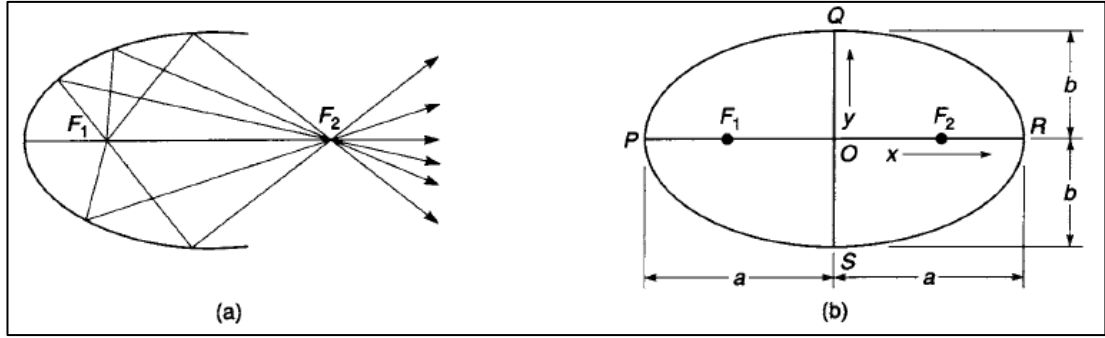
Şekil 3.16 (a)'dan görüldüğü üzere elips, “ F_1 ” ve “ F_2 ” olmak üzere iki odak noktasına sahiptir. Noktasal bir ışık kaynağı bir odak noktasına yerleştirildiğinde tüm ışıklar diğer odak noktası üzerinden geçer [16].

Elipsin matematiksel denklemi 3.7 formülü ile verilmiştir.

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (3.7)$$

Burada a ve b uzunlukları (PR) ve (QS) uzunluklarının yarısı iken “O” noktası elipsin merkezidir. Ayrıca burada “O” noktasından yani reflektörün merkezinden odak noktasının yatay eksen üzerindeki mesafesi $\pm \sqrt{a^2 - b^2}$ dir [16].

Eliptik reflektörlerin projektörlerde veya ışığın dar açılar ile bir hedef alan üzerine yönlendirilmesinin istendiği yerlerde kullanımı faydalıdır.



Şekil 3.16 : Eliptik reflektör.

3.2.2.4 Hiperbolik Reflektörler

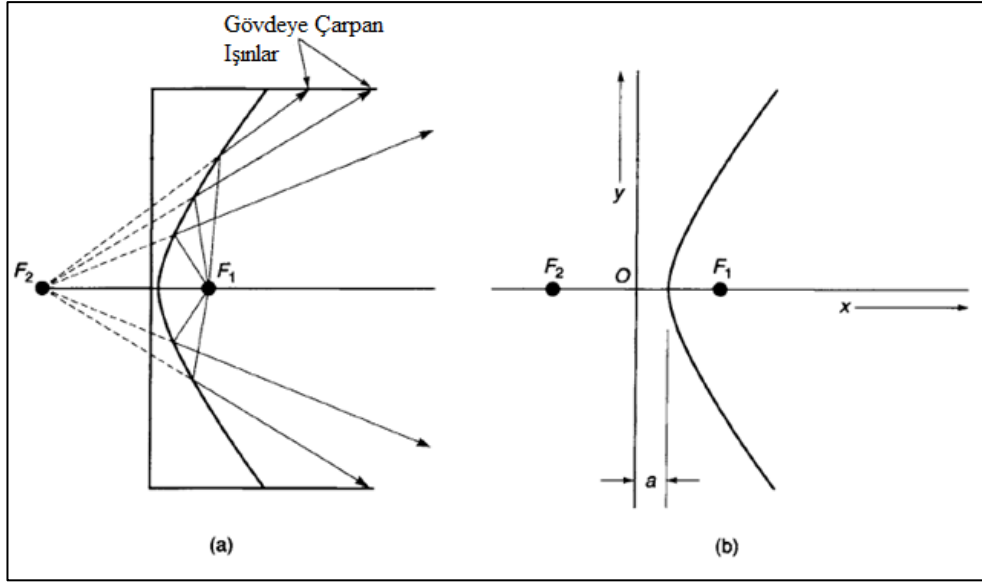
Şekil 3.17 (a)'dan görüldüğü üzere hiperbol de elips gibi iki odak noktasına sahiptir. Fakat burada ikinci odak noktası aynanın arkasındadır ve ışık ışınları bu nokta üzerinden sapar. Hiperbolik reflektörler bazen belirli sapmalar elde etmek amacı ile elipsler ile de kullanılırlar. Hiperbolik reflektörlerin sakıncaları ise bazı ışık ışınlarının gövdeyi çevreleyen yapıya çarpması ve bunun sonucunda ışık kaybına neden olmasıdır [16].

Şekil 3.18 (b)'den hiperbolün matematiksel modeli 3.8 formülü ile verilmiştir.

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad (3.8)$$

Burada b bir sabit iken aynanın arkasından F1'in uzunluğu $\sqrt{a^2 + b^2}$ dir [16].

Hiperbolik bir yapı aksisine paralel bir düzlemin bir koniden kesilmesi ile elde edilebilir.



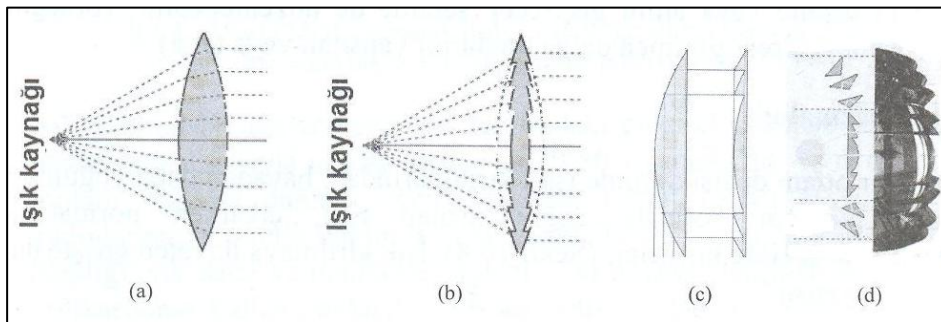
Şekil 3.17 : Hiperbolik reflektör.

3.2.3 Lensler (Mercekler) ve Prizmalar (Işık Kırıcılar)

3.2.3.1 Lensler (Mercekler)

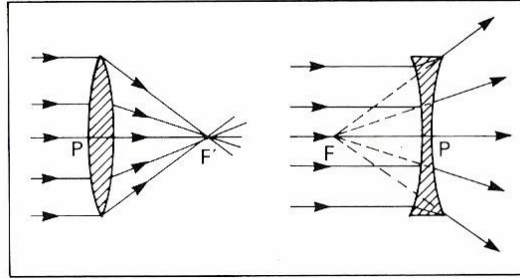
Genel anlamda konvansiyonel armatürler düşünüldüğünde, sahne-stüdyo, projektörler, spotlar, deniz fenerleri ve benzeri yapılar dışındaki armatürlerde lenslere ihtiyaç yoktur. Fakat LED’lerde ışığı yönlendirmek için reflektörlerin yanı sıra çok sık lensler de kullanılmaktadır.

Lensler çoğu kez hafif, sağlam ve ince camlardan veya plastiklerden imal edilirler. Konveks, bikonveks, parabolik lenslere ilaveten ağırlığı azaltmak için Fresnel lensleri kullanılır. Şekil 3.18 de (a) Bikonveks lens, (b) Bikonveks Fresnel lens, (c) Halkalı Fresnel merceğinin kesilişi, (d) Deniz fenerlerinde kullanılan kuşaklı Fresnel merceğidir [17].

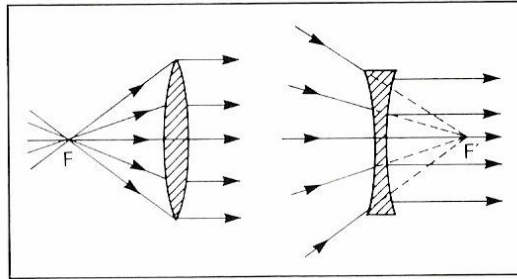


Şekil 3.18 : Lens çeşitleri.

Lensler genelde havadan cama ve camdan havaya iki içbükey yüzeyde kırılma veya bir içbükey bir düz kırılma içerirler. Küresel yüzeylerin eğiminin merkezlerini birleştiren çizgi, temel aks olarak adlandırılır. Şekil 3.19’da soldaki resim konveks lens üzerinde ışın paralellerini birincil ekseninde göstermektedir. Işınlar yansımadan sonra F' noktasında birleşir. F' noktası birincil odak olarak adlandırılır. Şekil 3.19 sağdaki resim konkav lensle uyuşan durumu gösterir. Birincil odak burada geçerli değildir. PF uzunluğuna, lensin fokal uzaklığı denir. Şekil 3.20’de soldaki resim bir miktar ışığın F noktasından lensin eksenine kırılmasını gösterir. Böylece paralel ışınlar oluşur. Bu F noktası başka bir birincil odaktır. Konkav lens durumunda ise F birincil odak, Şekil 3.20’de sağdaki resimdeki gibi kaynaktan uzakta merceğin yanındadır [11].



Şekil 3.19 : Paralel ışık ışını solda konveks ya da birleşen, sağda konkav ya da dağılan lens şeklinde yansır.

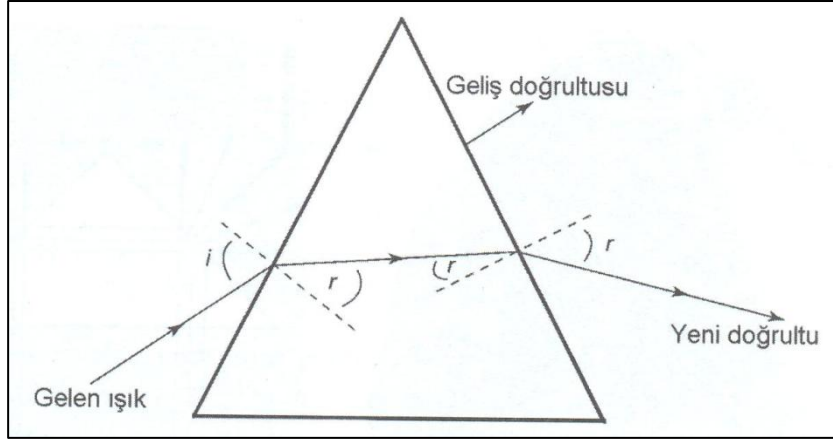


Şekil 3.20 : Solda dağılan ışık ışınının konveks lensten, sağda birleşen ışık ışınının konkav lensten yansıması gösterilmiştir.

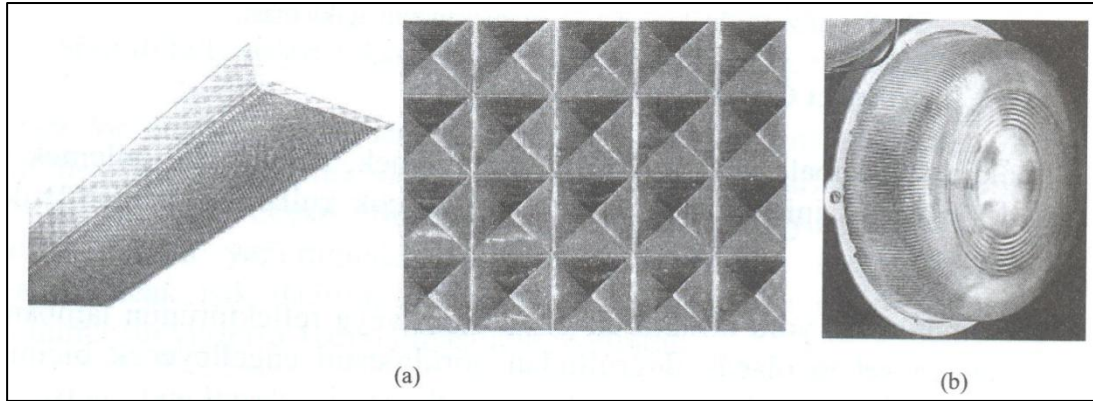
3.2.3.2 Prizmalar (Işık Kırıcılar)

Işın kırıcı elemanlar ortam değişikliğinde ışığı kırdıklarından, havadan daha yoğun bir ortama normale doğru giren ışık, çıkarken normalden uzaklaşacak şekilde kırılır. Bu durum Şekil 3.21’de gösterilmiştir. Işık kırılmaya ilaveten girişte de çıkışta da yansır [17].

Prizmalar aydınlatmada tek başlarına pek kullanılmazlar. Daha ziyade saydam plastik ve düz camın ışığın çıktığı tarafında bulunan binlerce koni, piramit veya çizgisel prizmacık ışığı çeşitli doğrultularda kırarlar ve yansımaların da katkısı ile bir dağıtıcılık elde edilir. Şekil 3.22’de bu durum gösterilmiştir [17].

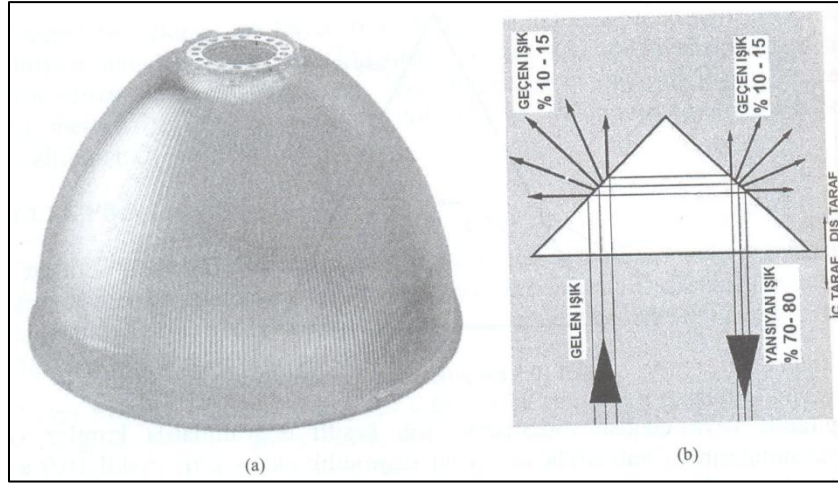


Şekil 3.21 : Bir prizmada ışığın kırılışları.



Şekil 3.22 : (a) Plastik prizmatik dağıtıcı ve levha altının ayrıntılı fotoğrafı, (b) camın dış tarafındaki çizgisel prizmacıklar.

Işık geçiren bir malzemenin dış tarafındaki çizgisel prizmacıkların uygun boyutlandırılması ile büyük oranda (%70-80) yansıtıcılık ve aynı zamanda %20-30 oranında da dağıtıcı geçirgenlik elde edilir (Şekil 3.23). Böylece aydınlatma ve estetik bakımdan güzel bir etki sağlayan, yansıtıcı opal cam özelliği çok daha az maliyet ile sağlanır. Bu amaç ile uygulamada akrilik ve polikarbonat malzemeler kullanılmaktadır. Optik açıdan düz veya mat cam da kullanılabilir, ama ağır ve kırılğan olduklarından tercih edilmemektedirler [17].



Şekil 3.23 : (a) Dışında çizgisel prizmacıklar bulunan akrilikten yapılmış bir yansıtıcı, (b) bir prizmacıktaki yansıma ve geçirmenin açıklanması.

3.2.4 Difüzörler (Dağıtıcılar)

Yarı saydam dağıtıcı, lambadan yayılan ışığı her yöne saçar ve böylece kamaşmayı tüm görüş açılarında azaltır. Dağıtıcılar genelde içinde enkandesen lamba bulunan aydınlatmalar için opal camdan ve flüoresan olanlar için de yarı saydam plastikten (yaygın olarak polistiren veya akrilik) yapılmaktadır. Bir başka dağıtıcı malzeme, narin dokusu nedeniyle bazen dekoratif aydınlatmalarda kullanılan, parşömandır. Aydınlatma armatüründe dağıtıcı yüzey olarak kullanılacak malzemenin yüksek miktarda ışık emilmesi ile yüksek derecede ışık dağılımı özelliği gösteren bir malzeme olması son derecede önemlidir. İyi bir dağıtıcıda bile, lamba ile yüzey arasında belli bir mesafe olmalıdır. Aksi halde aşırı ısınma nedeniyle rengini bile kaybedebilir. Bu da optik kayıplara neden olur [11].

3.2.5 Optik Işık Kontrolünde Kullanılan Malzemeler

Aydınlatma armatürlerinde en yaygın kullanılan malzemeler cam, plastik ve metallerdir. Bu malzemelerden bazıları kısaca aşağıda açıklanmaktadır. Ancak kesin uygulamalar için malzeme imalatçısının verilerine başvurulması gerekmektedir [11].

3.2.5.1 Cam

Cam kristalleşmeden katı duruma gelmiş organik olmayan bir üründür. Kimyasal olarak camlar silikon, bor, alüminyum, kurşun, sodyum, magnezyum, kalsiyum ve potasyum gibi oksitlerin karışımıdır.

Camların kimyasal ve fiziksel özellikleri, renk, kırılma endeksi, ısı genişleme, sertlik, paslanma direnci, dielektrik güç ve elastiklik, değişen kompozisyon, ısı işlemine tabi tutma ve yüzey cilası ile elde edilir. Camlar karakteristik özellikleri bakımından çeşitli gruplara ayrılabilir.

Soda-Kireç

Soda-kireç camlar pencerelerde, akkor telli lambalarda, lens örtülerinde ve kapak camlarında (temperlenmiş) kullanılır. Soda-kireç camlar ısıtıldıkları zaman kolay şekilde biçimlenirler ve genelde yüksek ısı, direnç veya kimyasal kararlılık gerektirmeyen durumlarda kullanılırlar.

Kurşun-Alkali

Kurşun-alkali camlar (veya kurşun camlar) flüoresan ve diğer deşarj lambalarında, neon tüpü ve optik malzemeler için kullanılırlar. Oluşturulmaları kolay olan bu camların elektriksel dayanıklılıkları ve kırılma endeksleri yüksektir. Ancak şekillendiklerinde yüksek ısıya veya ani ısı değişikliklerine dayanamazlar. Ultraviyole ışınlar da bu tip camlar tarafından emilir.

Borsilikat

Borsilikat camlar, yüksek kimyasal kararlılık, yüksek ısı direnci ve mükemmel elektriksel dayanıklılıklarından dolayı dağıtıcılar, yansıtıcılar ve kapalı ışın lamba parçalarında kullanılırlar. Soda kireç veya kurşun-alkali camlardan daha yüksek ısılarda (yaklaşık 230 °C) kullanılabilirler. Fakat imalatları zordur. Ultraviyole ışınlar ise bu camlar tarafından iletilir.

Alüminosilikat

Alüminosilikat camlar yüksek ısı direnç gereken yerlerde kullanılırlar. İyi kimyasal kararlılığa, yüksek elektriksel dirence ve yüksek ısılarda kullanıma olanak veren özelliğe sahiptirler (yaklaşık 400° C).

%96 Silika

%96 silika camlar yüksek çalışma ısısı gerektiğinde kullanılırlar. 800 ° C’de düzenli olarak kullanılabilirler. Yüksek kimyasal kararlılıkları, ultraviyole (UV) ve infrared (IR) ısımayı iyi aktarımları ve kuvvetli ısı dirençleri gibi üstünlükleri vardır. Bunlar soda-kireç ve borsilikat’tan daha pahalıdır ve imal edilmeleri daha zordur. Düşük ısı genişleme katsayısı nedeniyle, bu camlar temperlenemezler.

Camsı Silika

Camsı silika esas itibariyle SiO₂'den oluşmuş bir camdır. Yüksek ısıda çalışma ve mükemmel kimyasal kararlılık gereken lambalar ve ark tüpleri için kullanılırlar. Isıl şoklara karşı dirençleri yüksektir. UV'yi yüksek aktarım ve mükemmel elektrik özellikleri vardır. Ancak, düşük ısıl genişleme katsayısı nedeniyle temperlenemezler. İmalat metoduna göre, bu cam fitilli silika, sentetik fitilli silika veya fitilli kuartz olarak bilinir.

Camların İşlevleri: Aydınlatmada cam işlevleri aşağıdaki genel kategorilere ayrılabilirler:

- ✓ Işık ve diğer ışıma enerjisi kontrolü,
- ✓ Işık kaynağının korunması,
- ✓ Güvenlik,
- ✓ Dekorasyon.

3.2.5.2 Plastikler

Plastikler, yüksek moleküler ağırlıklı ısı ve basınç uygulamasıyla değişen organik bileşenlerdir. Plastikler genel olarak termoplastik veya termoset olarak sınıflandırılabilirler. Termoplastikler bir kere üretildikten sonra, normal koşullarda biçimlendirilebilirler. Çünkü bu işlemler sırasında kimyasal değişiklik meydana gelmez. Termoset reçineleri ise, kimyasal yapıları değiştirildiği için bir kez ısıtılıp oluşturulduktan sonra yumuşatılamaz ve yeniden biçimlendirilemezler. Önemli termoplastikler akrilonitril bütadien stirendirler (ABS), akrilikler, selülozikler, asetaller, flüorokarbonlar, naylonlar, polietilenler ve vinillerdir. Termoset grubunda ise reçine epoksiller, melaminler, fenolikler, polyesterler, üreler ve silikonlar örnek olarak gösterilebilir.

Arttırılmış ısı direnci, güç, dayanıklılık, elektriksel özellikler ve kimyasal direnç elde etmek için plastiklere dolgu malzemeleri ve güçlendirici elemanlar ilave edilir. Bu ilaveler plastiklerin şekillendirilebilirlik özelliğine sahip olmasını da sağlarlar. Üretimde kullanılan bazı dolgu malzemeleri, alüminyum tozu, asbest, kalsiyum karbonat, çamur, pamuklu elyaf, lifli cam grafit, naylon, pudralanmış metaller ve ahşap tozudur. Günümüzün plastiklerinin üretildikleri temel bileşenler hava, su, doğal gaz, petrol, kömür ve tuz, biokütle ve ahşap elyafı gibi kaynaklardan elde

edilirler. Gereken kimyasallar geniş kapalı kaplarda kontrollü ısı ve basınç altında katalizörlerin yardımıyla reaksiyona tabi tutulurlar. Sonuçta ortaya çıkan katı ürün daha sonra parçacık boyutu azaltılması; dolgu malzemelerinin ilavesi, yumuşatıcılar ve değiştiriciler, granüller, topraklar ve tabaka şekline döndürmek gibi daha ileri işlemlere tabi tutulurlar.

3.2.5.3 Metaller

Çelik

Aydınlatma armatürü imalatında, çelik, yapısal kapasiteye hizmet eder. Değişik şekillerde birçok çelik levha tipleri mevcuttur. Aydınlatma donanımında kullanılan çelik, levha şeklinde olmak üzere üç temel tiptedir; sıcak çekilmiş çelik, soğuk çekilmiş çelik ve porselen emaye levhalar. Sıcak çekilmiş çelik, yüksek ısılarda çekilme nedeniyle oksit bir kaplama taşımaktadır (hadde tortusu). Düzgün bir görüntü elde etmek için kullanılır. Tortu asit banyosunda çıkartılabilir fakat bu durumda yüzey sert olmaktadır. Soğuk çekilmiş çelikler kaygan görüntüsü nedeniyle kullanılırlar. Sıcak çekilmiş çeliğe nazaran daha ince malzemelerde kullanılabilirler. Porselen emaye levhaları, porselen kaplama altında hadde tortusunu önlemek amacıyla kullanılırlar ve düşük karbon içeriğine sahiptirler. Kaplama yüzeyi tipleri galvanizli levha, önceden boyanmış levha, alüminyum geçirilmiş levha ve plastik kaplamalı levha olabilir. Önceden kaplanmış levhalar da mevcuttur ve bu kaplamalar krom, pirinç ve bakır içerirler.

Alüminyum

Alüminyum içinde demir olmayan, korozyon dirençli, hafif, manyetik olmayan, iyi ısı ve elektriksel iletkenliği olan bir metaldir. Alüminyum oksitteki görünmeyen koruyucu kaplama nedeniyle hava veya su tarafından tahrip edilemezler.

i. Aydınlatmada kullanım alanları:

Genellikle, mekanik parçalarda, reflektörlerde (yansıtıcılarda), louvre (petek)'lerde ve dekoratif yüzeylerde kullanılır. Alüminyum cam ve plastik üzerine buharlaştırıldığı zaman yansıtıcı bir yüzey olarak, ince pudra formunda ve boya olarak da kullanılır. Alüminyum reflektörler yüksek devamlılık, yüksek yansıtıcılık oranına sahip olabilir.

ii. Alüminyum Tipleri:

Alüminyum saf durumda kullanılabilir. Mekanik, fiziksel ve kimyasal özelliklerini iyileştirmek için başka elementlerin ilavesiyle alaşımlanabilir. Silikon, demir, bakır, manganez, magnezyum, krom, nikel ve çinko kullanılan en yaygın malzemelerdir. Alüminyum alaşımlar dökme, çekme ve levha şeklinde haddelenmiş olabilirler. Levha formunda, alüminyum muhtelif alaşım ve cilalarda mevcuttur.

iii. Kaplama yüzeyi:

Alüminyum asitle yakılabilir, cilalanabilir, fırçalanabilir, kaplanabilir, anotlama yapılabilir, parlatılabilir, buharlaştırmalı veya buharlaştırmaz plastik kaplanabilir, şeffaf veya boya lakeleri ile kaplanabilir, pişirilmiş veya porselen emaye ile bu kaplama yüzeyin bir karışımı oluşturulabilir. Yansıtıcı kaplama yüzeyi emaye, asitle cilalanmış veya anotlanmış şekilde elde edilebilirler. Alüminyum boya, birçok yüzey için pratik bir bitiş yüzeyi olarak geniş kullanım alanı bulmuştur. Bozukluklar ve alaşım malzemeler daha düşük yansıma oranı, bulutluluk, donukluk veya oksit yüzeyin yol yol olması ile sonuçlanır.

Diğer Metaller

a) Paslanmaz Çelik

Paslanmaz çelik içinde kendisini korozyona dayanıklı hale getiren krom içeren, demir bazlı alaşımlar içermektedir. ‘Paslanmaz’ sınıflandırması genelde %12 ila %30 krom kapsayan çelikler için yapılmaktadır. Krom oranı % 30’dan fazla olanlar paslanmaz olarak değil ısıya dayanıklı alaşım olarak sınıflandırılmıştır. Paslanmaz çelik, düz krom, krom-nikel ve krom-nikel-manganez olmak üzere üç ana gruba ayrılabilir.

Düz krom çeliklerin hepsi manyetiktir. Korozi atmosferlerle karşılaşınca paslanırlar. Ancak paslanma sadece yüzeysel bir tabakadır ileri paslanmaya engel olur. Krom-nikel paslanmazlar korozyonlu atmosferlerde kullanışlı olmayabilirler. Krom-Nikel-Manganez çelikler manyetik değildir. Bu grupta, manganez nikelin bir kısmı yerine kullanılır. Bu çelikler paslanmazdır, ama bazı korozyonlu atmosferlerde kullanışlı olmayabilirler. Paslanmaz çelikler dış aydınlatma armatürlerinde kullanılırlar.

b) Bakır

Bakır malzeme, baralar ve elektrik enerjisinin kontrolü ve dağıtımı için gerekli anahtar malzemelerinde kullanılır. Bakır iletken, biçimlenebilir, esnektir ve oldukça güçlüdür.

c) Demir içerikli olmayan alaşımlar

Bronz, bakır ve kalay alaşımı veya pirinç ve çinko alaşımı olarak özel aydınlatma armatürlerinde kullanılırlar. Bronz ve pirinç tuzlu suyun korozyonuna karşı dirençli olduğu için denizcilik alanında kullanılır. Krom-bakır ve beril-bakır iletim yaylarında, kontaklarda, ve benzer şekilde yüksek basınç altında kalan ve imalatla şekillenmesi gereken malzemelerde sıkça kullanılırlar. Parçalar yumuşak olarak biçimlendirilir ve ısı uygulamasıyla sertleştirilirler.

3.2.5.4 Aydınlatmada Kullanılan Kaplama Yüzeyi

Bitiş yüzeyleri, imalat aşamasındaki malzemeyi, kullanıma hazır hale getirmek için yapılan son işlemdir. Aydınlatma donanımında üç temel amaç vardır. Bunlar; ışığın kontrolü, malzemenin korunması ve görüntünün iyileştirilmesidir. Kaplama yüzeyi uygulama yöntemi ve uygulanan metale göre sınıflandırılır. Kaplamalar, laminantlar ve kimyasal dönüşüm bitiş yüzeyleri olmak üzere üç temel tip kaplama yüzeyi vardır. Kaplamalar ayrıca organik, seramik, metalik ve diğer olarak dört genel sınıfa ayrılabilirler.

Kaplamalar

a) Organik Kaplamalar

Lakeler; berrak, şeffaf veya opak ve oda ısısına hızla uyum sağlarlar. Dekorasyon veya koruma için kullanılabilirler. Mineler pigmentlendirilmiş kaplamalardır ve koruma, dekorasyon veya yansıma için kullanılırlar. Pişirilmiş saydam kaplamalar, bazen pişirme lakeleri olarak adlandırılırlar, dekorasyon ve koruma için kullanılırlar. Polimerizasyonu iyileştirirler. Organisoller ve plastisoller genelde batırma ve spreyleme ile uygulanırlar. Plastik dağılım kaplamaları iyi dış korozyon aşınma ve çizilme direnci sağlar ve birçok yüzey bozukluklarını gizleme olanağı vardır.

b) Seramik Kaplamalar

Seramik kaplamalar, porselen emayeler dahil cam ve metaller üzerinde 540 °C üzerindeki sıcaklıklarda kullanılırlar. Metaller üzerinde korozyona karşı yüksek direnç, iyi yansıtma ve kolay bakım sağlar, cam üzerinde parlaklığın azalmasına ve dağılımının artmasına neden olurlar.

c) Metal Kaplama

Elektrokimyasal tortu, genel olarak elektro kaplama olarak adlandırılır ve bir metalin üzerine ikinci bir metalin elektrolitik aksiyon ile yerleşmesini sağlar. Çinko kadmiyum veya nikel koruma sağlamak için kullanılmıştır. Pirinç ve gümüş kaplama yüzeyin en önemli özelliği dekoratif olmalarıdır. Vakum metalleştirme bir metali, genellikle alüminyum, vakum odasında buharlaştırmak ve plastik, cam veya metal yüzeylere kaplamakta kullanılır. Yüksek yansıma oranında kaplama yüzeyi elde edilir ve ışık kontrolü veya dekoratif amaçlarla kullanılabilirler. Daldırma ve sprey kaplamalar ise, galvanizlemede olduğu gibi, alttaki metali korozyondan korumak için ikinci bir metalin yerleştirilmesi ile oluşturulur.

d) Diğer Kaplamalar

Yarı iletkenler, silikon, germanyum, magnezyum flüorit ve titanyum dioksit gibi inorganik dielektrikler; cam, alüminyum ve plastikler gibi maddeler üzerine vakum ile yerleştirilirler. Bu kaplamaların aydınlatma armatürü amaçlı kullanımları 1 µm'den daha ince çok katlı olarak olabilmektedir.

Laminantlar

Bu türde kaplama yüzeyi ince bir tabakayı temel malzemeye ekleyerek yaratılır (plastik bir tabakayı metal levhaya gibi). Laminant hem dekoratif hem de ışığı kontrol eden bir malzeme olabilir.

Kimyasal Dönüşüm Kaplama Yüzeyi

Anotlama, alüminyum bir yüzeyi anodik süreçle korozyon ve aşınmaya karşı alüminyum okside dönüştürür. Sonuçtaki kaplama yüzeyi saydam olabilir veya çeşitli renklere boyanabilir.

4. ENDÜSTRİYEL TESİSLER İÇİN LED IŞIK KAYNAKLI ARMATÜR OPTİK TASARIM HESAPLARI

Bu bölümde, karşılaştırma için baz alınan metal halojen ve flüoresan lambalı armatürlerin bilgileri verilerek, LED ışık kaynaklı armatürlerin optik tasarımları yapılmıştır. Daha sonra endüstriyel tesislerde yükseklikleri 6, 8, 10 ve 12 m olarak değişen 16 m x 40 m bir alan için gerekli aydınlatma kriterlerini sağlama koşulu ile, metal halojen ve flüoresan lambalı baz armatürler ve tasarlanan LED ışık kaynaklı armatürler enerji verimliliği açısından karşılaştırılmıştır.

4.1 Baz Alınan Geleneksel Yüksek Tavan Endüstriyel Armatürleri

Geleneksel armatür olarak yüksek tavanlı endüstriyel tesislerde sıklıkla kullanılan 150W ve 250W seramik deşarj tüplü metal halojen lambalı armatürler ile 2x58W ve 4x58W T8 tip flüoresan lambalı armatürler karşılaştırmalarda baz alınmıştır. Çalışma kapsamında baz armatür olarak seçilen armatürlerin grubundaki en verimli armatürler olmasına özen gösterilmiştir. Olası tasarruf oranının kullanımdaki en iyi armatüre göre hesaplanması amaçlanmıştır.

4.1.1 Metal Halojen Işık Kaynaklı Armatürler

Karşılaştırma yapmak için seçilen metal halojen lambalı armatür Philips firmasının Performalux serisi armatürüdür. Bu seriye ait hem 150W metal halojen hem de 250W metal halojen lambalı armatürler için dar, orta ve geniş ışık hüzme açısına sahip tipler seçilmiş ve bu armatürlerin fotometrik verileri ile aydınlatma tasarım hesapları yapılmıştır. Bu seriye örnek bir armatür Şekil 4.1’de gösterilmiştir [18].

150W ve 250W metal halojen lamba içeren bu armatürlerin şebekeden çektikleri güç değerleri balast kayıpları (~%10) ile birlikte 165W ve 275W’dır.

Tasarımda kullanılan seramik deşarj tüplü metal halojen lambaların renk sıcaklığı 2800 °K ’dir. Normal koşullarda bu renk sıcaklığı endüstriyel tesislerde özellikle gece vardiyalarında motivasyon açısından önerilmemekle birlikte bu renk

sıcaklığında ışık akısı değeri diğer renk sıcaklıklarındaki lambalara göre daha yüksek olduğu için, bu çalışmada 2800 °K renk sıcaklığına sahip metal halojen lambalar seçilmiştir. Diğer yandan yeni tasarlanan LED armatürlerde tasarım hedefi olarak renk sıcaklığı 4500 °K olarak kabul edilmiştir. 150W metal halojen lamba için renksel geriverim 85, 250W metal halojen lamba için ise 82'dir [18].

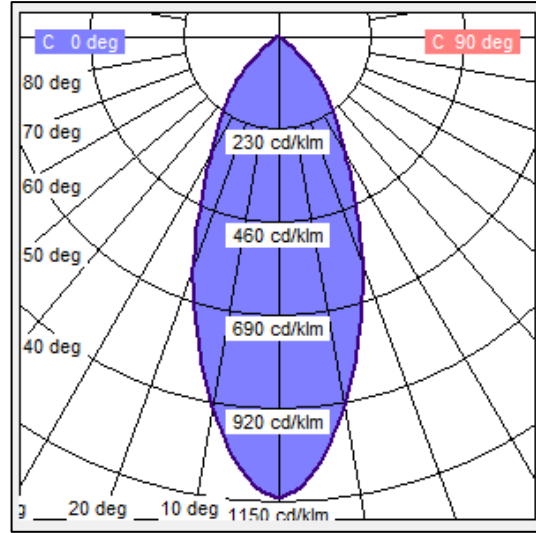


Şekil 4.1 : Philips Performalux endüstriyel tip armatürü.

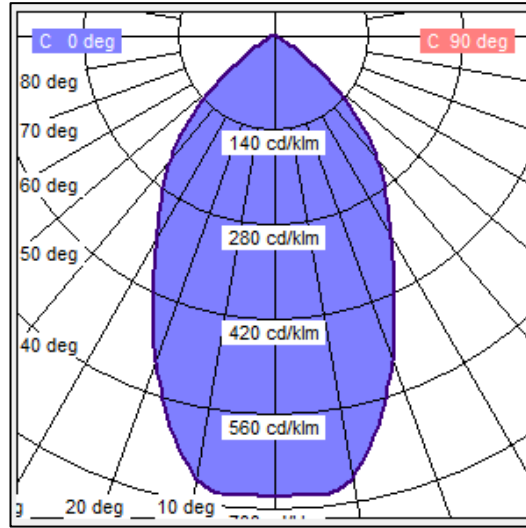
Armatürlerde kullanılan optik malzeme, alüminyum reflektör olup, armatürün ön kapak kısmı cam'dır. Endüstriyel tesislerin kirlenme faktörü yüksek olduğu için armatürlerin koruma sınıfı IP65 olarak seçilmiştir. Armatürlerin ışık çıktı oranı (verimi) %80'dir.

150W ve 250W metal halojen lambalı, dar, orta ve geniş açılı armatürlerin ışık dağılım eğrileri Şekil 4.2, 4.3 ve 4.4'de gösterilmiştir. Işık dağılım eğrileri her iki güç değeri için aynı olduğundan, sadece biri için gösterim yapılmıştır [18].

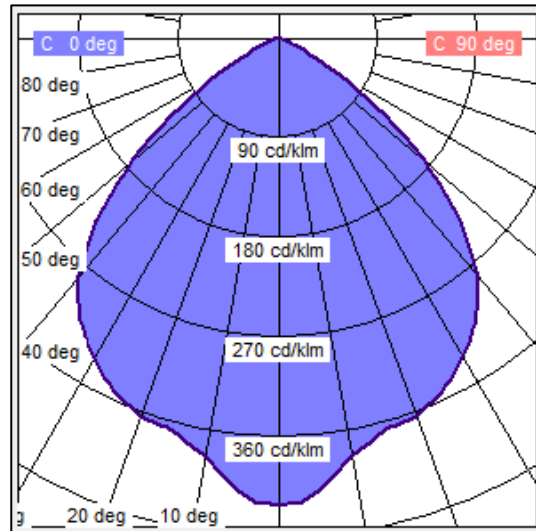
Çalışmada 150MHd; 150 W metal halojen lambalı ve dar ışık dağılım eğrisine sahip armatürü, 150MHo; 150 W metal halojen lambalı ve orta ışık dağılım eğrisine sahip armatürü, 150MHg; 150 W metal halojen lambalı ve geniş ışık dağılım eğrisine sahip armatürü, 250MHd; 250 W metal halojen lambalı ve dar ışık dağılım eğrisine sahip armatürü, 250MHo; 250 W metal halojen lambalı ve orta ışık dağılım eğrisine sahip armatürü, 250MHg; 250 W metal halojen lambalı ve geniş ışık dağılım eğrisine sahip armatürü belirtmektedir.



Şekil 4.2 : Performalux dar açılı armatür ışık dağılım eğrisi.



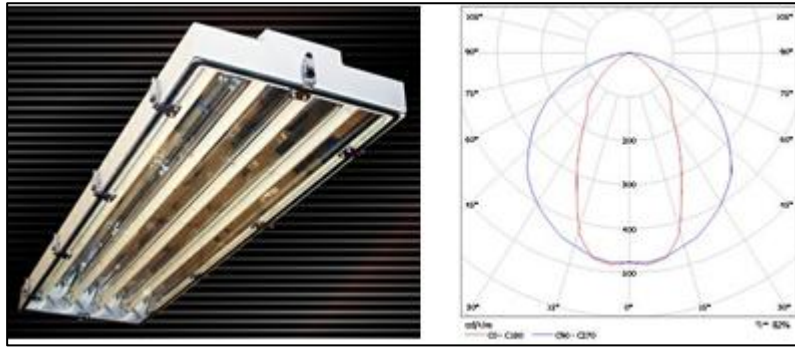
Şekil 4.3 : Performalux orta açılı armatür ışık dağılım eğrisi.



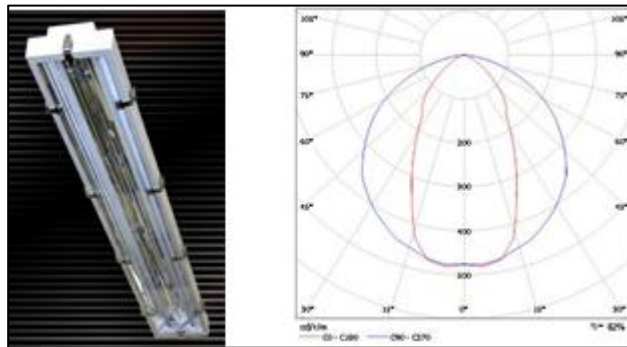
Şekil 4.4 : Performalux geniş açılı armatür ışık dağılım eğrisi.

4.1.2 Flüoresan Işık Kaynaklı Armatürler

Karşılaştırma yapmak için seçilen flüoresan lambalı armatür EAE firmasının Revo Arena serisi armatürleridir. Bu seriden 2x58W ve 4x58W T8 tip flüoresan lambalı armatürler seçilmiş ve tasarım hesaplarında kullanılmıştır. Bu seriye ait kullanılan armatürler ve ışık dağılımları Şekil 4.5 ve 4.6’da gösterilmiştir [19].



Şekil 4.5 : EAE 4x58W T8 flüoresan lambalı armatür ve ışık dağılım eğrisi.



Şekil 4.6 : EAE 2x58W T8 flüoresan lambalı armatür ve ışık dağılım eğrisi.

2x58W ve 4x58W flüoresan lamba içeren bu armatürlerin şebekeden çektikleri güç değerleri balast kayıpları (CELMA Ballast Guide - A2 tip elektronik balast) ile birlikte 110W ve 220W, armatürlerde kullanılan lambaların toplam ışık akısı değerleri ise 10400 lm ve 20800 lm'dir.

Tasarımda kullanılan flüoresan lambaların renk sıcaklığı 4000 K° ve renksel geriverimleri de 85’dir.

Diğer örnekte olduğu gibi armatürlerin koruma sınıfı yine IP65 olarak seçilmiştir. Armatürlerin ışık çıktı oranları (verimi) 2x58W flüoresan lambalı armatür için %82,1 iken 4x58W flüoresan lambalı armatür için %82,5'dir.

4.2 LED Işıık Kaynaklı Armatür Optik Tasarımı

Optik tasarım armatür tasarım süreçlerinin en kritik ve en önemli aşamalarından biridir. İyi tasarlanmış bir optik tasarım ile ışık kaynağından çıkan ışınların kontrolü iyi bir şekilde yapılabilir. LED ışık kaynaklı armatürlerin optik tasarımında ışık kontrolü amaçlı mini-reflektörler ya da lensler çok sık kullanılmaktadır. Lensler, ışığa yön verme amaçlı daha etkin çözümler sunar ve armatüre monte edilmeleri daha kolaydır. Fakat çoğu zaman verimleri düşüktür. LED'ler için kullanılan yansıtma faktörü yüksek mini-reflektörlerin ise verimleri daha yüksektir ve üretimleri de daha kolaydır. Diğer yandan LED'lerin boyutlarına uygun çok küçük ebatlarda üretimlerinde bazı zorluklar da söz konusudur.

Armatürlerin optik tasarımında kullanılan birçok yazılım mevcuttur. Bu yazılımların bazıları malzemelerin 3 boyutlu çizimlerinin yapılabilmesi için başka bir yazılımı kullanırken, bazıları da kendi içerisinde bu çözümü sunmaktadır. Bunlara örnek olarak Optis, SPEOS, ASAP, Photopia, APEX, Lucidshape, Lighttools gibi yazılımlar verilebilir.

Çalışma kapsamında kullanılan yazılım SPEOS'dur. SPEOS, 3 Boyutlu çizimler için kullanılan ProEngineer yazılımı için Optis firması tarafından geliştirilmiş optik değerlendirmeler yapan bir eklentidir. Aynı firmanın diğer bir ürünü olan Optis ise Solidworks yazılımı için geliştirilmiştir.

Hedeflenen tasarımları yapabilmek için ilk olarak kullanılacak LED tipi ve sayısı belirlenmelidir. LED'lerin ışık akıları, şebekeden çektikleri güç, armatürün şebekeden çektiği toplam güç gibi değerler LED'lerin jonksiyon sıcaklığı ve armatürde kullanılan sürücü verimi ile değiştiğinden, sadece optik tasarıma yönelinen bu çalışmada ısı ve elektriksel verim makul bir değerde kabul edilerek optik tasarımlar gerçekleştirilmiştir. Gerçek koşullarda, ısı verimin optik tasarımdan sonra maksimuma çıkarılması ve optik tasarımın bu değerlere göre tekrar yapılması gerekmektedir. Diğer taraftan, sadece armatürün etkinlik faktörü değerini ve armatürün şebekeden çektiği güç değerini etkileyen sürücü verimi enerji verimliliği açısından önemlidir.

4.2.1 Tasarım Hedefleri ve Kriterleri

Çalışma kapsamında endüstriyel tesislerde sıklıkla kullanılan 150W ve 250W metal halojen lambalı armatürlerin ve 2x58W, 4x58W flüoresan lambalı armatürlerin LED ışık kaynaklı eşdeğerlerinin yapılması hedeflenmiştir.

150W ve 250W seramik deşarj tüplü metal halojen lambalar sırasıyla 13500 lm ve 22500 lm ışık akısı değerlerine, 2x58W ve 4x58W flüoresan lambalar ise sırasıyla toplamda 10400 ve 20800 lm ışık akısı değerlerine sahiptir. Fakat bu değerler armatürün ışık çıktı oranı (armatür verimi) ile azalacağından hedeflenen ışık akısı değeri armatürden çıkan ışık akısı değeri olacaktır. Baz alınan metal halojen lambalı armatürlerin verimleri %80, flüoresan lambalı armatürlerin verimleri ise %82 civarındadır. Bu bağlamda, tasarımlarda kullanılacak olan armatürler için hedef ışık akısı değerleri 12000 lm ve 20000 lm olarak seçilmiştir. Ayrıca, aydınlatma kriterlerinin sağlanması ve enerji verimli çözümlere ulaşabilmek için dar, orta ve geniş ışık hüzmeye açılı lensler kullanılmıştır.

Bu çalışma kapsamında, tasarımlarda kullanılan LED'lerin jonksiyon sıcaklığı 90°C, sürücü (elektriksel verim) verimi ise %90 olarak kabul edilerek tasarımlar yapılmıştır. Tasarım hedefleri ve kriterleri Çizelge 4.1'de baz olarak alınan geleneksel armatürler ve tasarlanacak LED armatürler için verilmiştir.

Çizelge 4.1 : Tasarlanacak LED armatürler için tasarım hedefleri ve kriterleri.

	2x58W T8 F. Armatür	4x58W T8 F. Armatür	150W M.H. Armatür	250W M.H. Armatür	A LED Armatür	B LED Armatür
Kullanım Alanı	Endüstri Yüksek Tavan	Endüstri Yüksek Tavan	Endüstri Yüksek Tavan	Endüstri Yüksek Tavan	Endüstri Yüksek Tavan	Endüstri Yüksek Tavan
Toplam Lamba Işık Akısı [lm]	10400	20800	13500	22500	>12000	>20000
Armatür Verimi (LOR)	82,10%	82,50%	80%	80%	>%82,5	>%82,5
Armatür Toplam Işık Akısı [lm]	8538	17160	10800	18000	12000	20000
Armatür Gücü [W]	110	220	165	275	<165	<275
Armatür Etkinlik Faktörü Değeri [lm/W]	77,6	78	65,5	65,5	>78	>78
Renk Sıcaklığı [°K]	4000	4000	2800	2800	4500	4500
Renkssel Geriverim (Ra)	85	85	85	82	80	80
IP Koruma Sınıfı	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65	IP65

4.2.2 Tasarımlarda Kullanılan Elemanlar

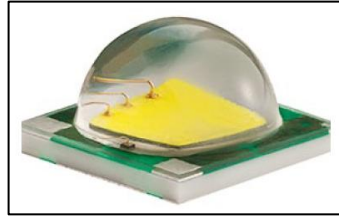
Bu bölümde tasarımda kullanılan LED'ler, lensler, PCB'ler, cam ve kasa özellikleri anlatılmıştır.

4.2.2.1 LED

LED ışık kaynaklı armatür tasarımında enerji verimli çözümler sunabilmek için yüksek etkinlik faktörü değerlerine sahip LED'lerin kullanılması gerekir.

Çalışma kapsamında yüksek etkinlik faktörü değerlerine sahip CREE firmasının XM-L T5 serisi LED'leri kullanılmıştır. Şekil 4.7'de CREE Xlamp XM-L LED örneği gösterilmiştir [20].

LED'lerin sürme akımı değeri ise tasarlanan armatür için 0,7A olarak kabul edilmiştir.



Şekil 4.7 : CREE Xlamp XM-L serisi LED.

LED'lerin katalog değerlerinde verilen ışık akısı değerleri 25 °C jonksiyon sıcaklık değerleri için laboratuvar koşullarında çok kısa sürede ölçülen değerlerdir. Normal koşullardaki kullanımlarda jonksiyon sıcaklığı 25 °C olmayacağı için katalogdan ısı tasarım için hedef jonksiyon sıcaklığı değerine bakılıp, bu değer için LED'in ışık akısı değeri alınıp tasarımlar bu değere göre yapılmalıdır.

CREE XML T5 serisi LED'ler 25°C jonksiyon sıcaklığı ve 0,7A sürme akımı için tek bir çip başına 260 lümen ışık akısına sahiptir. Bu durumda sürme gerilimi 2,9V, elektriksel gücü ise 2,03W'tır. Bireysel olarak LED'in etkinlik faktörü değeri bu sıcaklık değerinde 128,1 lümen/W'dır. Isıl tasarım hedefi olan 90°C jonksiyon sıcaklığı için sözkonusu değerler 222,8 lümen ışık akısı, 2,7V sürme gerilimi, 1,89W elektiksel güç olup, LED çipin etkinlik faktörü değeri 117,9 lümen/W'dır. Bu değerler Çizelge 4.2'de verilmiştir [20].

Çizelge 4.2'de görüldüğü üzere LED'in jonksiyon sıcaklığı arttıkça ışık akısı miktarında önemli bir azalma gözlemlenmektedir.

Çizelge 4.2 : CREE XM-L T5 serisi LED'in 0,7A sürme akımı için 25°C ve 90°C jonksiyon sıcaklıkları için değerleri.

CREE XM-L T5 Serisi LED (0,7A Sürme Akımı için)				
Jonksiyon Sıcaklığı	LED'in Işık Akısı [lm]	LED Sürme Gerilimi [V]	LED'in Elektriksel Gücü [W]	LED Etkinlik Faktörü[lm/W]
25°C	260	2,9	2,03	128,1
90°C	222,8	2,7	1,89	117,9

4.2.2.2 Lensler

Kullanılacak LED'in tasarım hedefinde belirlenen jonksiyon sıcaklığı tanımlandıktan sonra, hedef ışık akısına ulaşabilmek için optik tasarımda kullanılacak olan lenslerin verimleri üretici firmanın katalog değerlerinden alınır ve bu verimlere göre LED sayısı belirlenir. Ayrıca armatürün içerisindeki içsel yansıma, malzemelerin yutma etkisi gibi nedenlerden dolayı armatür ışık çıktı oranında da bir kayıp olacağından armatürün toplam optik verimi, optik açıdan kullanılan malzemelerin yansıtma, iletme ve yutma faktörlerine, kullanılan malzeme lens ise merceğin optik verimine bağlıdır. Ayrıca her lens belirli bir LED için tasarlandığından üretici firma kataloglarından kullanılacak olan LED'e uygun bir lens seçilmesi gerekir.

Tasarımlarda, ışığı lensler ile kontrol etmek, çeşitli yüksekliklerde farklı ışık dağılımları ile daha verimli sonuçlara ulaşmayı sağlar. Bu yüzden üç çeşit (dar, orta ve geniş açılı) lens 12000 ve 20000 lm ışık akısı hedefi için kullanılmıştır ve toplamda altı armatür tasarlanmıştır. Optik tasarımlarda kullanılacak olan üç çeşit lens ve bunların özellikleri Çizelge 4.3'de verilmiştir [21].

Çizelge 4.3 : Tasarımda kullanılacak lenslerin özellikleri.

Firma	LEDİL	LEDİL	LEDİL
Adı	Tina3 W	Tina3 WW	Tina3 WWW
	(Dar)	(Orta)	(Geniş)
Çap [mm]	16,1	16,1	16,1
Yükseklik [mm]	7,3	7,1	6,9
Optik Malzeme	PMMA	PMMA	PMMA
Işık Hüzme Açısı	37°	56°	71°
Verim	%92	%89	%88

Çizelge 4.3'den görüldüğü üzere dar, orta ve geniş açılara sahip üç lens de farklı ölçülere ve farklı optik verimlere sahiptir. Tasarım hedefleri belirlenirken bu verimler ve armatür içerisinde yansıma ve yutmalardan ötürü oluşacak kayıp göz önünde bulundurularak LED sayısı bu değerlere göre belirlenmelidir.

Çalışmada armatürün optik verimi tahmin edilirken lenslerin veriminin yanında gerçek ürünün ışık çıktı oranında içsel yansımalar, yutmalardan kaynaklı yaklaşık %5 kaybın olacağı düşünülmüş ve ek olarak optik verime %5 kayıp eklenerek tasarımlar gerçekleştirilmiştir.

4.2.2.3 PCB (Baskı Devre Kartı)

Devre elemanlarının montajı için bir yüzü bakır kaplı diğer yüzü yalıtkan malzemeden oluşan bir plaka kullanılır. Bakır kaplı yüzeyde çeşitli yöntemlerle devre elemanlarının bağlantı yolları çıkarılır ve elemanlar ayrılan yerlere lehimlenerek monte edilir. Bakır tabaka ile yalıtkan plaka kimyasal bir yapıştırıcı ile birleştirilmiş olarak imal edilir. Baskı devre olarak adlandırılan bu plaka devre elemanlarının hem fiziksel hem de elektriksel olarak birleştirilmesini sağlar. Genellikle LED ışık kaynaklı armatürlerde, baskı devre olarak ısıl özelliklerinin iyi ve ucuz olmalarından dolayı MCPCB'ler (alüminyum baskı devreler) kullanılır.

Şekil 4.8'de örnek bir MCPCB verilmiştir.

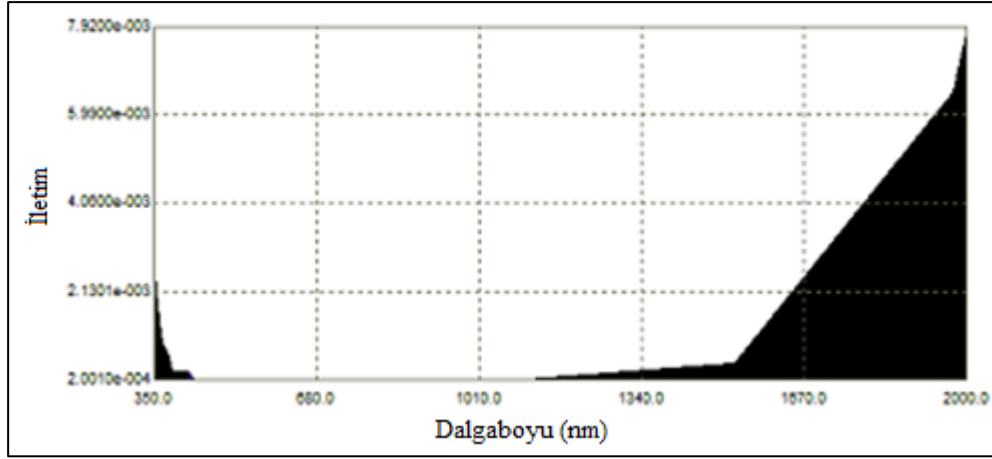


Şekil 4.8 : Örnek bir MCPCB.

4.2.2.4 Cam

Armatürün toz ve suya karşı belirli ölçülerde dayanıklı, dolayısıyla koruma sınıfının yüksek olması için ön kısmında BK7 (Clear Glass) şeffaf cam kullanılmıştır.

Işığın dalga boyuna göre kullanılan camın iletim özellikleri Şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9 : Schott BK7 camın yutma değişim grafiği.

4.2.2.5 Kasa

İç yüzeyi yüksek yansıtma faktörüne sahip dış yüzeyi ise bir soğutucu görevi üstlenen alüminyumdan yapılmış bir kasa kullanılmıştır. Kasanın iç yüzeyi yansıtıcı olarak kullanılmış ve kullanılan reflektörün yansıtma faktörü % 96 olarak seçilmiştir.

4.2.3.2 başlıklı bölümde çalışma kapsamında, LED ışık kaynaklı armatür tasarımlarında kullanılan kasaların boyutları ve şekilleri gösterilmiştir.

4.2.3 SPEOS Yazılımı ile Armatürlerin Optik Açından Tasarlanması

Bu bölümde tasarlanacak armatürlerde kullanılan LED sayısının belirlenmesi ve parçaların ProEngineer yazılımı ile çizilmesi ve optik özelliklerinin SPEOS yazılımı ile belirlenmesi anlatılmıştır.

4.2.3.1 LED Sayısının Belirlenmesi

İlk adım armatürün optik, ısı ve elektriksel kayıplarını hesaba katarak kullanılması gereken LED sayısını bulmaktır. Burada her bir lens için kullanılması gereken LED miktarı 0,7A sürme akımı için Çizelge 4.4 ve 4.5’de en az 12000 lümen ve 20000 lümen elde edilecek şekilde verilmiştir.

Buradaki hesaplar tekil LED çiplerinin 90°C jonksiyon sıcaklığındaki ışık akısı değerinden ve %90 sürücü (elektriksel) veriminden yola çıkılarak yapılmıştır.

Çizelge 4.4 : 12000 lümen hedeflenen armatür için üç farklı lens kullanılması durumunda gerekli LED sayıları.

Kullanılan Lens	Tina3 W (Dar)	Tina3 WW (Orta)	Tina3 WWW (Geniş)
Işık Hüzme Açısı	37°	56°	71°
Lens Verimi	%92	%89	%88
Armatür Işık Çıktı Oranı	%95	%95	%95
Jonksiyon Sıcaklığı [°C]	90°	90°	90°
Elektriksel Verim	%90	%90	%90
Tj 90 °C için LED'in Işık Aksı [lm]	222,8	222,8	222,8
Tj 90 °C ve 0,7A I _f için LED'in Gücü [W]	1,89	1,89	1,89
Kullanılması Gereken LED Sayısı	62	65	65
Armatür Toplam Işık Akısı [lm]	12073,1	12244,5	12107,0
Armatür Gücü [W]	130,2	136,5	136,5
Armatür Etkinlik Faktörü [lm/W]	92,7	89,7	88,7

Çizelge 4.5 : 20000 lümen hedeflenen armatür için üç farklı lens kullanılması durumunda gerekli LED sayıları.

Kullanılan Lens	Tina3 W (Dar)	Tina3 WW (Orta)	Tina3 WWW (Geniş)
Işık Hüzme Açısı	37°	56°	71°
Lens Verimi	%92	%89	%88
Armatür Işık Çıktı Oranı	%95	%95	%95
Jonksiyon Sıcaklığı [°C]	90°	90°	90°
Elektriksel Verim	%90	%90	%90
Tj 90 °C için LED'in Işık Aksı [lm]	222,8	222,8	222,8
Tj 90 °C ve 0,7A I _f için LED'in Gücü [W]	1,89	1,89	1,89
Kullanılması Gereken LED Sayısı	104	107	109
Armatür Toplam Işık Akısı [lm]	20251,6	20156,4	20302,4
Armatür Gücü [W]	218,4	224,7	228,9
Armatür Etkinlik Faktörü [lm/W]	92,7	89,7	88,7

Çizelge 4.4 ve 4.5’de belirlenen ve hesaplanan değerler tasarım için yeterli olan LED sayısını göstermektedir. Fakat gerçekleştirilecek armatürün baskı devresinde gerekli simetrinin sağlanabilmesi amacıyla LED sayıları düzeltilmiş ve farklı yapılarda tasarlanarak optik, ısı ve elektriksel özellikleri Çizelge 4.6 ve 4.7’de tekrar verilmiştir.

Çizelge 4.6 : 12000 lümen hedeflenen armatür için üç farklı lens kullanılması durumunda gereken düzeltilmiş LED sayıları.

Kullanılan Lens	Tina3 W (Dar)	Tina3 WW (Orta)	Tina3 WWW (Geniş)
Işık Hüzme Açısı	37°	56°	71°
Lens Verimi	%92	%89	%88
Armatür Işık Çıktı Oranı	%95	%95	%95
Jonksiyon Sıcaklığı [°C]	90°	90°	90°
Elektriksel Verim	%90	%90	%90
Tj 90 °C için LED'in Işık Akısı [lm]	222,8	222,8	222,8
Tj 90 °C ve 0,7A I _f için LED'in Gücü [W]	1,89	1,89	1,89
Kullanılması Gereken LED Sayısı	64	66	66
Armatür Toplam Işık Akısı [lm]	12462,5	12432,9	12293,2
Armatür Gücü [W]	134,4	138,6	138,6
Armatür Etkinlik Faktörü [lm/W]	92,7	89,7	88,7

Çizelge 4.7 : 20000 lümen hedeflenen armatür için üç farklı lens kullanılması durumunda gereken düzeltilmiş LED sayıları.

Kullanılan Lens	Tina3 W (Dar)	Tina3 WW (Orta)	Tina3 WWW (Geniş)
Işık Hüzme Açısı	37°	56°	71°
Lens Verimi	%92	%89	%88
Armatür Işık Çıktı Oranı	%95	%95	%95
Jonksiyon Sıcaklığı [°C]	90°	90°	90°
Elektriksel Verim	%90	%90	%90
Tj 90 °C için LED'in Işık Akısı [lm]	222,8	222,8	222,8
Tj 90 °C ve 0,7A I _f için LED'in Gücü [W]	1,89	1,89	1,89
Kullanılması Gereken LED Sayısı	105	108	110
Armatür Toplam Işık Akısı [lm]	20446,4	20344,8	20488,7
Armatür Gücü [W]	220,5	226,8	231
Armatür Etkinlik Faktörü [lm/W]	92,7	89,7	88,7

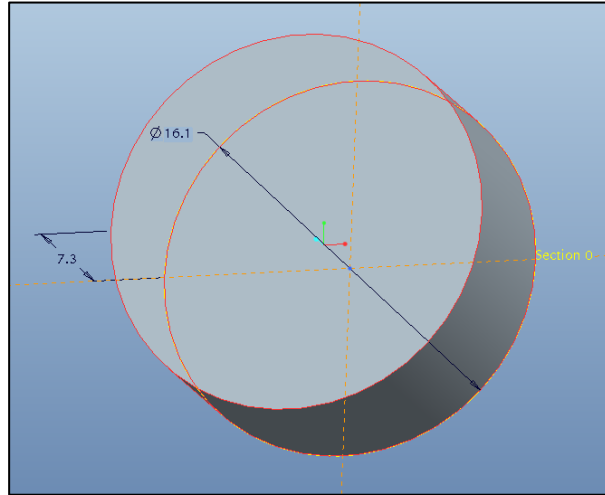
Bir sonraki aşamada, özellikleri belirlenen bu altı armatürün optik tasarımı SPEOS yazılımı ile yapılmıştır. Çalışmada kolaylık olması adına 12000 lümen ışık akısı hedefi için tasarlanan armatürlere “A” kodu, 20000 lümen ışık akısı hedeflenen armatürlere “B” kodu verilmiştir. Ayrıca armatürler ışık hüzme açılarına göre de A_{dar}, A_{orta}, A_{geniş}, B_{dar}, B_{orta} ve B_{geniş} olarak simgelenmiştir.

4.2.3.2 Armatür Elemanlarının Çizimi

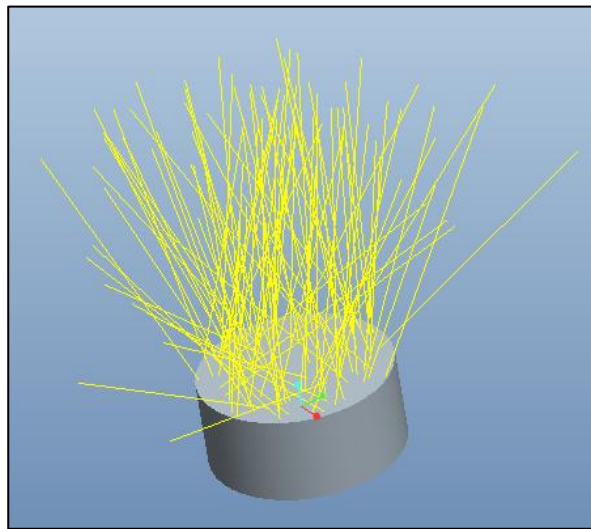
SPEOS, ProEngineer çizim programının altında çalıştığından öncelikle armatürün ışık dağılımını etkileyen tüm elemanlarının (PCB, kasa ve cam) bu yazılım yardımı ile çizilmesi gerekmektedir. Daha sonra SPEOS yazılımı ile çizilen tüm elemanların malzeme özellikleri tanımlanır ve çeşitli sensörler ile fotometrik değerlere ulaşılır.

a) Lenslerin Çizilmesi

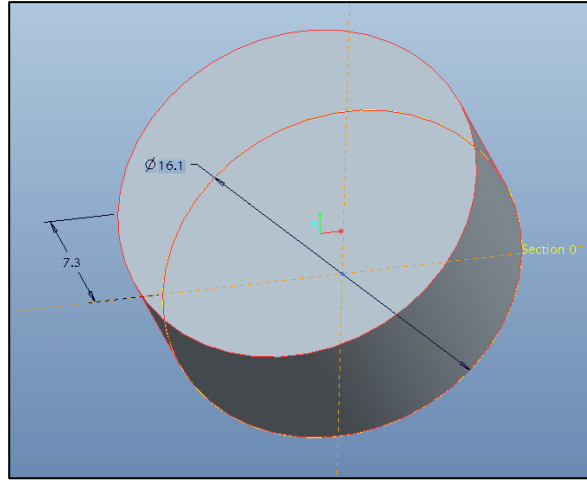
Çalışmada kullanılan lenslerin ışın dağılım dosyaları (.ies) üretici firmadan sağlanmıştır. Bu ışın dosyaları, merceğin içerisinde CREE XM-L T5 serisi LED olması durumundaki dağılımlar olduğundan, sadece lenslerin fiziki boyutlandırılması yapılmış ve lenslerin ön yüzlerine bu dosyalar atanmıştır. Şekil 4.10, 4.11, 4.12, 4.13, 4.14 ve 4.15’de kullanılan lensler ve ışık dağılımları gösterilmiştir.



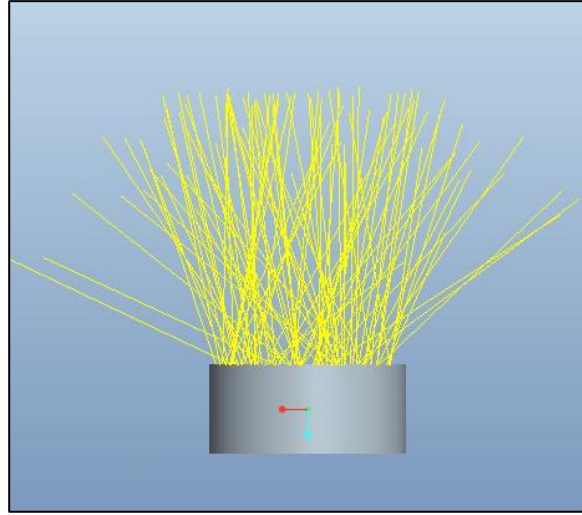
Şekil 4.10 : Tina3 W lens geometrik boyutları.



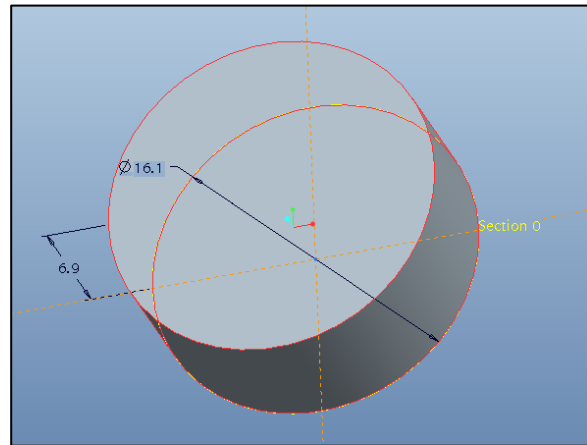
Şekil 4.11 : Tina3 W lens ışık dağılımı.



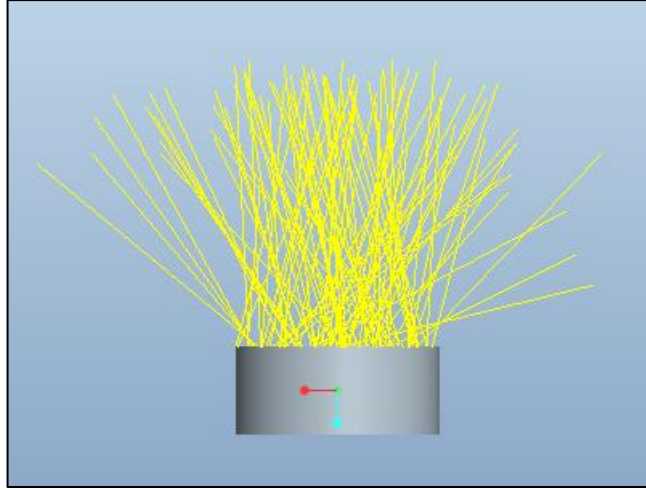
Şekil 4.12 : Tina3 WW lens geometrik boyutları.



Şekil 4.13 : Tina3 WW lens ışıık dağılımı.



Şekil 4.14 : Tina3 WWW lens geometrik boyutları.



Şekil 4.15 : Tina3 WWW lens ışık dağılımı.

b) Diğer Elemanların Çizilmesi

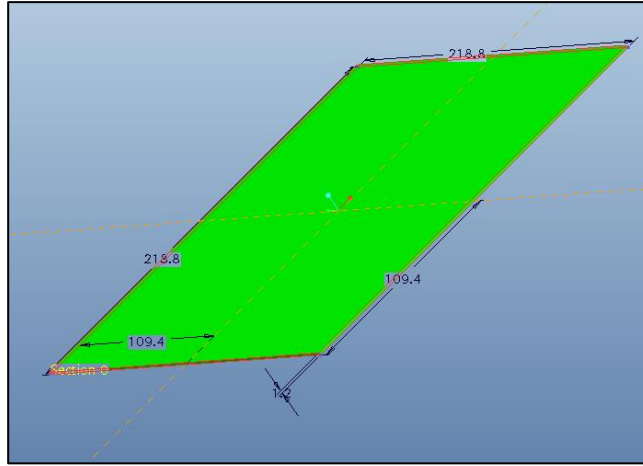
Bu kısımda PCB, cam ve kasa çizilmiş, bu elemanların optik özellikleri SPEOS yazılımında belirtilmiştir.

PCB'ler boyutlandırılırken lensler arası mesafe (bir lensin dış yüzeyinden diğer lensin dış yüzeyine) 10 mm ve lenslerin merkezlerinden PCB'nin kenarlarına olan uzaklık 16 mm olarak alınmıştır. PCB'lerin yükseklikleri 1,2 mm'dir ve kullanılan malzeme, alüminyum üst yüzeyi beyaz MCPCB'dir. Yansıtma faktörü, SPEOS optik yazılım programında %90 olarak alınmıştır.

MCPCB'ler tasarlanırken 64, 66, 105, 108 ve 110 LED sayıları kullanılırken LED'lerin adet olarak sırasıyla enine x boyuna dizilimleri 8x8, 6x11, 7x15, 9x12 ve 5x22'dir. LED dizilimleri ve MCPCB boyutları Çizelge 4.8'de gösterilmiştir. MCPCB tasarımları altı armatür için ayrı ayrı çizilmiş ve bir örneği Şekil 4.16'da verilmiştir.

Çizelge 4.8 : LED dizilimleri ve MCPCB boyutları.

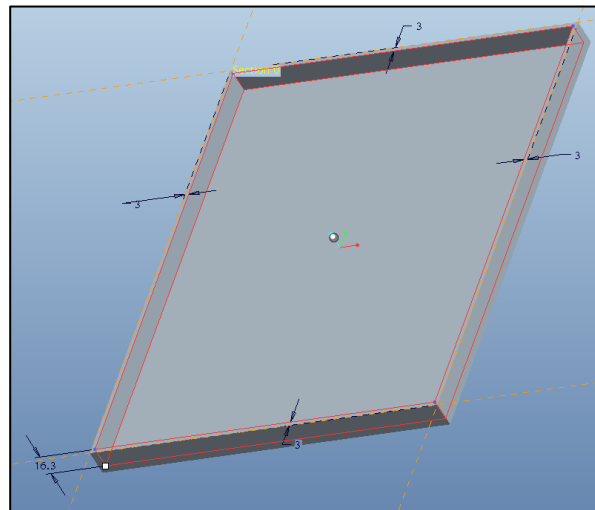
	LED Sayısı ve Dizilim (Enine x Boyuna) [Adet]	MCPCB Boyutları [mm]
Adar	64 (8x8)	218,8 x 218,8
Aorta	66 (6x11)	166,6 x 297,1
Ageniş	66 (6x11)	166,6 x 297,1
Bdar	105 (7x15)	192,7 x 401,5
Borta	108 (9x12)	244,9 x 323,2
Bgeniş	110 (5x22)	140,5 x 584,2



Şekil 4.16 : Örnek bir MCPCB tasarımı.

Kullanılan lensler CREE XM-L serisine ait olduğu ve lensin ışık çıkış dağılımı .ies dosyası olarak lensin içinde LED olduğu varsayımı ile oluşturulduğu için, tasarımlarda ayrıca LED tanımlanmamıştır.

Kasaların çiziminde et kalınlığı 3 mm olarak alınmış ve kasanın iç bölümünde (MCPCB'lerin yerleştirildiği yerde) MCPCB'nin dış kenar yüzeyleri ile kasanın iç yüzeyleri arasında hem eninde hem de boy kısmında 10 mm olacak şekilde boşluk bırakılmıştır. Ayrıca kasanın iç yüzeyinde lens ile cam arasında tüm tasarımlar için 5 mm boşluk bırakılmıştır. Kasanın iç yüzey yansıtıcılığı %96 olarak alınmıştır. Şekil 4.17'de örnek bir tasarım için kasanın şekli verilmiştir.



Şekil 4.17 : Örnek bir tasarım için kasa boyutları.

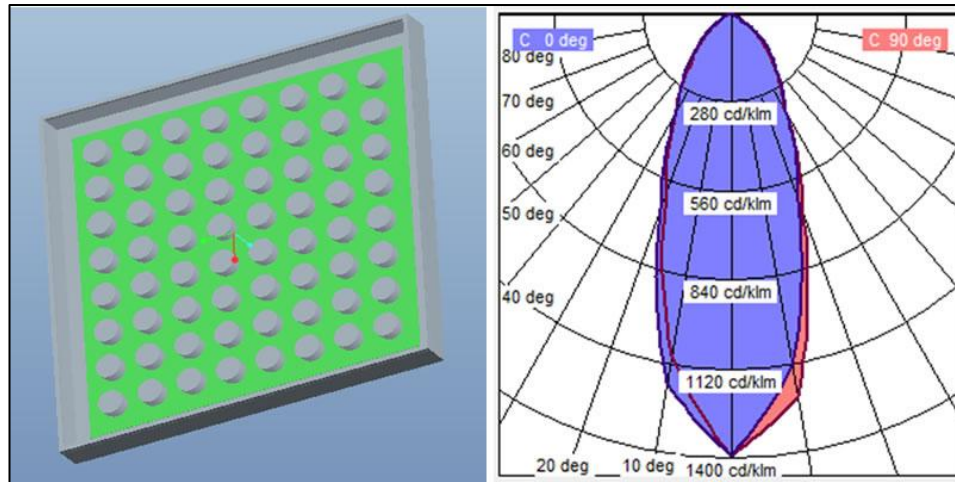
Cam için SPEOS kütüphanesinden BK7 tip şeffaf cam malzeme kullanılmıştır.

Kasa, cam ve armatürlerin boyutları tasarlanan her bir LED ışık kaynaklı armatür için Çizelge 4.9'da verilmiştir.

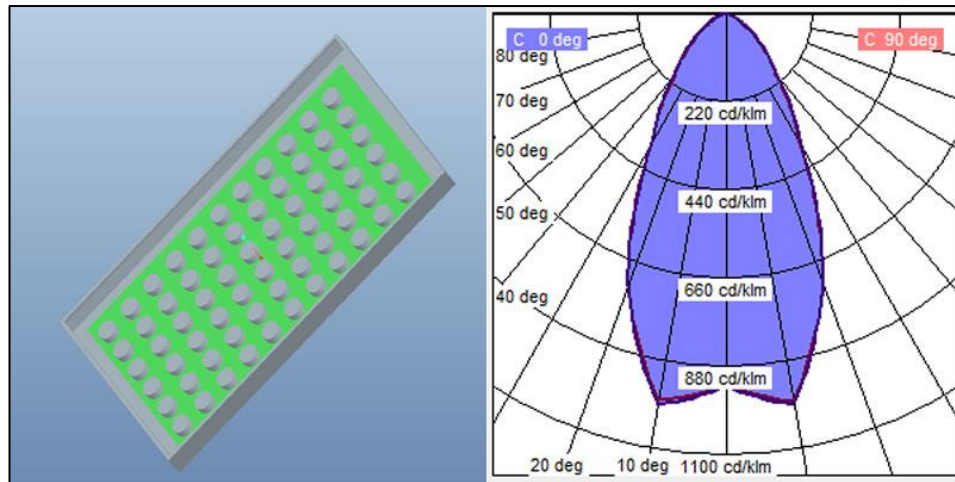
Çizelge 4.9 : Tasarlanan armatürler için kasa, cam ve armatür boyutları.

	Kasa Boyutları [mm] (EnxBoyxYükseklik)	Cam Boyutları [mm] (EnxBoyxYükseklik)	Armatürün Boyutu [mm] (EnxBoyxYükseklik)
Adar	244,8 x 244,8 x 19,5	244,8 x 244,8 x 3	244,8 x 244,8 x 22,5
Aorta	192,6 x 323,1 x 19,3	192,6 x 323,1 x 3	192,6 x 323,1 x 22,3
Ageniş	192,6 x 323,1 x 19,1	192,6 x 323,1 x 3	192,6 x 323,1 x 22,1
Bdar	218,7 x 427,5 x 19,5	218,7 x 427,5 x 3	218,7 x 427,5 x 22,5
Borta	270,9 x 349,2 x 19,3	270,9 x 349,2 x 3	270,9 x 349,2 x 22,3
Bgeniş	166,5 x 610,2 x 19,1	166,5 x 610,2 x 3	166,5 x 610,2 x 22,1

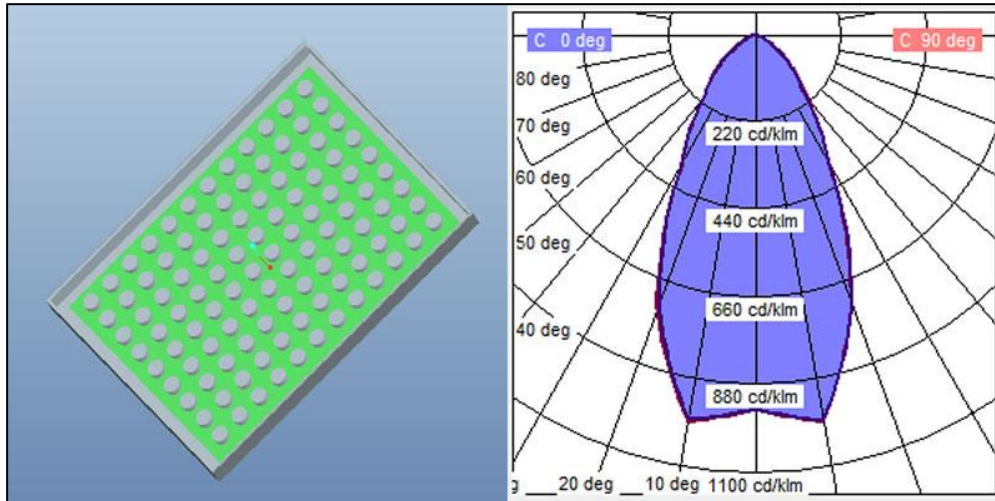
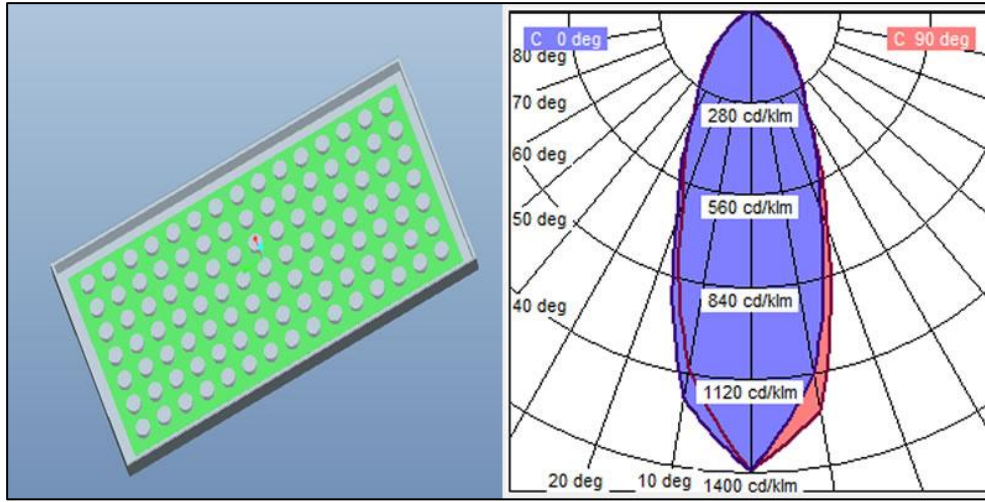
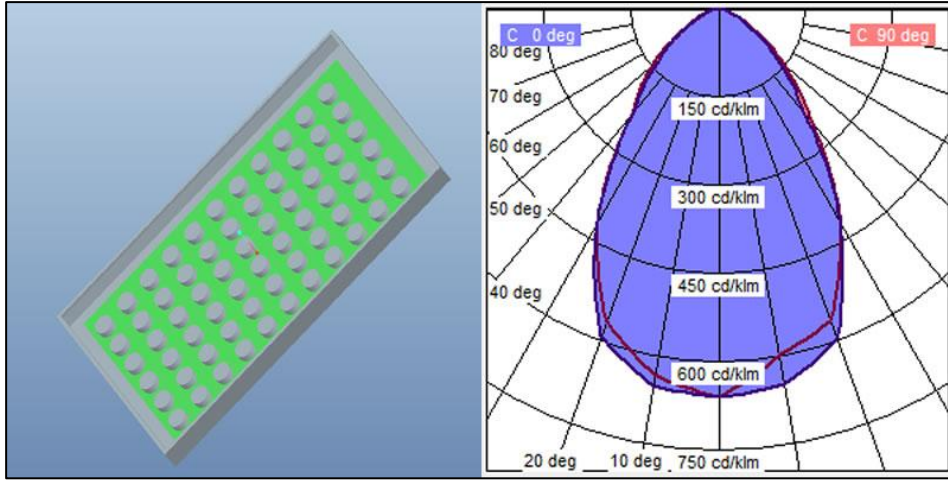
Bu boyutlardaki elemanlar tek tek çizilerek malzeme özellikleri atanmış, armatürlerin şekilleri ve ışık dağılım eğrileri Şekil 4.18, 4.19, 4.20, 4.21, 4.22 ve 4.23'de gösterilmiştir.

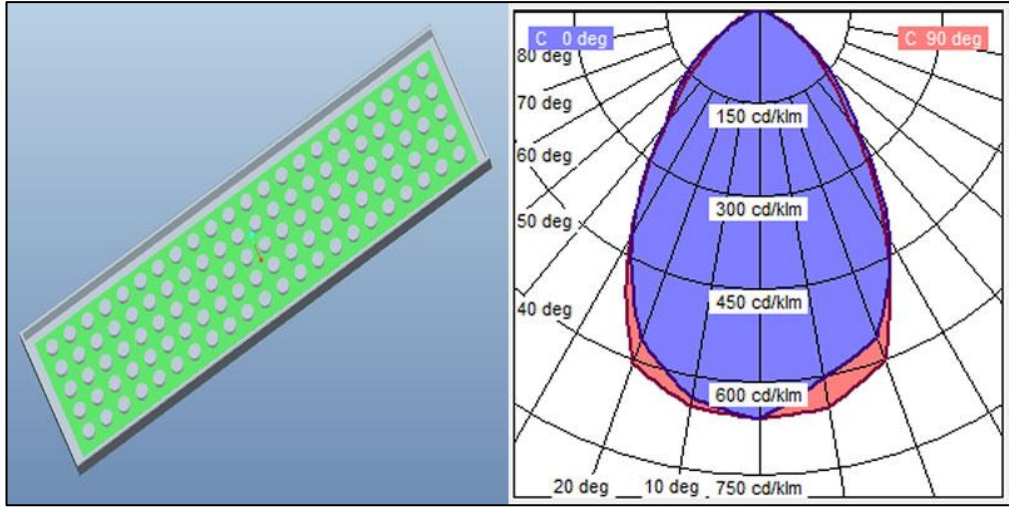


Şekil 4.18 : A_{dar} armatürünün görünümü ve ışık dağılımı.



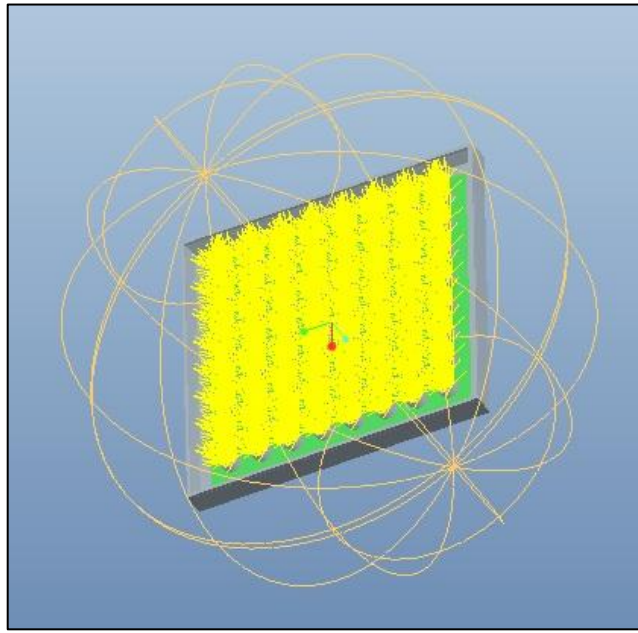
Şekil 4.19 : A_{orta} armatürünün görünümü ve ışık dağılımı.





Şekil 4.23 : Bgeniş armatürünün görünümü ve ışık dağılımı.

Ayrıca örnek bir armatür tasarımı için tasarımda kullanılan sensör, ışınlar ve lensleri simüle eden bir şekil, Şekil 4.24’de gösterilmiştir.



Şekil 4.24 : Tasarımı çalıştırmadan önceki armatürün son hali.

Tasarım başlangıcında armatürlerin ışık çıktı oranları için içsel yansımalar, malzemelerin yutma etkileri gibi nedenlerden dolayı %5 bir kayıp bırakılmıştır. Fakat tasarım sonucunda, bu kayıp değeri, Ageniş ve Bgeniş armatürleri için geniş açılı olduklarından %2,5; diğer armatürler için ise %0 olarak bulunmuştur. Bu değerlerin gerçekliği ancak optik, ısı ve elektriksel tasarım özelliklerine uygun ürünün prototipinin oluşturup test edilmesi ile kontrol edilebilir. Tasarım sonucuna göre armatürlerin ışık çıktı oranları ve diğer tüm optik, ısı ve elektriksel özellikleri Çizelge 4.10’da verilmiştir.

Çizelge 4.10 : Tasarlanan armatürlerin optik, ısıl ve elektriksel verileri.

	Adar	Aorta	Ageniş	Bdar	Borta	Bgeniş
	CREE	CREE	CREE	CREE	CREE	CREE
Kullanılan LED	XM-L T5	XM-L T5	XM-L T5	XM-L T5	XM-L T5	XM-L T5
Kullanılan LED Sayısı	64	66	66	105	108	110
LED'lerin Renk Sıcaklığı [°K]	4500	4500	4500	4500	4500	4500
LED'lerin Renksel Geri Verim Endeksi [Ra]	80	80	80	80	80	80
LED'lerin 25°C Tj ve 0,7A Sürme Akımı için Işık Akısı [lm]	260	260	260	260	260	260
Tasarımda Kullanılan Jonksiyon Sıcaklığı [°C]	90	90	90	90	90	90
LED'lerin 90°C Tj ve 0,7A Sürme Akımı için Işık Akısı [lm]	222,8	222,8	222,8	222,8	222,8	222,8
Kullanılan Lenslerin Verimi	%92	%89	%88	%92	%89	%88
90°C Tj için Kullanılan Lensten Çıkan Işık Akısı Değeri [lm]	205,0	198,3	196,1	205,0	198,3	196,1
Armatürün Işık Çıktı Oranı (LORL) (Tasarımdan Elde Edilen)	%100	%100	%98,47	%100	%100	%98,52
Armatürün Toplam Işık Akısı [lm]	13118	13087	12742	21522	21416	21248
Tasarımda Kullanılan Elektriksel (Sürücü) Verimi	%90	%90	%90	%90	%90	%90
Bir LED'in 90°C Tj için Sistemden Çektiği Güç [W]	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89	1,89
Armatürde kullanılan LED'lerin Sistemden Çektiği Güç [W]	121,0	124,7	124,7	198,5	204,1	207,9
Armatürün Toplam Gücü	134,4	138,6	138,6	220,5	226,8	231,0
Armatürün Etkinlik Faktörü [lm/W]	97,6	94,4	91,9	97,6	94,4	92,0
Armatürde Kullanılan Malzemelerin Özellikleri						
MCPCB'nin Yansıtma Oranı	%90	%90	%90	%90	%90	%90
Kasanın İç Yüzeyinde Kullanılan Reflektörün Yansıtma Oranı	%96	%96	%96	%96	%96	%96
Cam için Kullanılan Malzeme	BK7	BK7	BK7	BK7	BK7	BK7
Armatür Tasarımında Kullanılan Işın Sayısı						
	10.000.000	10.000.000	10.000.000	10.000.000	10.000.000	10.000.000

4.3 LED, Metal Halojen ve Flüoresan Lambalı Armatürlerin Aydınlatma Tasarım Hesapları ve Karşılaştırmaları

LED, metal halojen ve flüoresan lambalı armatürler eni 16 m, boyu 40 m olarak sabit, yükseklikleri 6, 8, 10 ve 12 m olarak değişen bir hacimde 200, 300 ve 500 lx aydınlık düzeyi değerleri için incelenmiş ve hangisinin enerji verimli çözümler sunduğuna ve tasarlanan LED ışık kaynaklı armatürlerin tasarruf potansiyellerine bakılmıştır.

Aydınlatma tasarım kriterleri hesaplamaları Dialux 4.10.0.1 yazılımı kullanılarak yapılmıştır. Tasarlanan LED ışık kaynaklı armatürlerin 6, 8, 10 ve 12 m yükseklikler için 200, 300 ve 500 lx aydınlık düzeyleri hedeflenerek düzgünlük, normalize güç yoğunluğu (NGY) ve armatür sayısı değerleri incelenmiştir. Normalize güç yoğunluğu değeri birim metrekare alan başına 100 lx aydınlık düzeyi yaratılabilmesi için harcanan güç değeridir ve birimi $W/m^2/100\text{ lx}$ 'dür. Bu değer ile armatürlerin enerji verimlilikleri irdelenmiştir.

Ayrıca, standarta göre düzgünlük değerlerini sağlayan armatürler seçilirken armatür sayısı da dikkate alınarak, NGY değeri için ayrıca %5 tolerans bırakılmıştır. İstenilen aydınlık düzeyi ve diğer aydınlatma kriterlerini sağlayan, fakat NGY değerlerinde $\pm\%5$ farklılık gösteren sistemlerden, armatür sayısı düşük olan seçilmiştir. Armatür sayısının az olması sistemin tesisat masrafını ve geri ödeme sürelerini düşürerek daha ekonomik çözümler sunmaktadır.

4.3.1 Tasarımda Kullanılan Hacmin Özellikleri

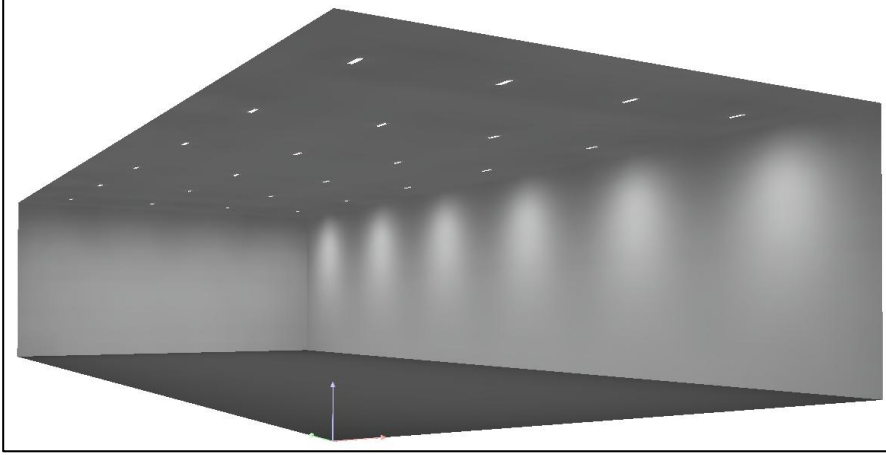
Tasarımda kullanılan hacmin eni 16 m, boyu 40 m olup, yükseklikleri de 6, 8, 10 ve 12 m olarak değişmektedir.

Hacmin tavan, duvar ve zemin yansıtma katsayıları sırasıyla %50, %50 ve %20 olarak alınmıştır.

İşletme koşullarındaki genel kirlilik oranları dikkate alınarak bakım işletme faktörü 0,8 olarak alınmış, çalışma düzlemi yüksekliği ise 1 m olarak kabul edilmiştir.

Hacimde armatürler tavan yüzeyine monte edilmiş dolayısı ile askı boyu "0" olarak alınmıştır. Askı boyu çeşitli yüksekliklerde seçilerek aynı hesaplama sonuçlarının daha yüksek tavan yükseklikleri için de sağlanması mümkün olacaktır.

Hacimde gün ışığı katkısı dikkate alınmamıştır. Çalışma hacmi için bir örnek simülasyon Şekil 4.25’de verilmiştir.



Şekil 4.25 : Örnek bir çalışma hacmi.

4.3.2 Hesaplamalar

Örnek hacimde 6, 8, 10 ve 12 m yüksekliklerde, 200, 300 ve 500 lx aydınlık düzeyi değerleri sağlanması amacıyla gerçekleştirilen tasarım hesapları sonucu elde edilen aydınlık düzeyi, düzgünlüğü, NGY ve armatür sayısı değerleri Çizelge 4.11’de bu çalışmada tasarlanan LED ışık kaynaklı armatürler, Çizelge 4.13’de metal halojen ışık kaynaklı armatürler, Çizelge 4.15’de ise flüoresan lambalı armatürler için verilmiştir.

Çizelge 4.11, 4.13 ve 4.15’de sarı renk ile belirtilenler o yükseklik ve aydınlık düzeyi değeri için en optimum çözümlerdir. Çizelgelerde yeşil ile belirtilenler ise aynı aydınlatma kriterlerini daha düşük NGY değerleri ile sağlayan, ama buna karşılık sistemdeki armatür sayıları daha fazla olan çözümlerdir. Tesisat ve işletme masrafları birlikte düşünülerek NGY değerleri biraz yüksek olmasına karşın, armatür sayısı düşük olan sistemler maliyet-etkin olarak kabul edilmiştir. Yeşil ve sarı renklerle belirtilen aydınlatma sistemlerinin NGY değerleri arasında fark %5’den az olup, sarı renkli olanlar tercih edilmiştir. Armatür sayısının azalması, sistemin toplam maliyetini azaltmakta ve geri ödeme sürelerini kısaltmaktadır.

Çizelge 4.12’de LED ışık kaynaklı tasarımlar, Çizelge 4.14’de metal halojen ışık kaynaklı armatürler ve Çizelge 4.16’da ise flüoresan lambalı armatürler içerisinde ilk yatırım, geri ödeme ve enerji verimliliği açısından en iyi çözümü sağlayan armatürler gösterilmiştir.

Son olarak Çizelge 4.17, 4.18 ve 4.19’da en iyi armatürlerin NGY değerleri verilerek Çizelge 4.20 ve 4.21’de ise LED ışık kaynaklı armatürlerin baz alınan metal halojen ve flüoresan lambalı armatürlere göre tasarruf potansiyelleri verilmiştir.

Çizelge 4.11 : LED ışık kaynaklı armatürler için aydınlatma hesabı sonuçları.

	6m Yükseklik								
	200 lux			300 lux			500 lux		
	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.
A_dar	0,31	1,3	15	0,31	1,31	20	0,41	1,33	35
A_orta	0,31	1,34	15	0,32	1,35	20	0,45	1,37	35
A_geniş	0,5	1,46	18	0,5	1,47	24	0,51	1,49	35
B_dar	0,23	1,27	8	0,23	1,3	12	0,31	1,31	20
B_orta	0,23	1,31	8	0,25	1,33	12	0,33	1,35	20
B_geniş	0,2	1,42	9	0,39	1,44	15	0,5	1,47	24
	8m Yükseklik								
	200 lux			300 lux			500 lux		
	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.
A_dar	0,37	1,39	15	0,44	1,41	24	0,46	1,42	35
A_orta	0,41	1,43	15	0,48	1,46	24	0,51	1,47	35
A_geniş	0,5	1,59	20	0,52	1,6	24	0,53	1,61	42
B_dar	0,25	1,36	9	0,37	1,39	15	0,44	1,41	24
B_orta	0,26	1,41	9	0,42	1,43	15	0,48	1,46	24
B_geniş	0,31	1,54	9	0,48	1,57	15	0,52	1,6	24
	10m Yükseklik								
	200 lux			300 lux			500 lux		
	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.
A_dar	0,45	1,49	15	0,47	1,51	24	0,5	1,53	42
A_orta	0,5	1,54	15	0,52	1,57	24	0,52	1,58	42
A_geniş	0,52	1,73	20	0,53	1,73	25	0,53	1,75	42
B_dar	0,32	1,46	9	0,45	1,49	15	0,48	1,51	24
B_orta	0,34	1,52	9	0,5	1,54	15	0,52	1,57	24
B_geniş	0,5	1,72	12	0,53	1,72	15	0,54	1,73	25
	12m Yükseklik								
	200 lux			300 lux			500 lux		
	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.
A_dar	0,47	1,61	20	0,5	1,62	24	0,5	1,63	42
A_orta	0,52	1,67	20	0,52	1,68	24	0,53	1,69	42
A_geniş	0,54	1,87	20	0,54	1,88	30	0,54	1,89	48
B_dar	0,44	1,59	12	0,47	1,6	15	0,5	1,62	25
B_orta	0,5	1,65	12	0,53	1,66	15	0,52	1,67	25
B_geniş	0,54	1,85	12	0,54	1,86	16	0,55	1,89	30

Çizelge 4.12 : LED ışık kaynaklı tasarımlar için öneriler.

	200 lx	300 lx	500 lx
6m	A_geniş	A_geniş	B_geniş
8m	A_geniş	A_geniş	A_orta
10m	A_orta	B_orta	B_orta
12m	B_orta	B_orta	B_dar

Çizelge 4.13 : M.H. ışık kaynaklı armatürler için aydınlatma hesabı sonuçları.

	6m Yükseklik								
	200 lux			300 lux			500 lux		
	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.
150MHd	0,17	1,86	12	0,34	1,9	24	0,4	1,92	42
150MHo	0,23	1,91	16	0,42	1,92	24	0,45	1,95	42
150MHg	0,5	1,99	18	0,5	2,01	24	0,51	2,03	42
250MHd	0,09	1,84	9	0,26	1,87	15	0,34	1,91	24
250MHo	0,13	1,87	9	0,35	1,89	15	0,41	1,93	24
250MHg	0,19	1,95	9	0,44	1,98	15	0,5	2,01	24
	8m Yükseklik								
	200 lux			300 lux			500 lux		
	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.
150MHd	0,38	2	20	0,38	2,01	25	0,47	2,04	42
150MHo	0,44	2,05	20	0,44	2,06	25	0,5	2,08	42
150MHg	0,52	2,17	20	0,52	2,19	30	0,52	2,2	48
250MHd	0,3	1,97	12	0,37	1,98	15	0,38	2,02	25
250MHo	0,37	2,02	12	0,44	2,04	15	0,44	2,07	25
250MHg	0,47	2,14	12	0,47	2,16	16	0,52	2,19	28
	10m Yükseklik								
	200 lux			300 lux			500 lux		
	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.
150MHd	0,44	2,13	20	0,47	2,15	30	0,5	2,17	48
150MHo	0,5	2,21	20	0,5	2,22	30	0,51	2,24	48
150MHg	0,54	2,37	20	0,54	2,39	30	0,53	2,4	48
250MHd	0,38	2,1	12	0,38	2,12	16	0,47	2,16	30
250MHo	0,45	2,18	12	0,45	2,2	16	0,5	2,23	30
250MHg	0,53	2,35	12	0,54	2,38	20	0,54	2,4	30
	12m Yükseklik								
	200 lux			300 lux			500 lux		
	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.
150MHd	0,5	2,26	20	0,5	2,28	30	0,5	2,3	48
150MHo	0,51	2,37	20	0,52	2,39	30	0,52	2,4	48
150MHg	0,55	2,6	24	0,56	2,61	35	0,56	2,62	56
250MHd	0,43	2,23	12	0,48	2,27	20	0,5	2,29	30
250MHo	0,5	2,35	12	0,51	2,38	20	0,52	2,4	30
250MHg	0,56	2,58	15	0,56	2,6	20	0,56	2,62	35

Çizelge 4.14 : Metal halojen ışık kaynaklı armatürler için öneriler.

	200 lx	300 lx	500 lx
6m	150MHg	150MHg	250MHg
8m	150MHg	150MHg	250MHg
10m	150MHo	150MHo	250MHo
12m	250MHo	250MHo	250MHd

Çizelge 4.15 : Flüoresan ışık kaynaklı armatürler için aydınlatma hesabı sonuçları

	6m Yükseklik								
	200 lux			300 lux			500 lux		
	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.
2x58W	0,51	1,71	24	0,54	1,72	35	0,53	1,74	56
4x58W	0,39	1,61	12	0,43	1,63	16	0,53	1,66	30
	8m Yükseklik								
	200 lux			300 lux			500 lux		
	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.
2x58W	0,54	1,85	24	0,54	1,87	35	0,53	1,88	63
4x58W	0,5	1,75	12	0,54	1,79	20	0,54	1,81	30
	10m Yükseklik								
	200 lux			300 lux			500 lux		
	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.
2x58W	0,55	2,01	25	0,54	2,03	42	0,54	2,03	63
4x58W	0,56	1,93	15	0,55	1,95	20	0,55	1,97	35
	12m Yükseklik								
	200 lux			300 lux			500 lux		
	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.	Uo	NGY	A.S.
2x58W	0,56	2,19	30	0,56	2,2	42	0,56	2,2	72
4x58W	0,57	2,1	15	0,56	2,11	24	0,56	2,13	35

Çizelge 4.16 : Flüoresan ışık kaynaklı armatürler için öneriler.

	200 lx	300 lx	500 lx
6m	2x58W	2x58W	4x58W
8m	4x58W	4x58W	4x58W
10m	4x58W	4x58W	4x58W
12m	4x58W	4x58W	4x58W

Çizelge 4.17 : LED ışık kaynaklı en iyi tasarımların NGY değerleri.

	200 lx	300 lx	500 lx
6m	1,46	1,47	1,47
8m	1,59	1,6	1,47
10m	1,54	1,54	1,57
12m	1,65	1,66	1,62

Çizelge 4.18 : Metal halojen ışık kaynaklı en iyi armatürlerin NGY değerleri.

	200 lx	300 lx	500 lx
6m	1,99	2,01	2,01
8m	2,17	2,19	2,19
10m	2,21	2,22	2,23
12m	2,35	2,38	2,29

Çizelge 4.19 : Flüoresan ışık kaynaklı en iyi armatürlerin NGY değerleri.

	200 lx	300 lx	500 lx
6m	1,71	1,72	1,66
8m	1,75	1,79	1,81
10m	1,93	1,95	1,97
12m	2,1	2,11	2,13

Çizelge 4.20 : Tasarlanan LED ışık kaynaklı armatürlerin baz metal halojen lambalı armatürlere göre tasarruf potansiyelleri.

	200 lx	300 lx	500 lx
6m	%26,6	%26,9	%26,9
8m	%26,7	%26,9	%32,9
10m	%30,3	%30,6	%29,6
12m	%29,8	%30,3	%29,3

Çizelge 4.21 : Tasarlanan LED ışık kaynaklı armatürlerin baz flüoresan lambalı armatürlere göre tasarruf potansiyelleri.

	200 lx	300 lx	500 lx
6m	%14,60	%14,50	%11,40
8m	%9,10	%10,60	%18,80
10m	%20,20	%21,00	%20,30
12m	%21,40	%21,30	%23,90

Çizelge 4.20’den görüleceği üzere tasarlanan iyi tasarlanmış LED ışık kaynaklı armatürlerin baz alınan metal halojen lambalı armatürlere göre tasarruf potansiyeli %26,6 ile %32,9 arasında, baz alınan flüoresan lambalı armatürlere göre ise %9,1 ile %23,9 arasındadır.

5. SONUÇ VE ÖNERİLER

Ülkemizde ve dünyada enerji tüketimi, gelişen sanayi sektörü ile birlikte hızla artmakta bu durum da mevcut teknolojilerin geliştirilmesi, enerjide tasarrufu ve verimliliğinin artırılması konularını enerji gündeminin ilk sıralarına taşımaktadır. Bu kapsamda tüketilen enerjide büyük bir paya sahip endüstriyel tesislerde yapılacak olan verimlilik çalışmaları da büyük önem kazanmaktadır. Bu çalışmalarda uzun ömürleri, işletme maliyetlerinin düşük olması gibi özellikleri öne sürülerek endüstriyel tesislerdeki aydınlatma tesisatlarında kullanılan geleneksel armatürlerin yerine LED ışık kaynaklı armatürlerin kullanımı önerileri de son yıllarda sıkça karşılaşılan uygulamalardır.

LED ışık kaynakları sürekli gelişen bir teknoloji olduğundan etkinlik faktörü değerleri gün geçtikçe artmakta ve kullanım olasılıkları da yükselmektedir. Fakat, diğer alışlagelmiş ışık kaynaklarından farklı yapıya sahip LED'lerin kullanılacağı armatürlerin optik ve ısı tasarım süreçleri de geleneksel armatürlerden farklı ele alınmak zorundadır. Diğer yandan, hangi ışık kaynağı kullanılırsa kullanılsın aydınlatma tesisatlarında yapılacak işe uygun görsel konfor ve emniyet için gerekli aydınlatma kriterlerinin kesinlikle sağlanması gerektiği de hiçbir zaman akıldan çıkarılmamalıdır.

Optik tasarım armatür tasarım süreçlerinin en kritik ve en önemli aşamalarından biridir. Optik tasarım dikkatli bir şekilde ele alındığında ışık kaynağından çıkan ışınların kontrolü iyi bir şekilde yapılabilir. LED'lerin yapılarının küçük olması nedeniyle tasarımdaki ufak değişiklikler armatürlerin optik özelliklerini büyük ölçüde etkileyebilir. Bu yüzden armatürlerin üretimden önce prototipinin yapılıp ara kademelerde fotometrik özelliklerinin ölçülmesi gerekmektedir.

Bu çalışma kapsamında, SPEOS optik yazılım programı kullanılarak, farklı ışık akısı ve dağılımlarına sahip metal halojen ve flüoresan lambalı armatürlere eşdeğer olabilecek LED ışık kaynaklı armatür tasarımları gerçekleştirilmiştir. Tasarlanan LED'li armatürler ve baz alınan metal halojen ve flüoresan lambalı armatürlerle, yükseklikleri değişen sabit bir çalışma hacminde belirli ortalama aydınlık düzeyi

değerlerini gerekli düzgünlük ile birlikte sağlayacak şekilde aydınlatma tasarım hesapları yapılmış ve toplam maliyetleri minimize edebilecek maliyet-etkin verimli armatürler belirlenmeye çalışılmıştır.

Buna göre; eni 16 m, boyu 40 m ve yükseklikleri 6, 8, 10 ve 12 m olarak değişen, çalışma düzlemi 1 m olan bir hacimde tavana monte edilmiş armatürler ile; 200 ve 300 lx aydınlık düzeyleri için; 6 ve 8 m yüksekliklerde geniş, 10 ve 12 m yüksekliklerde orta açılı ışık dağılımına sahip armatürlerin kullanılması; 500 lx aydınlık düzeyi için; 6 m yükseklikde geniş, 8 ve 10 m’de orta, 12 m için ise dar açılı ışık dağılımına sahip iyi tasarlanmış LED ışık kaynaklı armatürlerin kullanılması baz alınan metal halojen ve flüoresan lambalı armatürlere göre enerji tasarrufu sağlamakta ve enerji verimli aydınlatma tesisatlarını sunmaktadır. Dolayısı ile tavan yüksekliği arttıkça dar açılı armatürlerle daha verimli çözümler elde edilebilmektedir. Buna ek olarak, düşük tavan yüksekliklerinde (6 ve 8 m gibi) düzgünlüğün sağlanması için düşük ışık akısına sahip (12000 lm) armatürlerin kullanılması önerilirken, armatür sayısının azalarak aydınlatma tesisatının ilk yatırım maliyetinin düşmesi gibi nedenlerden dolayı tavan yükseklikleri arttıkça (10, 12 m ve üstü) daha yüksek ışık akısına sahip (20000 lm) armatürlerin kullanımı önerilmektedir.

Armatürlerin askı boyu çeşitli yüksekliklerde seçilerek aynı hesaplama sonuçlarının daha yüksek tavan yükseklikleri için de sağlanması mümkün olacaktır. Ayrıca, aydınlatılacak yerin tavan, duvar ve zemin yansıtma katsayıları hacmin içerisindeki ortalama düzgünlük ve kamaşmayı etkilediğinden bu değerlerin yüksek olması için yüzeylerin açık renkli ve temiz tutulması da son derece faydalı olacaktır.

Gerçekleştirilen bu çalışmada kullanılan SPEOS optik tasarım programının özelliklerinden dolayı armatürlerin kamaşma sınırlandırma katsayıları hesaplanamamıştır. Küçük boyutlu ve yoğun ışık akılı LED’li aydınlatma çözümlerinde kamaşma sorununun çözülmesi önemli olduğu için çalışmanın bu kapsamda geliştirilmesi yararlı olacaktır.

Sonuç olarak, iyi tasarlanmış LED ışık kaynaklı armatürlerle gerçekleştirilen tesisatlarda, baz alınan 150W ve 250W metal halojen lambalı armatürlere göre %26,6 ile %32,9 arasında, 2x58W ve 4x58W flüoresan lambalı armatürlere göre ise

%9,1 ile %23,9 arasında enerji tasarrufu sağlanabildiği belirlenmiştir. Lamba tip ve gúçleri değiştikçe bu oranların da değişebileceği açıktır.

KAYNAKLAR

- [1] **TEDAŞ**, Türkiye Elektrik Dağıtım ve Tüketim İstatistikleri, Ankara, 2007.
- [2] **TS EN 12464-1**, Işık ve Işıklandırma – İş Mahallerinin Aydınlatılması – Bölüm 1: Kapalı Alandaki İş Mahalleri, Türk Standartları Enstitüsü, Ocak 2004.
- [3] **M. B. YURTSEVEN**, “LED Teknolojileri ve Standartları”, 47. Grup Aydınlatma Donanımları Sanayii Genişletilmiş Sektör Toplantısı, Odakule, 02.04.2012.
- [4] **P. MOTTIER**, “LEDs for Lighting”, Wiley, 2009.
- [5] **L. HALONEN, E. TETRI, P. BHUSAL**, “Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings”, Annex 45, Espoo, 2010.
- [6] **S. ONAYGİL, Ö. GÜLER, E. ERKİN, E. CEBECİ**, “Endüstride Tavan Yüksekliğine Bağlı Aydınlatma Çözümleri”, 5. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu, 07.05.2009.
- [7] **S. ONAYGİL, M. B. YURTSEVEN, N. GÜNDÜZ, E. ERKİN**, “Verimli Led Armatürü İçin Optik Ve Isıl Tasarım Süreçleri”, 8. Ulusal Aydınlatma Kongresi, İstanbul, 14-15 Nisan 2011.
- [8] **CREE**, SSL Design Processes/Considerations, www.cree.com ABD, 2009, (10.03.2012 tarihinde erişildi).
- [9] **THOMAS RESEARCH PRODUCTS**, www.trpssl.com, (15.03.2012 tarihinde erişildi).
- [10] **MURDOCH, J.B.**, Illuminating Engineering – From Edisons’ Lamp to the Laser, Macmillan Publishing Company, 1985.
- [11] **H. G. GÜLER**, “Aydınlatma Armatür Tasarımında Gerçek Değer ile Tasarım Değerinin Karşılaştırılması”, Yüksek Lisans Tezi, Haziran 2007.
- [12] **RENSSELAER POLYTECHNIC INSTITUTE**, Illumination Fundamentals, 2000.
- [13] **PEDROTTI, S. LENO**, Fundamentals of Photonics – Module 1.3 Basic Geometrical Optics, 2000.
- [14] **SERWAY, R.A., JEWETT J.W.**, Physics for Scientists and Engineers with Modern Physics (8th Edition), Brooks/Cole, 2010.
- [15] **IESNA**, The IESNA Lighting Handbook Reference & Application (9th Edition), Illuminating Engineering Society of North America, 2000.
- [16] **SIMONS, R. H. & A. R. B.**, Lighting Engineering: Applied Calculations (1st Edition), Architectural Press, 2001.
- [17] **M. ÖZKAYA, T. TÜFEKÇİ**, “Aydınlatma Tekniği”, Birsan Yayınevi, İstanbul, 2011.

- [18] **PHILIPS**, www.lighting.philips.com.tr, (05.04.2012 tarihinde erişildi.)
- [19] **EAE**, www.eaeaydinlatma.com, (07.04.2012 tarihinde erişildi.)
- [20] **CREE**, Product Family Datasheet / Xlamp XM-L LEDs, www.cree.com/xlamp, (01.04.2012 tarihinde erişildi.)
- [21] **LEDIL**, www.ledil.fi, (03.04.2012 tarihinde erişildi.)



ÖZGEÇMİŞ

Ad Soyad: Niyazi GÜNDÜZ

Doğum Yeri ve Tarihi: Kırklareli, 05.08.1987

Adres: Zincirlikuyu Mah. Kaplan Cad. No:10/31 Darıca/KOCAELİ

E-Posta: niyazigunduz@gmail.com

Lisans: Yıldız Teknik Üniversitesi / Elektrik Mühendisliği

Mesleki Deneyim ve Ödüller:

Ekim 2011 – halen: İstanbul Teknik Üniversitesi/ Endüstriyel Destekli Arş. Gör.

Kasım 2009 – halen: Nyz Mühendislik Ltd. Şti. / Serbest Müşavir Mühendis

Haziran 2009 – Kasım 2009: Zeve Müh. ve Aydınlatma /Aydınlatma Proje Uzmanı

Ekim 2008 – Temmuz 2009: Yıldız Teknik Üniversitesi / Öğrenci Asistan

Yayın Listesi:

- “Bilgisayar Yüklerinin Harmonik Aktivite Kestirimi ve Harmonik Analizi”, Bora ACARKAN, Osman KILIÇ, Selim AY, Niyazi GÜNDÜZ, 4. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, EVK 2011, 12 – 13 Mayıs 2011, Kocaeli.
- “Verimli Led Armatürü için Optik ve Isıl Tasarım Süreçleri”, Sermin Onaygil, M.Berker Yurtseven, Niyazi Gündüz, Emre Erkin, 8. Ulusal Aydınlatma Kongresi, 14 Nisan 2011, İstanbul.