İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

LED IŞIK KAYNAKLI ARMATÜR ISIL MODELLENMESİ VE ISIL TASARIMI ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Mustafa Berker YURTSEVEN

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

HAZİRAN 2017

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ ENERJİ ENSTİTÜSÜ

LED IŞIK KAYNAKLI ARMATÜR ISIL MODELLENMESİ VE ISIL TASARIMI ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

DOKTORA TEZİ

Mustafa Berker YURTSEVEN
(301062006)

Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı

Enerji Bilim ve Teknoloji Programı

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sermin ONAYGİL

HAZİRAN 2017

İTÜ, Enerji Enstitüsü'nün 301062006 numaralı Doktora Öğrencisi Mustafa Berker YURTSEVEN, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı "LED IŞIK KAYNAKLI ARMATÜR ISIL MODELLENMESİ VE ISIL TASARIMI ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ" başlıklı tezini aşağıda imzaları olan jüri önünde başarı ile sunmuştur.

Tez Danışmanı :	**Prof. Dr. Sermin ONAYGİL** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
Jüri Üyeleri :	**Prof. Dr. Önder GÜLER** İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Özgül KELEŞ İstanbul Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Zeynep Düriye BİLGE Yıldız Teknik Üniversitesi	.....
	Prof. Dr. Nurettin UMURKAN Yıldız Teknik Üniversitesi	.....

Teslim Tarihi : 17 Nisan 2017
Savunma Tarihi : 9 Haziran 2017

ÖNSÖZ

Bu tezi yazmamda ve aydınlatmanın ışıltılı dünyasına adım atmamda yardım ve katkılarını benden esirgemeyen sevgili danışmanım Prof. Dr. Sermin ONAYGİL hocama, Prof. Dr. Önder GÜLER hocama, bana istatistiği sevdiren Prof. Dr. Özgül KELEŞ hocama, sürekli yanımda olup benden yardımlarını hiçbir zaman esirgemeyen biricik çalışma arkadaşlarım Ebru ACUNER TÜRET, Dr. Emre ERKİN, Seyit Ahmet AKDAĞ, Seher ATEŞ ve Dr. Lale ERDEM ATILGAN'a; hep yanımda olan arkadaşlarım Işıl SÖZER, Hürkan TABANLI, Gizem PINAR ÜNVEREN ve Tamer ÖZGÜZEL'e; canım Annem'e ve şu anda aramızda bulunmayan canım Babam'a teşekkür ederim.

Haziran 2017

Mustafa Berker Yurtseven
(Makine Yüksek Mühendisi)

İÇİNDEKİLER

ÖNSÖZ ..... **v**
İÇİNDEKİLER ..... **vii**
KISALTMALAR ..... **xi**
SEMBOLLER ..... **xiii**
ÇİZELGE LİSTESİ ..... **xv**
ŞEKİL LİSTESİ ..... **xvii**
ÖZET ..... **xxi**
SUMMARY ..... **xxiii**
1. GİRİŞ **1**
1.1 LED Işık Kaynaklarının Karakteristik Özelliklerine Sıcaklığın Etkisi 2
1.2 Tezin Amacı 10
2. IŞIK YAYAN DİYOTLAR (Light Emitting Diodes – LED) **13**
2.1 LED'lerin Tarihçesi 13
2.2 LED'ler ve Aydınlatma 15
2.3 LED'lerin Çalışma Prensibi 18
2.4 LED'ler ile Beyaz Işık Elde Edilmesi ve Renk 20
2.4.1 LED'lerin renk sıcaklığı 22
2.4.2 LED'lerin renksel geriverim endeksi 23
2.5 LED Ömrü 24
2.6 LED Standartları 25
2.6.1 LED ve LED ışık kaynağı kullanan sistem tanımları 27
2.6.1.1 LED yarıiletkeni 27
2.6.1.2 LED çipi/paketi 27
2.6.1.3 LED dizisi 27
2.6.1.4 LED modülü) 28
2.6.1.5 LED sürücüsü 28
2.6.1.6 LED ışık motoru 28
2.6.1.7 LED armatür 29
2.6.2 Amerika Birleşik Devletleri – LED aydınlatma standartları 29
2.6.2.1 IESNA LM-79-08: approved method: electrical and photometric measurements of solid state lighting products, (standart yöntem: katı hal aydınlatma ürünleri için elektriksel ve fotometrik ölçümler) 29
2.6.2.2 ASSIST – LED life for general lighting: measurement method for LED components (genel aydınlatma için led ömrü: LED bileşenleri için ölçüm yöntemi) 30
2.6.2.3 IESNA LM-80-08: approved method: lumen maintenance testing of LED light sources, (standart yöntem: LED ışık kaynaklarının zamana bağlı ışık akısı ölçümleri) 31
2.6.2.4 IESNA TM-21-11: life estimation test method (ömür öngörü test yöntemi) 32
2.6.2.5 IES LM-84-14 measuring luminous flux and color maintenance of LED lamps, light engines and luminaries (LED lambaların, ışık motorlarının ve armatürlerin ışık akısı ve renk sürekliliğinin ölçümü) 33

2.6.2.6 IES TM-28-14 projecting long-term luminous flux maintenance of LED lamps and luminaires (LED lamba ve armatürlerin uzun dönem ışık akısı sürekliliği öngörüsü) 34
2.6.3 Uluslararası LED aydınlatma standartları 36
2.6.4 LED lamba ve modülleri standartları 36
2.6.4.1 IEC 62031:2008 / EN 62031:2008: LED modules for general lighting – safety specifications (genel aydınlatma amaçlı LED modülleri: güvenlik gereklilikleri) 36
2.6.4.2 IEC/PAS 62717:2011: LED modules for general lighting – performance requirements (genel aydınlatma amaçlı LED modülleri: performans gereklilikleri) 37
2.6.4.3 IEC 62560:2011 / EN 62560: self-ballasted LED-lamps for general lighting services by voltage > 50 V - safety specifications (50 V'tan yüksek gerilimde çalışan, genel aydınlatma amaçlı, kendinden balastlı LED lambaları: güvenlik gereklilikleri) 37
2.6.4.4 IEC/PAS 62612:2009: self-ballasted LED-lamps for general lighting services by voltage > 50 V – performance requirements (50 V'tan yüksek gerilimde çalışan, genel aydınlatma amaçlı, kendinden balastlı LED lambaları: performans gereklilikleri) 37
2.6.4.5 IEC 60061: lamp caps and holders together with gauges for the control of interchangeability and safety (güvenlik ve değiştirilebilirliğin kontrolü için, lamba başlık ve duyları) 38
2.6.4.6 IEC 60838-2-2:2006 / EN 60838-2-2:2006: miscellaneous lampholders – part 2-2: particular requirements – connectors for LED-modules (çeşitli duylar – özel gereklilikler – LED modülleri için bağlantı elemanları) 38
2.6.4.7 IEC 61231:2010 / EN 61231:2010: international lamp coding system (ilcos) (uluslararası lamba kodlama sistemi) 38
2.6.4.8 IEC/PAS 62707-1:2011: LED – binning – part 1 : general requirements and white grid (LED – gruplama – birinci bölüm: genel gereklilikler ve beyaz ışık bölümü) 38
2.6.5 LED kontrol elemanları standartları 38
2.6.5.1 IEC 61347-1:2010-11 / EN 61347-1:2008: lamp controlgear – part 1: general and safety requirements (lamba kontrol elemanları – birinci bölüm: genel gereklilikler ve güvenlik gereklilikleri) 38
2.6.5.2 IEC 61347-2-13:2006: lamp controlgear – part 2-13: particular requirements for dc or ac supplied electronic controlgear for LED modules (lamba kontrol elemanları – bölüm 2-13: dc veya ac beslenmiş LED modüllerinin kontrol elemanları için özel gereklilikler) 39
2.6.5.3 IEC 62384:2009 / EN 62384:2009: dc or ac supplied electronic control gear for LED modules – performance requirements (dc veya ac beslenmiş LED modüllerinin kontrol elemanları için performans gereklilikleri) 39
2.6.5.4 IEC 62386-101:2009 / EN 62386-101:2009: digital addressable lighting interface – part 101: general requirements – system (dijital adreslenebilir aydınlatma arabirimi – bölüm 101: genel gereklilikler) 39
2.6.5.5 IEC 62386-102:2009 / EN 62386-102:2009: digital addressable lighting interface – part 102: general requirements – control gear (dijital adreslenebilir aydınlatma arabirimi – bölüm 102: genel gereklilikler – kontrol aksamı) 39

2.6.5.6 IEC 62386-207:2009 / EN 62386-207:2009: digital addressable lighting interface – part 207: particular requirements for control gear – LED modules (dijital adreslenebilir aydınlatma arabirimi – bölüm 207: kontrol aksamı için özel gereklilikler – LED modülleri) 39
2.6.6 LED ışık kaynaklı armatür standartları 40
2.6.6.1 IEC 60598 / EN 60598: luminaire safety (armatür güvenliği) 40
2.6.6.2 IEC/PAS 62722-1:2011: luminaire performance – part 1 – general requirements ve iec/pas 62722-2-1:2011 luminaire performance – part 2-1 – particular requirements for LED luminaires (armatür performansı – bölüm 1 – genel gereklilikler ve armatür performansı – bölüm 2-1 – LED armatürler için özel gereklilikler) 40
2.6.7 LED'li aydınlatma tesisatları için standartlar 41
2.6.7.1 IEC/TS 62504:2011: terms and definitions for LEDS and LED modules in general lighting (genel aydınlatma amaçlı kullanılan LED'ler ve LED modüller için terimler ve tanımlar) 41
2.6.7.2 IEC 62471:2006 / EN 62471:2008: photobiological safety of lamps and lamp systems ve ıec 62471-2:2009: photobiological safety of lamps and lamp systems – part 2: guidance on manufacturing requirements relating to non-laser optical radiation safety (lambaların ve lamba sistemlerinin fotobiyolojik güvenliği / lambaların ve lamba sistemlerinin fotobiyolojik güvenliği – bölüm 2: lazer dışı optik radyasyon güvenliği ile ilgili üretim gerekliliği kılavuzu) 41
2.6.8 LED'li aydınlatma sistemlerinin ölçümü için standartlar 41
2.6.8.1 CIE 127:2007: measurement of LEDs (LED'lerin ölçümü) 41
2.6.8.2 EN 13032 : light and lighting – measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires (ışık ve aydınlatma – lamba ve armatürlerin ölçümü ve fotometrik verilerin sunumu) 42
2.6.8.3 IEC/TR 61341:2010: method of measurement of centre beam intensity and beam angle(s) of reflector lamps (reflektörlü lambalar için merkez ışın şiddeti ve ışın açılarını ölçme yöntemi) 42
2.6.9 LED'li aydınlatma sistemlerinin elektromanyetik gereklilikleri (electromagnetic compatibility – emc) ve elektromanyetik alan (electromagnetic field – emf) ölçümleri için standartlar 42
2.6.10 LED standardizasyonu için teknik komiteler 43
3. LED ARMATÜR TASARIMI 45
3.1 Armatürler 45
3.2 Armatürlerin Sınıflandırılması 45
3.3 Armatürler ile Işık Kontrolü 47
3.3.1 Reflektörler (yansıtıcılar) 48
3.3.2 Refraktörler (kırıcılar) 49
3.3.3 Yayıcılar 49
3.3.4 Ekranlama elemanları (louvrlar) 49
3.4 LED Işık Kaynağı Kullanan Armatür Tasarım Süreci 50
3.4.1 Gerekli aydınlatma kriterlerinin belirlenmesi 50
3.4.2 Tasarım hedeflerinin belirlenmesi 51
3.4.3 Tasarlanacak armatürün optik, ısıl ve elektriksel verimlerinin belirlenmesi 52
3.4.4 Gerekli LED sayısının belirlenmesi 53
3.4.5 Optik, mekanik ve ısıl analizler yapılarak tasarımın gerçekleştirilmesi 53
3.4.6 Prototip süreci 54

4. LED ÇİPLERİN KOMPAKT ISIL MODELLER İLE SİMÜLASYONU 55
4.1 Kompakt Isıl Modeller 55
4.2 İki-Direnç Modeli Kullanılarak LED Armatürlerin Modellenmesi 57
4.3 Laboratuvar Ölçümleri 60
4.4 Sonuçlar 62
5. LED ARMATÜR ISIL TASARIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER ve İSTATİSTİKSEL ANALİZİ 65
5.1 Deney Tasarım İlkeleri 66
5.1.1 Farklılık analizi (ANOVA – analysis of variance) 67
5.1.2 ANOVA kabulleri 70
5.1.3 Faktör analizi 71
5.2 Isıl Simülasyon Faktöriyel Analizi 72
5.2.1 Faktörlerin belirlenmesi 74
5.2.2 Deney tasarımı 77
5.2.3 Deney tasarım analizi 78
5.2.4 ANOVA kabullerinin incelenmesi 83
5.2.5 Faktöriyel deney tasarım sonuçlarının yorumlanması 83
5.3 Isıl Simülasyon Regresyon Analizi 86
5.3.1 Simülasyon sonuçlarının regresyon analizi 90
5.3.2 Regresyon kabullerinin doğrulanması 93
5.3.3 Regresyon model sonuçlarının tartışılması 94
5.3.3.1 Ortam sıcaklığı (T_{ortam}) 94
5.3.3.2 LED çip ısıl gücü (P_{led}) 95
5.3.3.3 Baskı devre kartı türü (K_{bd}) 97
5.3.3.4 Gövde malzemesi ($K_{gövde}$) 98
5.3.3.5 Gövde malzemesi ve geometrisinin incelenmesi 100
5.3.3.6 Isıl arabirim malzemesi ($R_{ıam}$) 102
5.4 Faktörlerin Armatür Fotometrik Performansına Etkisi 104
5.4.1 Örnek armatürün analizi 104
5.4.2 Farklı güç senaryolarında örnek armatürün yol aydınlatması standartlarına uygunluğu 106
5.4.3 Örnek armatür için faktör analizi 107
5.5 İstatistiksel Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi 112
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA 117
KAYNAKLAR 123
ÖZGEÇMİŞ 129

KISALTMALAR

AC : Alternative Current
AlInGaP : Alüminyum İndiyum Galyum Fosfür
ANOVA : Analysis of Variance
ANSI : American National Standards Institute
BD : Baskı Devre
CCT : Corralated Color Temperature
CEN : European Committee for Standardization
CIE : Commission Internationale de L'éclairage
CRI : Color Rendering Index
CTM : Compact Thermal Model
DELPHI : Development of Libraries of Physical Models for an Integrated Design
DG : Düşük Güç
EMC : Electromagnetic Compatibility
EMF : Electromagnetic Field
FCC : Federal Communications Commission
GaAsP : Galyum Arsenik Fosfor
HAD : Hesaplamalı Akışkanlar Dinamiği
IESNA : Illuminating Engineering Society of North America
IEC : International Electrotechnical Commission
InGaN : İndiyum Galyum Nitrit
IP : Ingress Protection
ISO : International Standardization Organization
İD : İki Direnç
JEDEC : Solid State Technology Associations
KIM : Kompakt Isıl Model
LED : Light Emitting Diode
LRC : Lighting Research Center
MS : Mean Square
NEMA : National Electrical Manufacturers Association
NFPA : National Fire Protection Association
NG : Nominal Güç
NIST : National Institute of Standards and Technology
OLED : Organic Light Emitting Diode
PCB : Printed Circuit Board
SiC : Silisyum Karbür
SiO_2 : Silisyum Dioksit
SS : Sum of Squares
TEDAŞ : Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.
UL : Underwriters Laboratories Inc.
YG : Yüksek Güç
ZHAGA : Zhaga Birliği

SEMBOLLER

α	: Anlamlılık Seviyesi
$\eta_{ısıl}$	: Isıl Verim
η_{optik}	: Optik Verim
°C	: Santigrad Derece
ε	: Hata Terimi
A	: Amper
E_c	: Yarı İletken İletim Bandı Enerjisi
E_g	: Yarı İletken İletim ve Valans Bandı Arası Enerji Farkı
E_v	: Yarı İletken Valans Bandı Enerjisi
h^v	: Foton Enerjisi
K	: Kelvin
k	: Isı İletim Katsayısı
k_{bd}	: Baskı Devre Kartı Isı İletim Katsayısı
$k_{gövde}$	: Gövde Malzemesi Isı İletim Katsayısı
lm	: lümen
lm/W	: lümen/Watt
L_p	: Işık Akısı Koruma Yüzdesi
lpw	: Lumen per Watt
mA	: Miliamper
mm	: Milimetre
nm	: Nanometre
P_{led}	: LED Çip Isıl Gücü
PCB	: Printed Circuit Board
R_a	: Renksel Geriverim İndeksi
R	: Isıl Direnç
$R_{ıam}$	: Isıl Arabirim Malzemesi Isıl Direnci
T_j	: Jonksiyon Sıcaklığı
T_{ort}	: Ortam Sıcaklığı
TL	: Türk Lirası
TWh	: Tera Watt Hour
V	: Volt
W	: Watt

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 1.1 : Örnek ışık kaynaklarının ısı transfer mekanizmalarının karşılaştırılması. **2**
Çizelge 2.1 : Yaygın kullanılan ışık kaynaklarının ortalama etkinlik faktörü ve ömür değerleri. **16**
Çizelge 2.2 : Test örneği sayısına göre tahmin süresi çarpanı. **35**
Çizelge 2.3 : Test örneği sayısına göre tahmin süresi çarpanı. **35**
Çizelge 4.1 : Downlight 3 boyutlu modelinin özellikleri. **59**
Çizelge 4.2 : Kanopi 3 boyutlu modelin özellikleri. **59**
Çizelge 4.3 : Armatür ortak parametreleri. **60**
Çizelge 4.4 : Downlight armatür için simülasyon/ölçüm sonuçları karşılaştırması. . **61**
Çizelge 4.5 : Kanopi armatür için simülasyon/ölçüm sonuçları karşılaştırması. **62**
Çizelge 4.6 : Simülasyon yardımı ile hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları. **62**
Çizelge 4.7 : Armatürlerin hesaplanan ve ölçülen ışık akıları. **62**
Çizelge 5.1 : Tek faktörlü ANOVA için örnek sonuçlar matrisi. **68**
Çizelge 5.2 : Tek faktörlü ANOVA için örnek sonuçlar matrisi. **69**
Çizelge 5.3 : Deney tasarımı için seçilen faktörler ve seviyeleri. **77**
Çizelge 5.4 : Simülasyonlar için oluşturulan deney tasarımı ve simülasyon sonuçları. **77**
Çizelge 5.5 : Etkin parametreler seçildikten sonra oluşan ANOVA tablosu. **82**
Çizelge 5.6 : Tüm ısıl simülasyon sonuçları. **87**
Çizelge 5.7 : Regresyon modeli ANOVA tablosu. **91**
Çizelge 5.8 : Ortam sıcaklığının jonksiyon sıcaklığına etkisi. **95**
Çizelge 5.9 : Farklı LED ısıl güçleri için maksimum jonksiyon sıcaklıkları (Tort=25°C). **96**
Çizelge 5.10 : Farklı LED çip ısıl güçleri için BD kartı etkisi. **98**
Çizelge 5.11 : Farklı LED çip ısıl güçleri için gövde malzemesinin jonksiyon sıcaklığı üzerine etkisi. **100**
Çizelge 5.12 : Farklı gövde malzemeleri için maksimum jonksiyon sıcaklıkları. **101**
Çizelge 5.13 : Farklı LED çip ısıl güçlerinde kanatlı/kanatsız alüminyum gövde için maksimum jonksiyon sıcaklıkları. **102**
Çizelge 5.14 : Isıl arabirim malzemesinin farklı LED ısıl güçleri için etkisi. **103**
Çizelge 5.15 : LED ısıl güçlerine karşılık gelen elektriksel güçler ve armatür güç konfigürasyonları. **105**
Çizelge 5.16 : Farklı güç senaryoları için faktörlerin etkileri (25 °C ortam sıcaklığı için). **105**
Çizelge 5.17 : Farklı güç senaryoları için tesisat geometrisi. **106**
Çizelge 5.18 : Farklı güç senaryoları için aydınlatma kalite büyüklükleri. **107**
Çizelge 5.19 : Farklı LED güç senaryoları için farklı BD kartları kullanılarak hesaplanan fotometrik değerler. **109**

Çizelge 5.20 : Farklı LED güç senaryoları için farklı ısıl arabirim malzemeleri kullanılarak hesaplanan fotometrik değerler. **110**
Çizelge 5.21 : Farklı LED güç senaryoları için gövde geometrisinin değişimi ile hesaplanan fotometrik değerler. **111**
Çizelge 5.22 : Farklı gövde malzemeleri için armatür ışık akısı ve armatür etkinlik faktörü değerleri. **112**
Çizelge 5.23 : Farklı güç senaryoları için armatür ışık akısı ve etkinlik faktörü üzerine faktör seviyesi etkileri (T_{ort} = 25°C). **112**

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1 : Farklı jonksiyon sıcaklıklarında 0-2000 saat aralığında test edilen LED'lerin ışık akılarının %50'ye düşme süreleri. **3**
Şekil 1.2 : Farklı soğutma seçenekleri için hazırlanan düzenekler. **4**
Şekil 1.3 : Farklı soğutma seçenekleri için ışık akısı (lm) ve LED modül sıcaklık (°C) değişimleri. **5**
Şekil 1.4 : LED'lerin optik özelliklerinin bağlı olduğu parametreler. **6**
Şekil 1.5 : Makale çalışması için ölçülen LED ışık kaynaklarından örnekler. **7**
Şekil 2.1 : Işık kaynaklarının etkinlik faktörlerinin yıllar bazında değişimi. **16**
Şekil 2.2 : 2012 yılı itibariyle LED'lerin farklı uygulamalardaki kullanım oranları. **17**
Şekil 2.3 : Bölgelere göre LED üretim payları, 2012. ..... **17**
Şekil 2.4 : 2011-2017 yılları arasında LED pazarı projeksiyonu. **18**
Şekil 2.5 : LED'lerin elektronik ve yarıiletken pazarındaki büyümesinin 2040 yılı projeksiyonu. **18**
Şekil 2.6 : LED'lerde ışık üretim prensibi. **19**
Şekil 2.7 : p-n tipi yarı iletken oluşumu. **19**
Şekil 2.8 : Tipik bir LED çipi. **20**
Şekil 2.9 : Farklı yarıiletken malzemeler için baskın dalgaboyları ve CIE renk uzayındaki koordinatları. **21**
Şekil 2.10 : Çip bazlı ve harici fosfor tabaka uygulamaları. **21**
Şekil 2.11 : Kısa dalga boyunda ışık yayan bir LED'in fosfor ile kaplanarak beyaz ışık eldesi. **22**
Şekil 2.12 : Siyah cisim ışımasının CIE renk uzayındaki yeri. **23**
Şekil 2.13 : Farklı beyaz ışık oluşturma yöntemlerien göre üretilen LED spektrumları ve renksel geriverim endeksleri. **24**
Şekil 2.14 : Farklı sürme akımları için jonksiyon sıcaklığına bağlı ömür tahmini. .. **25**
Şekil 2.15 : LED yarıiletkeni. **27**
Şekil 2.16 : Örnek bir LED paketi. **27**
Şekil 2.17 : Örnek LED Dizileri. **27**
Şekil 2.18 : Örnek LED modülleri. **28**
Şekil 2.19 : LED sürücü örnekleri. **28**
Şekil 2.20 : LED ışık motoru. **28**
Şekil 2.21 : LED armatür örnekleri. **29**
Şekil 3.1 : Işık akısı dağılımlarına göre CIE iç aydınlatma armatürleri sınıflandırma sistemi **46**
Şekil 3.2 : Aynasal, izotrop yayınık ve yayınık yansımalar. **48**
Şekil 3.3 : Farklı reflektör yüzeyi örnekleri. **48**
Şekil 3.4 : LED ışık kaynakları için lens örnekleri. **49**
Şekil 3.5 : Yayıcı örnekleri. **49**
Şekil 3.6 : Ekranlama elemanı örneği. **50**

Şekil 4.1 : DELPHI kompakt ısıl model. **56**
Şekil 4.2 : İki-direnç kompakt ısıl model. **57**
Şekil 4.3 : Modelleme için kullanılan armatürler. **58**
Şekil 4.4 : 2D LED kompakt ısıl modeli. **59**
Şekil 4.5 : Çözücü ağ yapısı ve hesaplama domenleri. **60**
Şekil 4.6 : Armatür sıcaklık ölçümleri. **61**
Şekil 4.7 : Armatür sıcaklık ölçüm noktaları. **61**
Şekil 5.1 : Farklı serbestlik derecelerine göre F dağılımları. **70**
Şekil 5.2 : Isıl simülasyonlar için kullanılan örnek LED armatür teknik çizimleri. .. **73**
Şekil 5.3 : Analizlerde kullanılan LED ışık kaynaklı armatür prototipi. **73**
Şekil 5.4 : Örnek modelin eleman listesi. **74**
Şekil 5.5 : Standart ve metal çekirdekli BD kartı katman detayları. **76**
Şekil 5.6 : Tüm faktörler göz önüne alınarak yapılan analizin normal olasılık diyagramı. **79**
Şekil 5.7 : Sadeleştirilmiş modelin yarı normal olasılık diyagramı. **80**
Şekil 5.8 : Temel parametrelerin etki grafikleri. **80**
Şekil 5.9 : Modelde kullanılan parametrelerin ikili etkileşim grafikleri. **81**
Şekil 5.10 : Hata terimlerinin istatistiksel bilgileri. **83**
Şekil 5.11 : Oluşturulan regresyon modeli için temel etki grafikleri. **92**
Şekil 5.12 : Oluşturulan regresyon modeli için ikili etkileşim grafikleri. **92**
Şekil 5.13 : Regresyon analizi için hata terimleri grafiği. **93**
Şekil 5.14 : Ortam sıcaklığına göre farklı LED çip ısıl güçlerinde maksimum jonksiyon sıcaklığının değişimi ($k_{gövde}$=140 W/mK, k_{bd}=5 W/mK, $R_{ıam}$=0,0001 m^2K/W için). **95**
Şekil 5.15 : Farklı ortam sıcaklıkları için LED çip ısıl gücünün jonksiyon sıcaklığı üzerine etkisi ($k_{gövde}$=140 W/mK, k_{bd}=5 W/mK, $R_{ıam}$ = 0,0001 m^2K/W için). **96**
Şekil 5.16 : BD kartı türünün farklı LED çip ısıl güçlerinde maksimum jonksiyon sıcaklığına etkileri ($k_{gövde}$=140 W/mK, $R_{ıam}$=0,0001 m^2K/W, T_{ortam}=25 ºC için). **97**
Şekil 5.17 : Gövde malzemesinin farklı LED çip ısıl güçlerinde maksimum jonksiyon sıcaklığına etkisi (k_{pcb}=5 W/mK, $R_{ıam}$ = 0.0001 m^2K/W, T_{ortam}=25ºC için). **99**
Şekil 5.18 : 25 °C ortam sıcaklığında farklı LED çip ısıl güçleri ve farklı gövde malzemesi için BD kartı türünün maksimum jonksiyon sıcaklığı üzerindeki etkisi ($R_{ıam}$ = 0,0001 m^2K/W için). **100**
Şekil 5.19 : Kanatsız gövde geometrisi. **102**
Şekil 5.20 : 25 °C ortam sıcaklığı için LED çip ısıl gücü, BD kartı türü ve ısıl iletim malzemesinin maksimum jonksiyon sıcaklığı üzerindeki etkisi ($k_{gövde}$=140 W/mK için). **103**
Şekil 5.21 : Hesaplamalarda kullanılan armatürün ışık şiddeti dağılım eğrisi. **107**
Şekil 5.22 : Farklı güç senaryolarının ortam sıcaklığına bağlı etkinlik faktörü değişimleri ($k_{gövde}$=140 W/mK, k_{bd}=5 W/mK, $R_{ıam}$ = 0,0001 m^2K/W için). **108**
Şekil 5.23 : Armatür etkinlik faktörünün, farklı güç senaryolarına göre BD kartı türü ile değişimi ($k_{gövde}$=140 W/mK, $R_{ıam}$ = 0,0001 m^2K/W, T_{ort}=25 °C için). **108**

Şekil 5.24 : Armatür etkinlik faktörünün, farklı güç senaryonlarına göre ısıl arabirim malzemesi ile değişimi ($k_{gövde}$=140 W/mK, K_{bd} = 5 W/mK, T_{ort}=25 °C için). **109**
Şekil 5.25 : Armatür etkinlik faktörünün, kanatlı/kanatsız gövde için farklı güç senaryolarına göre değişimi ($k_{gövde}$=140 W/mK, K_{bd} = 5 W/mK, $R_{ıam}$=0,0001 m^2K/W, T_{ort}=25 °C için). **110**
Şekil 5.26 : Armatür etkinlik faktörünün, farklı gövde malzemeleri için farklı güç senaryolarına göre değişimi (k_{bd} = 5 W/mK, $R_{ıam}$=0,0001 m^2K/W, T_{ort}=25 °C için)..... **111**

LED IŞIK KAYNAKLI ARMATÜR ISIL MODELLENMESİ VE ISIL TASARIMI ETKİLEYEN FAKTÖRLERİN İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

ÖZET

Tüketilen toplam elektrik enerjisi içinde yaklaşık %20 gibi önemli bir paya sahip aydınlatma tesisatlarında gerçekleştirilebilecek tasarruf önlemleri "enerji verimliliği" çalışmalarında üzerinde önemle durulan konular arasındadır. Bu kapsamda, az enerji harcayarak çok ışık üretebilen LED (light emitting diode - ışık yayan diyot) teknolojisi, etkinlik faktörlerinin (lm/W) yüksek olmasının yanı sıra, renksel geriverimlerinin iyileşmesi, farklı renk seçenekleri ve uzun ömürleri gibi özellikleri ön plana çıkarılarak, iç ve dış tesisatlarda genel aydınlatma amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. Diğer yandan yarı iletken teknolojisinde yaşanılan hızlı gelişmeler sonucunda, LED'lerin etkinlik faktörleri sürekli artmaktadır. Ancak, açıklanan etkinlik faktörü değerleri, LED çiplerinin laboratuvar ortamlarındaki anlık çalışma koşulları için geçerlidir. LED'lerin ışık akıları ve ömürlerinin sıcaklık değişimlerinden, konvansiyonel ışık kaynaklarına oranla daha fazla etkilendiği bilinmektedir. Optimum çalışma sıcaklıkları aşıldığında, LED'lerin bozulma, devre dışı kalma oranları da yükselmekte, ışık akıları düşmekte ve renk özellikleri bozulmaktadır. Sonuç olarak, LED ışık kaynakları için açıklanan yüksek etkinlik faktörleri (lm/W) armatür formunda azalmaktadır. Piyasada bir çok LED ışık kaynağı kullanan aydınlatma armatürü bulunmaktadır. Bu armatürler hakkında üretici tarafından yeterli bilgi sağlanamaması, armatürlerin performanslarının yeterli olmaması ve bu konudaki standartların eksikliği nedeniyle, LED'lerin kullanıldığı aydınlatma tesisatları, konvansiyonel ışık kaynaklı olanlara göre iddia edildiği gibi üstün konuma gelememektedir. Fotometrik özelliklerinin belirlenmesinde de sorunlar olan LED'lerin, mevcut iç/dış aydınlatma tesisatlarında kullanılabilmeleri için, öncelikle armatür formunda aydınlatma standartlarında belirtilen aydınlık düzeyi, parıltı, düzgünlük ve kamaşma sınırlandırılması gibi minimum aydınlatma gereksinimlerini yerine getirmeleri gerekmektedir.

Tüm aydınlatma armatürlerinde olduğu gibi LED'li armatürlerde de optik analizler, aydınlatma kalite kriterlerini sağlama bakımından tasarımın en önemli bölümüdür. Ancak, LED'li armatürlerde ışık kaynağının verimi sıcaklığa bağlı olduğu için, ısıl analizler de ön plana çıkmaktadır. Isıl analizler LED çipin monte edildiği baskı devre kartı (BD) ile çevresindeki soğutma elemanları ve armatür gövdesi olmak üzere iki aşamalıdır. LED tarafından üretilen ısının baskı devresi ile soğutma elemanlarından geçerek armatür gövdesi içine aktarımında ve gövde içindeki ısının da dış ortama geçişinde ısıl direncin minimum olması için, soğutucu aksamın tasarlanması gerekmektedir. Özellikle yüksek güçlü LED'lerin kullanıldığı armatürlerde verim, ısıl tasarım ile doğrudan ilişkilidir. LED armatür tasarımında ilk adım kullanılacak LED çipinin iyi analiz edilmesi olmalıdır. LED çiplerin optik-ısıl-elektriksel karakterizasyonu, tasarım aşamasından önce yapılmalı ve tasarım hedefleri buna göre belirlenmelidir. LED çipinin sıcaklığa bağlı olarak verdiği ışık miktarı, verimi, renk

değişimi, optik ve ısıl güçlerinin ayrıştırılması ve çektiği gücün hesaplanması sıcaklık kontrollü ölçüm sistemleri yardımı ile belirlenmelidir. Özellikle LED çipin bilgisayar ortamında ısıl olarak simüle edilebilmesi için ısıl güç değerlerine ihtiyaç vardır. Bunun yanında armatürün etkinlik faktörünün belirlenmesi için de, LED çipin çalışacağı sıcaklıkta harcayacağı elektriksel gücün ve yayacağı ışık akısının bilinmesi gerekmektedir. LED çip karakterize edildikten sonra armatür tasarımı için kullanılacak malzemelerin termofiziksel özelliklerinin bilinmesi veya laboratuvar ortamında ölçülmesi gereklidir. Bir LED armatürü oluşturan LED çip, gövde (gövde malzemesi), baskı devre (BD) kartı, ısıl arabirim malzemesi gibi elemanların termofiziksel özelliklerinin biliniyor olması, simülasyon sonuçlarından uygulamaya geçişte daha doğru sonuçların alınmasını kolaylaştıracaktır. Sonuç olarak, LED'li armatürlerin aydınlatma için gerekli kriterleri sağlayacak optimum performansta çalışabilmeleri için, armatür tipine uygun optik analizlerin yapılması ve istenilen yeterli soğutma çözümlerine ulaşılması gerekmektedir.

Bu tezde öncelikle LED ışık kaynaklarının özelliklerinin sıcaklık ile değişimi incelenmiş, armatür tasarım süreci hakkında bilgi verilmiş ve LED çiplerinin ısıl simülasyonlarında kullanılabilmesi için gerekli ısıl modellerin doğrulanması yapılarak bilgisayar destekli simülasyon süreci açıklanmıştır. Daha sonra LED armatür ısıl tasarımına etki eden gövde malzemesi ve yapısı, baskı devre kartı malzemeleri ve fiziksel özellikleri, ısıl arabirim elemanları, LED ısıl güçleri ve ortam sıcaklığı gibi faktörlerin etkilerinin anlaşılabilmesi için örnek bir yol aydınlatması armatürü üzerinde tam faktöriyel bir deney tasarımı yapılarak istatistiksel analiz gerçekleştirilmiş ve faktörlerin karşılıklı etkileşimleri incelenmiştir. Tez süresince yapılan simülasyon sayısının artması ve bir çok faktör seviyesi ile simülasyonların gerçekleştirilmesi sebebiyle, ikinci bir adım olarak, simülasyon sonuçlarına çok değişkenli doğrusal regresyon uygulanmış; faktör etkileri ve faktörlerin karşılıklı etkileri farklılık analizi (ANOVA – Analysis of Variance) ile istatistiksel olarak hesaplanmıştır. Bu yöntemle LED armatür ısıl tasarımına etki eden faktörlerin etkileri açıklanmış ve örnek bir LED armatür üzerinde ısıl simülasyonlar ve istatistiksel analizler gerçekleştirilerek özellikle LED armatür üreticilerine ve tasarımcılarına, LED armatür ısıl tasarım süreci hakkında yol gösterici bilgiler oluşturulması hedeflenmiştir.

THERMAL MODELLING AND STATISTICAL INVESTIGATION OF FACTORS THAT EFFECTS THERMAL DESIGN OF LED LIGHT SOURCE BASED LUMINAIRES

SUMMARY

Saving measures that can be realized in lighting installations with a significant share of about 20% in the total electricity consumed are among the issues emphasized in "energy efficiency" studies. In this context, LED (light emitting diode) technology, which can produce light by consuming less energy, has high efficacy factors (lm/W) and also has advantages such as high color rendering indexes, different color options, long life, started to be used for lighting purposes. On the other hand, the efficacy factors of LEDs are constantly increasing as a result of rapid developments in semiconductor technology. However, the announced efficacy factor values apply to the instantaneous operating conditions of the LED chips in the laboratory environment. It is known that the LED's light fluxes and lifetimes are much more affected by temperature variations than conventional light sources. When the optimum operating temperatures are exceeded, the LED's catastrophic failure ratios increase, the light intensity drops and the color characteristics deteriorate. As a result, the high efficacy factors (lm/W) announced for LED light sources are greatly reduced in the form of a luminaire. There are many luminaires in the market that use LED light sources. Due to the lack of technical information from the manufacturer, poor quality of the luminaires and and the lack of standards in this regard, the lighting installations in which the LEDs are used can not be in the superior position compared to conventional light sources as claimed. In order to be used in existing indoor/outdoor lighting installations; LEDs, which are still having problems in measurements of photometric quantities, are required to fulfill minimum lighting requirements such as illuminance, luminance, homogenity and glare limitation specified in lighting standards, in the form of a luminaire.

The research on LEDs which are utilized in different areas continues for a long time. Most of the published work is about the LED's internal characteristics, production techniques and the use of different materials as semiconductors. As the LEDs gradually penetrate into lighting sector, the research focus shifted from prodction techniques to increasing performance, improving lighting characteristics, measuring thermal performance etc.

Like in all lighting luminaires, optical analysis is the most important part of design for ensuring lighting quality criteria in LED luminaires. However, since the light source in LED luminaires is highly dependent on the temperature, thermal analyzes are also crucial. The thermal analyzes are carried out in two stages, the printed circuit board (PCB) on which the LED chip is mounted and the cooling elements and luminaire surroundings. In order to transfer heat in the luminaire through the cooling elements by the heat dissipated by the LED and to minimize the thermal resistance in the heat

transfer inside the body, the cooling elements must be designed thoroughly. Especially for luminaires where high power LEDs are used, the efficiency is directly related to the thermal design. Depending on the type and power of the luminaire, thermal performance may greatly affect the overall luminaire performance. It is more difficult to transfer dissipated heat from the LED light sources for the luminaires with high Ingres Protection Class (IP) since the luminaires are water and dust proof whereas easier for the luminaires with low IP class.

The first step in designing an LED luminaire should be a good analysis of the LED chip to be used. The optical-thermal-electrical characterizations of the LED chips must be done before the design phase and the design targets should be determined accordingly. The amount of light emitted by the LED chip depending on the temperature, the efficiency, the color change, the measurement and calculation of the optical, thermal powers and electrical power must be determined with the help of a temperature controlled measurement system. In particular, thermal power values are required for the LED chip to be thermally simulated in a computer environment. In order to determine the efficiency factor of the luminaire, it is necessary to know the electrical power and luminous flux of the LED chip for the working temperature. Usually the optical-thermal-electrical properties of the LED light sources are not given in the data sheets. Especially the luminous efficiency value is the essential part of the thermal simuation since the thermal power of the LED is calculated from this value.

After characterizing the LED chip, the thermophysical properties of materials used for luminaire design must be known or measured in a laboratory environment. The accurate thermophysical properties of elements such as LED chip, body (body material), printed circuit board card (PCB) and thermal interface materials that make up an LED base luminaire will yield to get more accurate results in the transition from simulation results to application phase. The simulation software usually contains a library which the accurate thermophysical materials can be found. It is important to match the actual materials used to library materials accurately to reduce error.

As a result, it is necessary to make optical analyzes according to the type of luminaire and optimize the required cooling solutions so that the luminaires with LED light sources can work with optimum performance to meet the necessary criteria for illumination.

In the thesis, firstly the change of the properties of the LED light sources is investigated in the laboratory using a temperature controlled Ulbricht Sphere. For different temperatures the optical-mechanical-electrical characterization of the LEDs are shown. Then the luminaire design process is eloborated in detail and the computer aided simulation process is explained by verifying the thermal models required for the LED chips to be used in the thermal simulations. Two sample luminaires are chosen and then the compact thermal model used to characterize LED thermal models are validated using simulation results and laboratory measurements. Also photometric measurements are done and compared to predicted values using simulation results and catalog values. In order to investigate the effects of mechanical components, a statistical analysis is performed by designing a full factorial experiment on a sample road lighting luminaire prototype to understand the effects of factors such as body material, printed circuit board materials and physical properties, thermal interface elements, LED thermal power and ambient temperature and interactions between factors on a LED luminaire thermal design. A statistical software package is used to compare and calculate factor effects and interactions. After the preliminary analysis,

simulations are carried out with many factor levels. Because of the increase in the number of simulations made during the research, as a second step, a multi variable linear regression model is applied to the simulation results. Factor effects and the interactions of these factors were statistically calculated by ANOVA (Analysis of Variance). Then using the multivariable regression model and the catalog values of the LEDs used in the luminaire, the photometric performance of the luminaire for different factor levels is investigated for different LED thermal power levels.

Using a statistical regression model, the effects of the factors affecting the LED luminaire thermal design are explained and thermal simulations and statistical analyzes are performed on a sample LED luminaire, aiming to provide guidance about the LED luminaire thermal design process, especially to LED luminaire manufacturers and designers.

1. GİRİŞ

Tüketilen toplam elektrik enerjisi içinde yaklaşık %20 gibi önemli bir paya sahip aydınlatma tesisatlarında gerçekleştirilebilecek tasarruf önlemleri "enerji verimliliği" çalışmalarında üzerinde önemle durulan konular arasındadır. Bu kapsamda, az enerji harcayarak çok ışık üretebilen LED (ışık yayan diyot) teknolojisi, etkinlik faktörlerinin (lm/W) yüksek olmasının yanı sıra, renksel geriverimlerinin iyileşmesi, farklı renk seçenekleri ve uzun ömürleri gibi özellikleri ön plana çıkarılarak, iç ve dış tesisatlarda genel aydınlatma amaçlı kullanılmaya başlanmıştır. Diğer yandan yarı iletken teknolojisinde yaşanılan hızlı gelişmeler sonucunda, LED'lerin etkinlik faktörleri sürekli artmaktadır. Ancak, açıklanan etkinlik faktörü değerleri, LED çiplerinin laboratuvar ortamlarındaki anlık çalışma koşulları için geçerlidir. LED'lerin ışık akıları ve ömürlerinin sıcaklık değişimlerinden, konvansiyonel ışık kaynaklarına oranla daha fazla etkilendiği bilinmektedir [1]. Optimum çalışma sıcaklıkları aşıldığında, LED'lerin bozulma, devre dışı kalma oranları da yükselmekte, ışık akıları düşmekte ve renk özellikleri bozulmaktadır. Sonuç olarak, LED ışık kaynakları için açıklanan yüksek etkinlik faktörleri (lm/W) armatür formunda azalmaktadır. Piyasada birçok LED ışık kaynağı kullanan aydınlatma armatürü bulunmaktadır. Bu armatürler hakkında üretici tarafından yeterli bilgi sağlanamaması, armatürlerin performanslarının yeterli olmaması ve bu konudaki standartların eksikliği nedeniyle, LED'lerin kullanıldığı aydınlatma tesisatları, konvansiyonel ışık kaynaklı olanlara göre iddia edildiği gibi üstün konuma gelememektedir. Fotometrik özelliklerinin de belirlenmesinde sorunlar olan LED'lerin, mevcut iç/dış aydınlatma tesisatlarında kullanılabilmeleri için, öncelikle armatür formunda aydınlatma standartlarında belirtilen aydınlık düzeyi, parıltı, düzgünlük ve kamaşma sınırlandırılması gibi minimum aydınlatma gereksinimlerini yerine getirmeleri gerekmektedir.

Tüm aydınlatma armatürlerinde olduğu gibi LED'li armatürlerde de optik analizler, aydınlatma kalite kriterlerini sağlama bakımından tasarımın en önemli bölümüdür. Ancak, LED'li armatürlerde ışık kaynağının verimi sıcaklığa bağlı olduğu için, ısıl analizler de ön plana çıkmaktadır. Isıl analizler LED çipin monte edildiği baskı devresi

(BD) kartı ile çevresindeki soğutma elemanları ve armatür gövdesi olmak üzere iki aşamalıdır. LED tarafından üretilen ısının baskı devresi ile soğutma elemanlarından geçerek armatür gövdesi içine aktarımında ve gövde içindeki ısının da dış ortama geçişinde ısıl direncin minimum olması için, soğutucu elemanların iyi tasarlanması gerekmektedir. Özellikle yüksek güçlü LED'lerin kullanıldığı armatürlerde verim, ısıl tasarım ile doğrudan ilişkilidir.

Sonuç olarak, LED'li armatürlerin aydınlatma için gerekli kriterleri sağlayacak optimum performansta çalışabilmeleri için, armatür tipine uygun optik analizlerin yapılması ve yeterli soğutma çözümlerine ulaşılması gerekmektedir.

1.1 LED Işık Kaynaklarının Karakteristik Özelliklerine Sıcaklığın Etkisi

Değişik alanlarda kullanılan LED'ler ile ilgili çalışmalar uzun süredir devam etmektedir. Yayınlanan çalışmaların çoğu LED'lerin iç özellikleri, üretim teknikleri ve farklı malzemelerin yarı iletken olarak kullanılması üzerinedir. Son 10 yıl içinde LED'lerin yavaş yavaş aydınlatma sektörüne girmesiyle çalışmalar, LED'lerin performanslarının arttırılması, ışık özelliklerinin iyileştirilmesi, ısıl performanslarının ölçülmesi v.b. gibi alanlara yönelmiştir. Aşağıda aydınlatma amaçlı kullanılan LED'lerin sıcaklıktan etkilenmeleri konusunda yapılmış bazı çalışmalardan örnekler verilmiştir.

James Petroski 2006'da LED'lerin soğutma sorunları ile ilgili yaptığı çalışmada, konvansiyonel ışık kaynaklarıyla LED ışık kaynaklarını ısı kayıp mekanizmalarına göre karşılaştırmıştır [2].

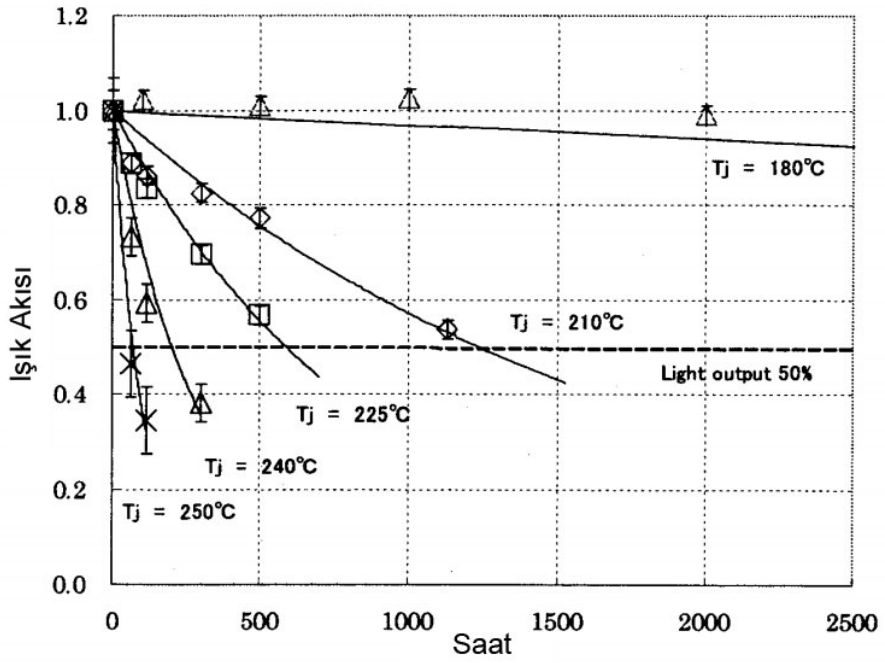
Çizelge 1.1 : Örnek ışık kaynaklarının ısı transfer mekanizmalarının karşılaştırılması.

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

Çizelge 1.1'den de görüldüğü üzere, LED'lerin ısı transfer mekanizmaları diğer ışık kaynaklarından farklıdır. Konvansiyonel ışık kaynakları üretilen ısıyı genel olarak radyasyon ile çevre ortama verdikleri için bütün sistemler radyasyonu temel alacak şekilde tasarlanmaktadır. Diğer taraftan, LED'ler ürettikleri ısıyı iletim yoluyla dışarı

transfer etmek zorundadırlar. Bu farklılık LED'ler ile çalışacak sistemler tasarlanırken farklı seçeneklerin düşünülmesi gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. LED'lerde üretilen ısıyı dışarı atabilmek için "ısıl" bir patika (yol) çizmek gereklidir. Bu yüzden LED'ler için armatür tasarımında, konvansiyonel ışık kaynaklarında bilinenlerin dışında, ısı iletimini ön plana çıkaracak tasarımlarla söz konusu sorunların çözülmesi gerekmektedir. Bu da LED'lerin soğutulmasında elektronik elemanlar gibi soğutucu kullanılmasını ve bu soğutucuların ısıl yönden optimizasyonunu şart koşmaktadır.

Ishizaki, Kimura ve Sugimoto, 2007 yılında yayınladıkları çalışmalarında, beyaz LED'leri yüksek sıcaklıklarda çalıştırarak ışık akılarının %50'ye düştüğü süreleri incelemişlerdir [3]. Yüksek akımlarda çalıştırılan LED'lerde ısınma ve güçlü elektriksel alanlar oluşması nedeniyle; elektrodlarının erimesi, noktasal hataların artması ve malzemelerin bozulması gibi sorunlarla karşılaştıklarını belirtmişlerdir. Ayrıca kullanılan fosforun, yayılan fotonları yutarak karardığını ve yapısının değiştiğini gözlemlemişlerdir. LED çiplerinin altına bir Peltier elemanı yerleştirip termo-elektrik soğutma ile sıcaklığı ayarlayarak, 2000 saat sonunda elde ettikleri sonuçlar Şekil 1.1'de verilmiştir. Şekil 1.1'den görüldüğü gibi jonksiyon sıcaklığı (T_j) arttıkça ışık akısı düşmektedir.



Şekil 1.1 : Farklı jonksiyon sıcaklıklarında 0-2000 saat aralığında test edilen LED'lerin ışık akılarının %50'ye düşme süreleri.

Kıyak ve arkadaşları tarafından yapılan çalışmada, bir LED modülü için farklı soğutma seçenekleri kullanılan düzeneklerin, ışık akıları ile lehim sıcaklıklarının değişimleri zamana bağlı olarak gözlemlenmiştir [4]. Deney için kullanılan düzenekler Şekil 1.2'de gösterilmiştir.



Şekil 1.2 : Farklı soğutma seçenekleri için hazırlanan düzenekler.

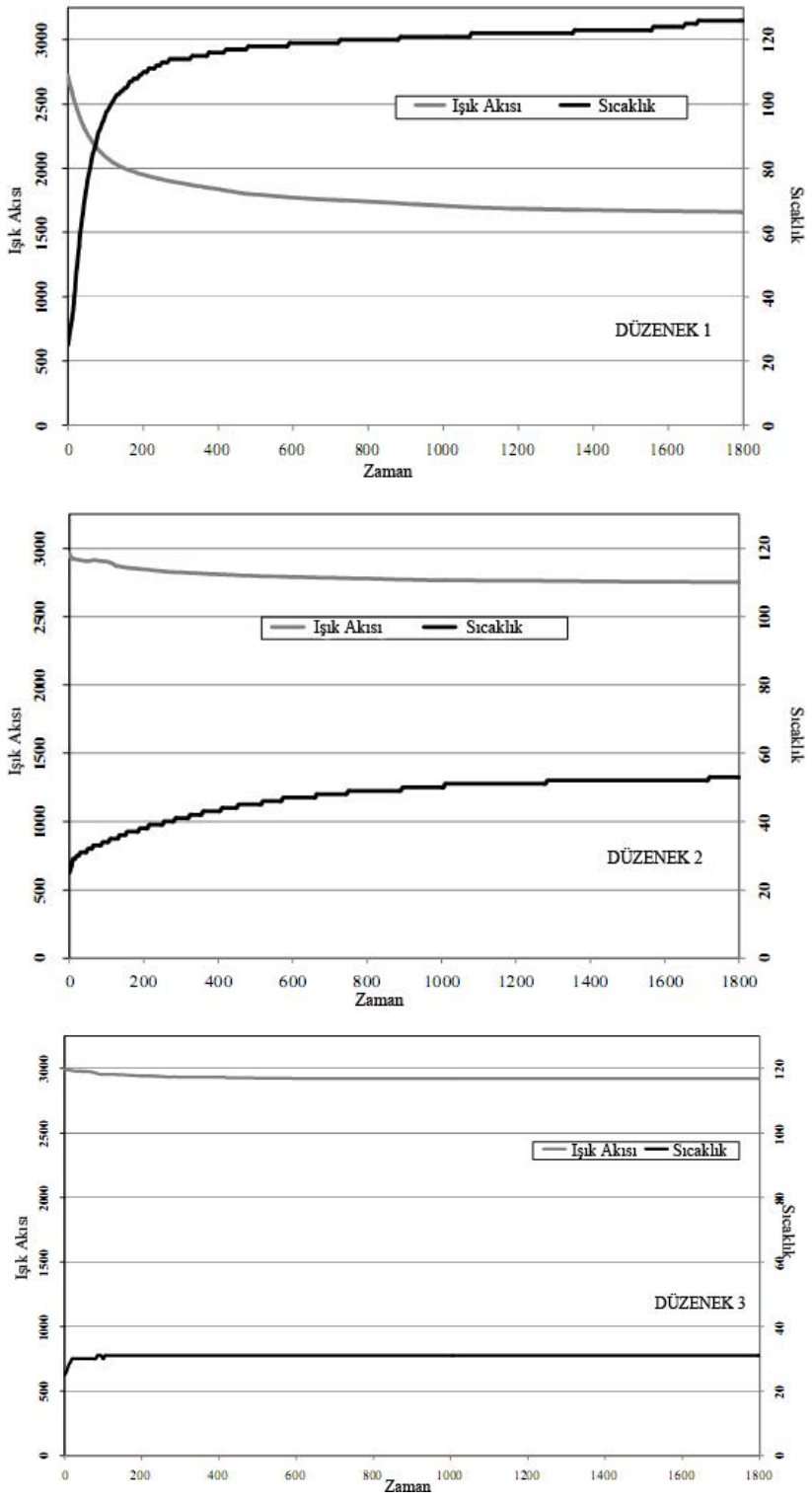
İlk düzenekte çıplak olarak modül sıcaklığı ve ışık akısı ölçülmüş, ikinci olarak modülün üzerine bir soğutucu blok yerleştirilmiş ve son olarak da modülün üzerine soğutucu blok ve aktif bir fan yerleştirilerek ölçümler tekrarlanmıştır. Yapılan ölçümlerde üç düzenek için elde edilen sonuçlar Şekil 1.3'te verilmiştir.

Yapılan çalışmanın sonucunda Şekil 1.3'ten görüldüğü gibi, çıplak olarak kullanılan LED modülü, deney süresince 5 katı kadar yüksek bir sıcaklığa çıkmış ve ışık akısı %56 azalmıştır. Düzenek 2'deki LED modülü 2,3 kat sıcaklığa ulaşmış ve ışık akısı %11 oranında düşmüştür. Düzenek 3'teki aktif sistemin sıcaklığı ise 1,25 kat artarken, ışık akısı sadece %2,5 azalmıştır.

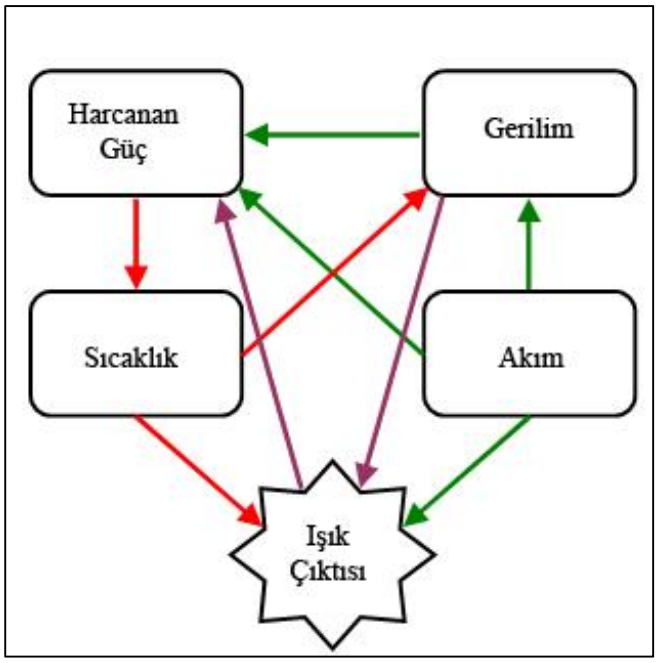
Isıl ve elektronik devre simülasyon programları üreten bir şirket olan Mentor Graphics'ten Andras Poppe ve Philips Araştırma Laboratuvarı'ndan J.M. Lasance 2009 yılında yaptıkları çalışmada, LED'lerin ısıl standardizasyonuna değinmişlerdir. LED'lerin jonksiyon sıcaklığının bir performans göstergesi olarak kullanıldığını, LED'lerin ışıksal özelliklerinin çoğunun jonksiyon sıcaklığına bağlı olduğunu ve bu yüzden jonksiyon sıcaklığının aydınlatma çözümlerinde kilit rol oynadığını ifade etmişlerdir [5]. Ayrıca LED'lerin ışık akılarının bu değişkenin dışında, harcanan güce, gerilime ve akıma da bağlı olduğunu belirtmişlerdir (Şekil 1.4). LED'lerin bozulmasına ve performanslarının düşmesine neden olan en önemli sorunlar aşağıdaki gibi sıralanmıştır:

- Fosfor tabakasının bozulması,
- Lensin bozulması,

- Yapıştırıcı tabakaların bozulup ayrışması,
- Lehimli bölgelerin bozulması.



Şekil 1.3 : Farklı soğutma seçenekleri için ışık akısı (lm) ve LED modül sıcaklık (°C) değişimleri.

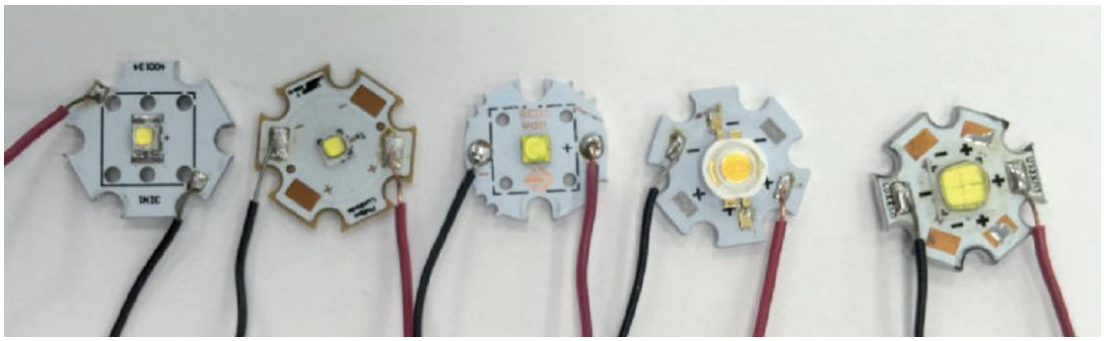


Şekil 1.4 : LED'lerin optik özelliklerinin bağlı olduğu parametreler.

Grabner-Meyer LED'ler için ısıl standartlar hazırlanırken ANSI (American National Standards Institute), IESNA (Illuminating Engineering Society of North America), CIE (Commission Internationale de L'éclairage), NIST (National Institute of Standards and Technology) gibi kuruluşlar yerine, elektronik elemanlar ile tecrübesi olan ve uzun süredir standardizasyonunu sağlayan JEDEC'in (Solid State Technology Associations) bu işi üstlenmesi gerektiğini düşünmektedir [6]. Yazar LED ile üretilen ürünlerin güvenilirliklerinin az olmasının temel nedenlerini aşağıdaki gibi açıklamıştır:

- Ürün katalogları, gerçek kullanım koşullarını yansıtmamaktadır. Genelde 25°C jonksiyon sıcaklığındaki veriler kullanılmaktadır. Gerçek uygulamalarda etkinlik faktörleri %50 oranlarında daha düşük olabilmektedir.
- Standart bir gösterim olmadığı için firmalar arası verilerin içerikleri farklı olmaktadır.
- Genelde ürünler arasında direkt karşılaştırma yapılamamaktadır.
- Gerçek koşulları düşünerek tasarım yapmak zordur ve uzmanlık gerektirmektedir.
- Üreticilerin sağladığı sıcaklığa bağlı olarak ışık akısı verilerinin elde edilme biçimi sorgulanmalıdır.

Tez süresince, LED çiplerine sıcaklığın etkisinin daha iyi anlaşılması için bir çok LED ışık kaynağı, İstanbul Teknik Üniversitesi Enerji Enstitüsü bünyesindeki Enerji Verimliliği ve Aydınlatma Tekniği Laboratuvarı'nda [7] bulunan 1 metre çapındaki Labsphere marka sıcaklık kontrollü Ulbricht Küresi [8] kullanılarak ölçülmüş ve bulgularla 2016 yılında bir makale yayınlanmıştır [1]. Piyasadan temin edilen 24 adet farklı nominal sürme akımına ve ışık rengine sahip yüksek güçlü LED ışık kaynağı, farklı sıcaklıklarda ölçülmüştür. LED'lerin 11 tanesinin nominal sürme akımı 350 mA, 10 tanesinin nominal sürme akımı 700 mA ve kalan üç tanesinin nominal sürme akımları sırasıyla 200, 270 ve 400 mA'dir. Ölçümler sonucunda her LED ışık kaynağı için farklı sıcaklıklardaki optik-ısıl-elektriksel güçler, verim, ışık akısı, etkinlik faktörü ve renk özellikleri belirlenmiştir. Örnek LED ışık kaynakları Şekil 1.5'de gösterilmektedir.



Şekil 1.5 : Makale çalışması için ölçülen LED ışık kaynaklarından örnekler.

LED ışık kaynakları sıcaklık kontrollü bir plaka üzerinde ölçülerek 25-75 °C plaka sıcaklıklarındaki özellikleri belirlenmiştir. Ölçülen ışık kaynaklarının 20 tanesi LED tekil çip, dört tanesi çoklu-çip'e sahiptir. LED'ler üç farklı akım kademesinde ölçülerek nominal akımın altındaki ve üzerindeki akımlardaki performans değerleri de belirlenmiştir. 25 °C plaka sıcaklığı değeri referans değer kabul edilip, performans karakteristiklerinin bağıl farkları hesaplanmıştır. 50 °C sıcaklık farkının LED performansına etkilerinin araştırıldığı bu çalışmanın sonuçları aşağıda özetlenmiştir:

- Elektriksel Güç [W]: 350 mA nominal akıma sahip LED'ler için elektriksel güçteki maksimum ve minimum farklar %2,2 ve %5,3; 700 mA nominal akıma sahip LED'ler için ise %1,9 ve %4,2 olarak ölçülmüştür. 50 °C sıcaklık farkının yaklaşık maksimum %5 güç farkı oluşturabildiği görülmüştür.
- Optik Güç [W]: 350 mA nominal akıma sahip LED'ler için, farklı akım kademelerindeki (175, 350 ve 530 mA) minimum ve maksimum optik güç

farkları sırasıyla %4,9 ve %8,3; %5,2 ve %10,8; %6,1 ve %12,5 olarak ölçülmüştür. Aynı değerler 700mA nominal sürme akımına sahip LED'ler için farklı akım kademelerinde (350, 700, 1000 mA) sırasıyla %4,0 ve %9,7; %6,3 ve %12,4; %8,9 ve %19,9 olarak ölçülmüştür. 350 ve 700mA nominal akıma sahip LED'lerin sıcaklığın artmasıyla yaydıkları optik gücün azaldığı ve özellikle yüksek sürme akımında %20'ye kadar değer kaybedebildiği belirlenmiştir. Armatür ışık akısı hesaplanırken çoğu katalogda ışık akısı değerlerinin 25°C ortam sıcaklığında verildiği, yüksek sıcaklıklar için geçerli değerlerin verilmediği düşünüldüğünde ve LED ışık kaynaklarının ışık akılarının %20'ye kadar düşebildiği gözönüne alındığında, katalog verileri ile gerçekleştirilen yüksek güçlü LED armatür tasarımlarının hesaplanan değerlerden yüksek miktarlarda sapabileceği ve bu nedenle kullanılacak LED'lerin özelliklerinin gerçek sıcaklıklara göre belirlenmesi gerektiği ortadadır.

- Isıl Güç [W]: 350 mA nominal sürme akıma sahip LED'ler için farklı sıcaklık kademelerindeki minimum ve maksimum farklar sırasıyla %0,2 ve %3,1; 700 mA LED'ler için ise bu farklar %0,3 ve %1,9 olarak hesaplanmıştır. Diğer akım kademeleri için de bu farklar birbirine yakındır. Optik, elektriksel ve ısıl güçler gözönüne alındığında sıcaklık farkının etkisinin en çok görüldüğü alan optik güç olmaktadır. Isıl gücün ve elektriksel gücün sıcaklık ile büyük oranda değişmediği söylenebilir.
- Verim [%]: Optik gücün, elektriksel güce oranı olarak tanımlanan verim değerleri, farklı sürme akımlarında ölçülmüştür. 350 mA nominal sürme akımına sahip LED'ler için farklı akım kademelerinde (175, 350, 530mA) minimum ve maksimum verim düşümleri sırasıyla %2,2 ve %5,6; %2,8 ve %8,5; %3,9 ve %11,0; 700 mA nominal sürme akımına sahip LED'ler için farklı akım kademelerinde (350, 700, 1000 mA) bu değerler %1,2 ve %7,5; %3,7 ve %9,9; %6,1 ve %18,1 olmuştur. Özellikle yüksek güçlerde verim daha fazla düşmektedir. 1000 mA'de sürülen LED'ler göz önüne alındığında, verim düşümünün minimum ve maksimum değerleri arasında oldukça fazla fark olacağı anlaşılmaktadır. Bu da bazı LED ışık kaynaklarının sıcaklık değişiminden yaklaşık 3 kat fazla etkilenebileceğini göstermektedir. Dolayısıyla, LED armatür tasarımında hedef değerlere ulaşılabilmesi için LED

ışık kaynaklarının doğru seçimi de çok önemlidir. LED'lerin farklı sıcaklıklardaki verim değerleri mutlaka hesaplanmalıdır. Üretici kataloglarında bulunmayan bu değer armatürün etkinlik faktörünü de etkileyecektir.

- Işık Akısı [lümen]: 350 mA ile sürülen LED'lerin farklı akım kademelerindeki minimum ve maksimum lümen düşüş yüzdeleri sırasıyla %6,1 ve %10,0; %6,3 ve %12,0; %7,5 ve %14,6 olarak ölçülmüştür. 700 mA nominal sürme akımına sahip LED'ler için bu değerler sırasıyla %3,8 ve %11,6; %5,7 ve %13,9; %8,0 ve %21,3 olarak bulunmuştur. LED armatürün gerçek çalışma koşullarındaki ışık akısı hesaplanmak istendiğinde, katalog değerleri ile yüksek sıcaklıklardaki ışık akısı değerleri –özellikle yüksek sürme akımlarında- büyük miktarlarda değişebilmektedir. Değişik LED'ler için ışık akısı düşümleri arasındaki fark da değişmektedir. Özellikle yüksek ortam sıcaklıklarında çalışacak armatürler için LED ışık kaynağı seçiminin dikkatli yapılması gerekmektedir.
- Etkinlik faktörü [lm/W]: Etkinlik faktörü birim güç başına üretilen ışık akısı olarak tanımlanmaktadır. 350 mA nominal sürme akımına sahip LED'ler için farklı akım kademelerinde minimum ve maksimum etkinlik faktörü düşümleri sırasıyla %3,4 ve %7,8; %3,9 ve %10,0; %5 ve %13,1'dir. 700 mA nominal sürme akımına sahip LED'ler için bu değerler sırasıyla %1,0 ve %9,4; %3,1 ve %11,7; %5,7 ve %19,5 olarak ölçülmüştür. Diğer yandan LED'lerin aydınlatma sektörüne girmesiyle birlikte, etkinlik faktörü birimi olan lümen/Watt değişim geçirerek lpw birimi oluşmuş (lümen per Watt) ve literatürde de kullanılmaya başlanmıştır. Ölçüm sonuçlarından da görüldüğü gibi kullanılan LED çipinin etkinlik faktörünün sıcaklık ile azalma oranı, özellikle yüksek güçlerde daha da artmaktadır. Katalog değerleri ile oluşturulan hedef değerler göz önüne alındığında, bu değerlerde yüksek miktarlarda sapmalar olabileceği görülmektedir.
- Renk Sıcaklığı [K]: Işık kaynaklarının kullanıldıkları ortamda yarattıkları renk izlenimlerini belirleyen renk sıcaklığı değerinin, sıcaklık ile değişimi farklı LED'ler için farklı ölçülmüştür. 350 ve 700 mA nominal akıma sahip LED'ler için, 50 °C sıcaklık farkında renk sıcaklığı değişimleri %0 ile %15 arasında değişmiştir. Özellikle belirli bir renk sıcaklığı için yapılan tasarımlarda, sıcaklığın değişimi ile hedeflenen renk değerlerinin çok dışına çıkılabildiği

görülmüştür. Rengin önemli olduğu tasarımlarda bu durum göz önüne alınmalıdır.

- Renksel Geriverim Endeksi: Bir ışık kaynağının renkleri doğru gösterebilme özelliği olarak tanımlanabilen renksel geriverim endeksi için yapılan ölçümlerde, 350 ve 700 mA nominal akıma sahip LED'ler için minimum ve maksimum değişimler %0-%4,9 arasında olmuştur. Rengin önemli olduğu uygulamalarda, seçilen LED'in sıcaklık ile renk özelliklerinin değişmediğinden emin olunmalıdır.

Gerçekleştirilen ölçüm sonuçlarından özellikle yüksek güçlü LED armatür tasarımlarında, sıcaklık değişim etkilerinin iyi araştırılması gerektiği anlaşılmaktadır. Yapılan çalışmada LED çip özelliklerinin, sıcaklık değişimi ile büyük miktarlarda değişebildiği görülmüştür. Armatür tasarımı yapılmadan önce mutlaka LED ışık kaynağı, armatür içinde olası farklı sıcaklıklarda ölçülmeli ve bu sıcaklıklardaki özellikleri belirlenmelidir. Sadece katalog verileri ile gerçekleştirilen tasarımlarda, sıcaklık artışı sebebiyle hedeflere ulaşmak mümkün olmayabilmektedir.

LED ışık kaynaklarının genel aydınlatmadaki kullanımlarının giderek artacağı tahmin edilmektedir. Günümüzde birçok firma LED çipler kullanarak armatürler geliştirmektedir. Fakat standartlar olmadan üretilen bu armatürleri uzun yıllardır kullanılan konvansiyonel armatürler ile karşılaştırmak doğru değildir. Diğer yandan LED üreticilerinden gerçek koşullara uygun ısıl veriler alınmadan tasarım yapmak da mümkün değildir. LED ısıl verileri tasarımda güvenilirlik, ömür tayini ve standartlara uygun bir aydınlatma için gereklidir. Bu süreçlerin iyi yönetilmesi, ısıl standartların kısa sürede geliştirilmesi, verilerin sunumuna bir düzen getirilmesi ve düzgün ar-ge çalışmaları ile desteklenmesi, başarılı ürünlerin piyasaya çıkmasını ve LED'lere biçilmiş rolün en iyi şekilde yerine getirilmesini sağlayacaktır.

1.2 Tezin Amacı

Bu teze başlarken gerçekleştirilen literatür araştırması ve laboratuvar ölçümleri sonucunda LED ışık kaynaklarının karakteristik özelliklerinin (ışık akısı, etkinlik faktörü, renk, elektriksel özellikler) sıcaklık ile değiştiği ortaya konulmuştur. Özellikle yüksek güçlü LED ışık kaynaklı armatürlerde sıcaklığın armatür performansını değiştireceği ortadadır. Bu etki, dış koşullara dayanıklı olması için tamamen kapalı

formda üretilen yol aydınlatması gibi uygulamalardaki armatürlerde daha da kritik olacaktır. Bu bilgiler ışığında, tezde armatür performansını ve maliyetini etkileyecek ısıl tasarımın incelenmesi, etkili olacak faktörlerin ve bunların etki derecelerinin belirlenmesi amaçlanmıştır. Faktör sayısı ve değerleri çok fazla olduğu için tezde az sayıda deneysel sonuçla genele gidilmesini sağlayacak yöntemler kullanılarak analizlerin gerçekleştirilmesi, elde edilen sonuçların literatüre, LED armatür üreticilerine ve tasarımcılarına armatür ısıl tasarım süreçlerinde yol gösterici bilgiler oluşturması hedeflenmiştir.

2. IŞIK YAYAN DİYOTLAR (Light Emitting Diodes – LED)

Bu bölümde LED ışık kaynaklarının tarihçesinden, aydınlatma içindeki yerinden, çalışma prensibinden, renk özelliklerinden, performanslarının belirlenmesi ve özelliklerinin ölçümleri için kullanılan standartlardan bahsedilecektir.

2.1 LED'lerin Tarihçesi

Yirminci yüzyılın başında, cisimlerin içinden elektrik akımı geçirilmesi veya güçlü bir elektrik alan içinde bulundurulması sonucu ışık yaymaları olarak nitelendirilen elektro-lüminesan kavramı ortaya atılmıştır [9]. Elektro-lüminesan oda sıcaklığında da gerçekleşebildiği için temel olarak ısıl ışık üretiminden, yani bir maddenin yüksek sıcaklıklara getirilerek ışımasından farklıdır.

1891 yılında Eugene G. Acheson kok ve silisyum dioksit'i (SiO_2) birlikte ısıtarak, silisyum karbür (SiC) olarak bilinen malzemeyi sentezlemeyi başarmıştır [10]. 1907 yılında Henry Joseph Round silisyum karbürün farklı alanlarda kullanılabilirliğini araştırmak için deneyler yapmıştır. Round, yaptığı deneylerde silisyum karbür üzerinden akım geçirerek sarı renkte ışık elde etmiş, bu buluş ile ilk LED kavramı ortaya çıkmıştır. Round bu keşfini 1907 yılında "Electrical World" dergisinde yayınlamıştır [11].

Lossev, 1928 yılında yaptığı çalışmada, farklı malzemelerden üretilmiş diyotların pozitif ve negatif uçlarına, elektrik kaynağının pozitif ve negatif uçlarını iki farklı şekilde bağlayarak (negatif/negatif veya negatif/pozitif), lüminesan ışık elde edildiğini gözlemlemiştir. Lossev, üretilen ışığın ısıl yolla üretilip üretilmediğini anlamak için, ışıyan yüzey üzerine sıvı benzen dökerek, benzenin buharlaşma hızına bakmış; benzenin çok yavaş buharlaştığını görerek ışık üretiminin ısıl olarak gerçekleşmediği sonucuna varmıştır [12].

Pratik kullanıma uygun ilk LED'ler Nick Holonyak tarafından 1962 yılında General Electric bünyesinde Galyum, Arsenik ve Fosfor (GaAsP) kullanılarak üretilmiştir (Nick Holonyak, 23 Nisan 2004'te Washington D.C.'de gerçekleştirilen bir törenle

LED'lerin mucidi kabul edilmiş ve 500.000 dolar ödüle layık görülmüştür). Bünyesinde GaAsP bulunan LED'ler ile görünür spektrumun kırmızı bölgesinde ışık üretilebilmiştir. Ancak fiyatlarının yüksek olması nedeniyle üretim hacimleri düşük miktarlarda kalmıştır. Gelinen noktada ticari olarak üretilen ilk LED'ler, 0,001 lümen ışık akısında kırmızı ışık yayabilmişlerdir. LED'lerin ilk ticari uygulamaları olarak da elektronik göstergeler ve hesap makineleri gösterilebilir. Işık akıları çok düşük olduğundan, ilk LED'lerin aydınlatma için kullanılmaları mümkün olmamıştır. 1985 yılına kadar, ışık akıları 100 mililümenleri geçmeyen LED'ler, küçük sinyal uygulamaları dışında kullanım alanları bulamamıştır. 1960'ların sonlarına doğru, silisyum karbür filmlerin üretimleri geliştirilerek mavi LED'ler üretilebilmiştir. İlk üretilen mavi LED'lerin ışıksal verimleri, yani elektrik enerjisini ışık enerjisine dönüştürme oranları yaklaşık olarak %0.005 civarında olduğu için gelişim gösterememiş ve üretimlerine uzun süre ara verilmiştir. 17 yıl süren araştırmalar sonunda gelinen noktada, en iyi SiC LED, 470 nm'de mavi ışık üretmiş ve ışıksal verimi en fazla %0,03'lere ulaşabilmiştir [13].

1985 sonrasında ilk yüksek parlaklığa sahip LED, Japon Nichia firmasında çalışan Shuji Nakamura tarafından İndiyum Galyum Nitrit (InGaN) kullanılarak, mavi renkte üretilmiştir. Nakamura bu buluşuyla, 2006 Milenyum Teknoloji ödülünü ve 2014 Fizik Nobelini almıştır. Yüksek ışık akılarına sahip mavi LED'lerin üretilmesi ile beyaz LED'ler için ilk adımlar atılmıştır. Günümüzde aydınlatma amaçlı kullanılan beyaz LED'ler hızla gelişmekte ve fiyatları da ucuzlamaktadır. 1999 yılında, Lumileds firması 1 watt güçte sürekli olarak çalışabilecek LED'leri üretmiştir [14]. 2002 yılında ise, 5 W sürekli güçte çalışabilecek ve 18-20 lm/W etkinlik faktörlerine sahip LED'ler üretilebilmiştir. 2003 yılına gelindiğinde CREE firması, 65 lm/W etkinlik faktörü değerine sahip ve beyaz ışık verebilen LED'leri ticari olarak piyasaya sürmüştür. 2006 yılında 131 lm/W etkinlik değerlerine laboratuvar koşullarında ve standart oda sıcaklıklarında ulaşılmıştır. Bu değer 2011 Mayıs ayı itibariyle 231 lm/W'a, 2012 yılında 254 lm/W'a, 2013 yılında 276 lm/W'a ve 2014 yılında ise 303 lm/W'a yükselmiştir [15]. Laboratuvar koşullarında da olsa 300 lm/W barajı aşılabilmiştir.

Görüldüğü gibi 2000 yılından sonra LED'lerin gelişimi çok hızlı olmuştur. Özellikle LED'lerin ışık akıları, etkinlik faktörü değerleri ile renk, ömür gibi özelliklerinin hızla gelişmesi, LED ışık kaynaklarının, konvansiyonel ışık kaynaklarına güçlü bir alternatif

olduğunu kanıtlamaktadır. Bir sonraki bölümde LED'lerin aydınlatma sektörü içindeki yeri incelenecektir.

2.2 LED'ler ve Aydınlatma

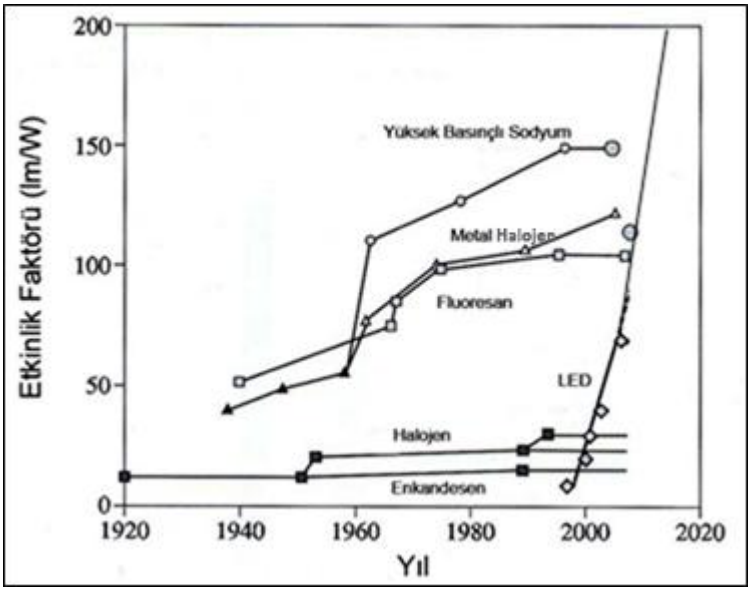
Dünya üzerinde 30 milyar ışık kaynağının kullanımda olduğu tahmin edilmektedir. Bu 30 milyar ışık kaynağının 2650 TWh elektrik enerjisi tükettiği, bunun da Dünya toplam elektrik enerjisi tüketiminin yaklaşık %20'sini oluşturduğu öngörülmektedir [16]. Günümüzde kullanılan ışık kaynakları, temelde ısıl ışık üretimi prensibi ile çalışan lambalar (enkandesen, tungsten halojen ışık kaynakları) ve ısıl dışı ışık üretimi prensibi ile çalışan lambalar (deşarj lambaları, katı hal ışık kaynakları) olmak üzere ikiye ayrılmaktadır. Uzun yıllardır kullanılan bu teknolojilerde önemli gelişmeler yaşanmış olmasına karşın, ışık kalitesi ve etkinlik faktörü yönünden hala yapılabilecekler olduğu bilinmektedir. Yeni ışık kaynaklarının üretimi, tasarımı ve optimizasyonu; ekonomik, bilimsel ve çevresel açılardan araştırmacıları hala zorlamaktadır. Konvansiyonel ışık kaynaklarının etkinlik faktörleri, 1970'lerden beri süregelen birçok yenilik ve ilerlemeyle, bazı ışık kaynakları için maksimum 150 lm/W seviyelerine ulaşmıştır. Diğer taraftan LED'lerin etkinlik faktörlerinin ise çok daha kısa bir süre içinde –laboratuvar koşullarında da olsa (25°C sıcaklık ve tek çipli paket için)- 303 lm/W seviyelerine ulaştığı ifade edilmektedir. Yaygın kullanılan ışık kaynaklarının ortalama etkinlik faktörleri (balast, trafo, v.b. kayıpları dahil) ve ekonomik ömür değerleri Çizelge 2.1'de verilmiştir [17].

LED'lerin 2020 yılına kadar genel aydınlatma uygulamalarında önemli bir paya sahip olacağı öngörülmektedir. Yüksek etkinlik faktörleri, iyi ısıl tasarımlar ile uzun ömürlere sahip olmaları, küçük boyutları, esnek yapıları (kontrol sistemleri ile farklı ışık/renk seçeneklerini dinamik olarak sunmaları v.b.) gibi üstünlükleri, LED'leri konvansiyonel ışık kaynakları karşısında üstün konuma getirebilmektedir. Şekil 2.1'de piyasada bulunabilecek LED'lerin ve konvansiyonel ışık kaynaklarının yıllar bazında etkinlik faktörlerinin gelişimi gösterilmektedir.

Düşük ve orta güçlü LED'lerin büyük çoğunluğu Asya'da üretilmektedir. Yüksek güçlü LED'ler ise en fazla Amerika Birleşik Devletleri ve Japonya'da üretilmektedir.

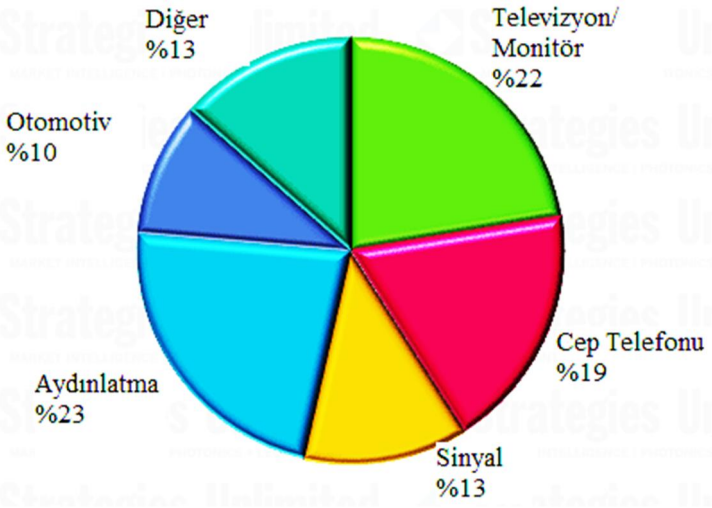
Çizelge 2.1 : Yaygın kullanılan ışık kaynaklarının ortalama etkinlik faktörü ve ömür değerleri.

Işık Kaynağı	Etkinlik Faktörü (lm/W)	Ekonomik Ömür (saat)
Enkandesen	5-15	1.000
Tungsten Halojen	12-35	2.000-4.000
Yüksek Basınçlı Civa Buharlı	40-60	12.000
Kompakt Flüoresan	40-65	6.000-12.000
Tüp Flüoresan	50-100	10.000-16.000
İndüksiyon	60-80	60.000-100.000
Metal Halojen	50-100	6.000-12.000
Yüksek Basınçlı Sodyum Buharlı	80-100	12.000-24.000
Yüksek Basınçlı Sodyum Buharlı (rengi iyileştirilmiş)	40-60	6.000-10.000
Alçak Basınçlı Sodyum Buharlı	150	16.000-20.000
LED	160	25.000-100.000



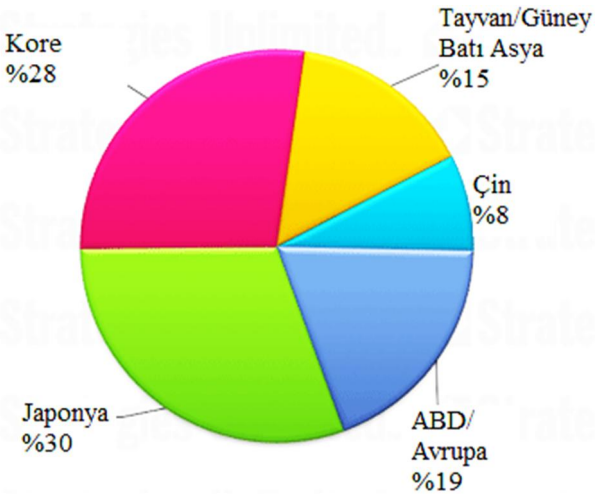
Şekil 2.1 : Işık kaynaklarının etkinlik faktörlerinin yıllar bazında değişimi.

Strategies Unlimited'in yayınladığı rapora göre, 2012 yılı itibariyle aydınlatma amaçlı kullanılan LED'lerin piyasa hacmi 3,11 Milyar Dolardır. LED'lerin farklı uygulama alanlarının aldığı paylar Şekil 2.2'de gösterilmiştir [18].



Şekil 2.2 : 2012 yılı itibariyle LED'lerin farklı uygulamalardaki kullanım oranları.

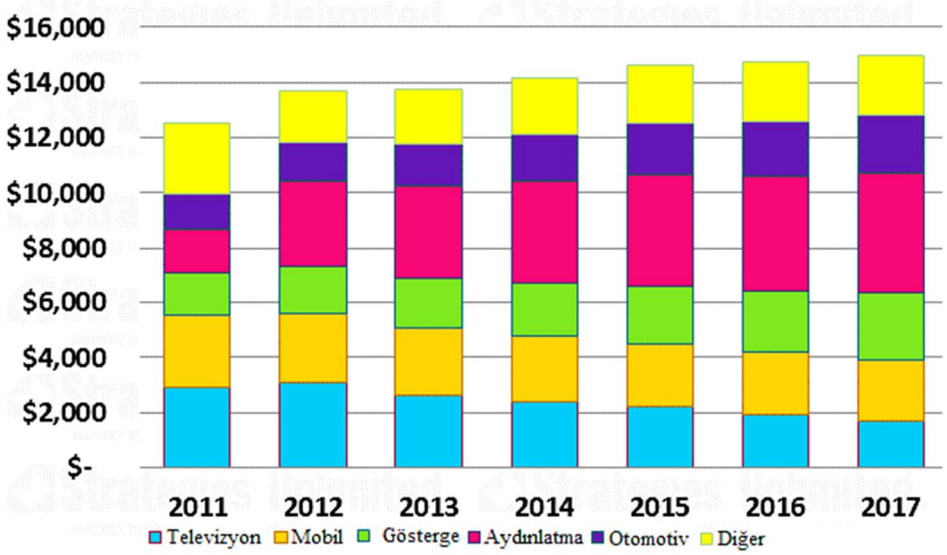
2012 yılı itibariyle LED üretiminin yapıldığı bölgeler ve üretim payları ise Şekil 2.3'te verilmiştir [18].



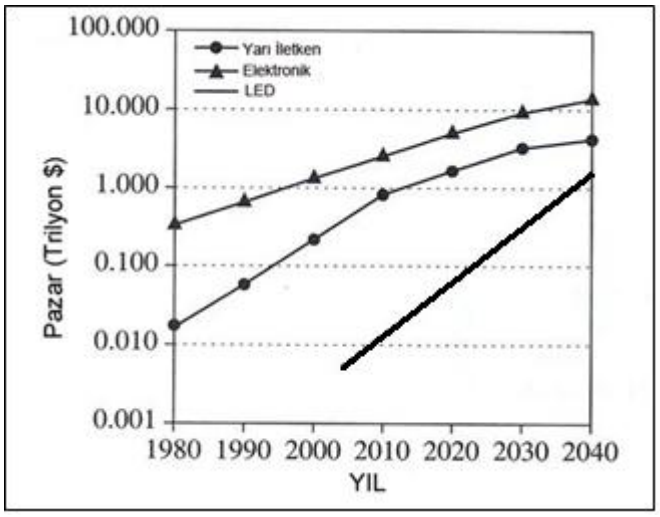
Şekil 2.3 : Bölgelere göre LED üretim payları, 2012.

Aynı raporda verilen LED pazarının 2011-2017 yılları arasında öngörülen gelişimi de Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bu verilerde 2011 sonrasında, aydınlatma alanında kullanılacak LED'lerin pazar payının hızla artacağına dikkat çekilmektedir [18].

Elektronik eleman pazar araştırmalarına göre bu hızlı büyüme devam ederse, LED'ler mikro elektronik pazarı için anahtar sektör olacaktır. LED'lerin yarı iletken ve elektronik pazarında var olan payının da çok hızlı artacağı öngörülmektedir (Şekil 2.5) [19].



Şekil 2.4 : 2011-2017 yılları arasında LED pazarı projeksiyonu.



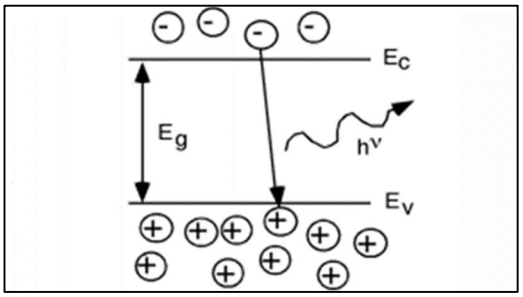
Şekil 2.5 : LED'lerin elektronik ve yarıiletken pazarındaki büyümesinin 2040 yılı projeksiyonu.

LED'lerin genel aydınlatma alanında yaygın kullanılabilmeleri, yüksek verimlere ulaşılması, ısıl ve güç performanslarının arttırılması ve buna bağlı olarak fiyatlarının düşmesi ile gerçekleşecektir.

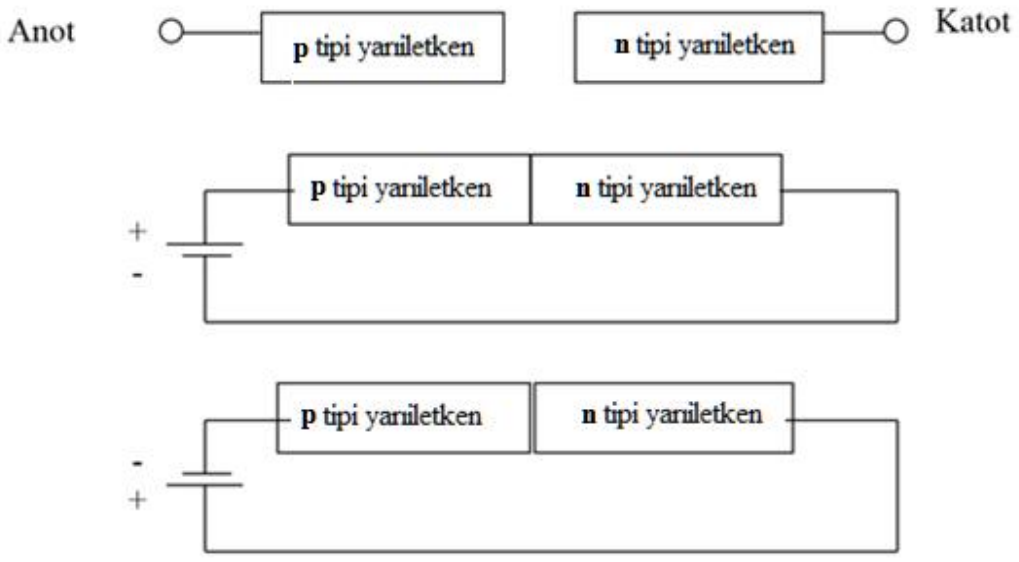
2.3 LED'lerin Çalışma Prensibi

LED'ler elektronların tek yönlü hareketine izin veren ve üzerinden elektrik akımı geçirildiğinde ışık yayan elektronik elemanlardır. Normal diyotlar gibi LED'ler de, birer p-tipi ve-n-tipi yarı-iletken birleşimi oluşturmak için farklı maddeler katılarak saflığı bozulmuş yarı iletken malzemelerden üretilirler. Saflığı bozulan yarı-iletkenlerde, elektronların sayısı, boşlukların sayısından fazla ise yarı-iletken n-tipi, az

ise p-tipi olarak adlandırılır. p-tipi bir yarı-iletken malzeme ile n tipi bir yarı-iletken malzeme yanyana getirilerek LED yapısı oluşturulur. p-tipi yarı iletken bir doğru akım kaynağının pozitif ucuna, n-tipi yarı iletken de negatif ucuna bağlanır ise pozitif taraftan (anot), negatif tarafa (katot) doğru elektrik akımı iletilir. Elektronlar ise negatif taraftan pozitif tarafa geçerken bir boşluk ile çiftleşirler ve foton yayarlar. Bu olay elektro-lüminesan ışık üretimi olarak adlandırılır (Şekil 2.6). Şekil 2.6'da gösterilen E_c yarı iletkenin iletim bandının enerjisi, E_v ise yarı iletkenin valans bandının enerjisidir. E_g, iletim ve valans bandı arasındaki enerji farkıdır. h^v ise yayılan fotonun enerjisidir. LED'ler bu yolla ışık yayarlar. Eğer, yarı iletkenin pozitif tarafı kaynağın negatif tarafına, negatif tarafı da pozitif tarafına bağlanırsa herhangi bir elektron ve akım geçişi olmaz (ters kutuplama) (Şekil 2.7).

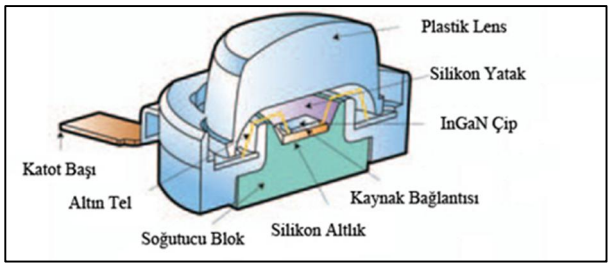


Şekil 2.6 : LED'lerde ışık üretim prensibi.



Şekil 2.7 : p-n tipi yarı iletken oluşumu.

Örnek bir yüksek güçlü LED çipinin genel yapısı Şekil 2.8'de verilmiştir.

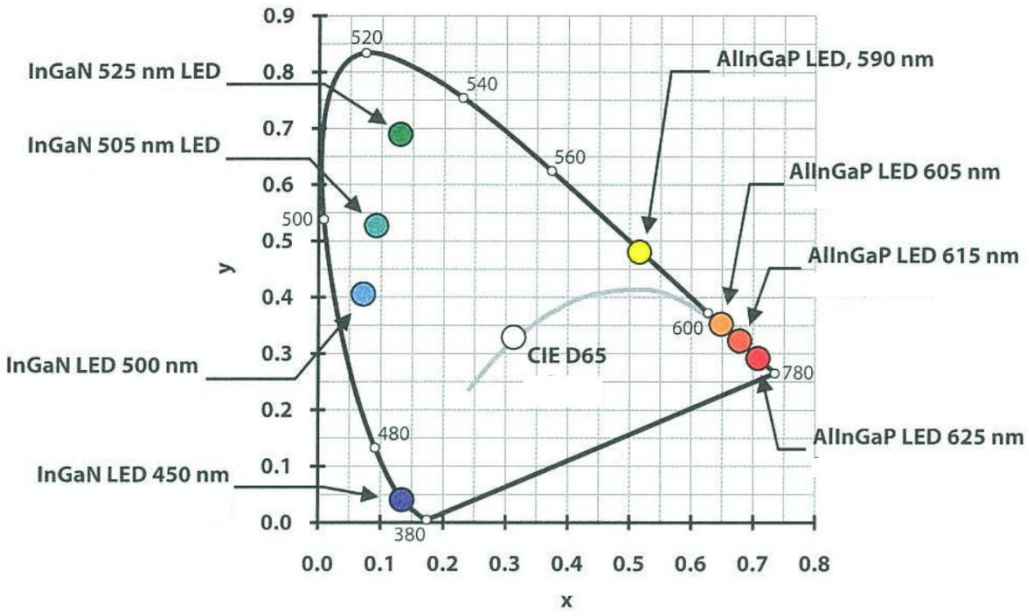


Şekil 2.8 : Tipik bir LED çipi.

Tipik bir LED çip paketinde, ışık üretiminin gerçekleştiği yarıiletken birleşimi (LED çipi) silikon bir yatak içinde bulunur. Çipe elektrik akımının taşınabilmesi için çok ince altın bir tel kullanılır. Çipte oluşan ısının atılabilmesi için, çipin alt bölümünde bir soğutucu blok bulunur. Bu bloğun görevi, oluşacak ısının LED çipinin altından baskı devreye iletilebilmesinin sağlanmasıdır. Çipi dış etkilerden korumak ve üretilen ışığı istenilen biçimde dağıtabilmek için de çipin üzerinde plastik bir lens yerleştirilir. LED çipinin hemen üzerinde bulunan bu lenslere "birincil lens" adı verilmektedir. LED paketinin baskılı devre ile olan elektrik bağlantısı ise anot ve katot başları ile gerçekleştirilmektedir.

2.4 LED'ler ile Beyaz Işık Elde Edilmesi ve Renk

Genel olarak tek renk ışık yayan (monokromatik) LED'lerin verimi yaydıkları ışığın dalga boyu ile ilgilidir. İlk ticari LED sadece kırmızı ışık üretmiş olmasına karşın, günümüzdeki LED teknolojisi ile artık görülebilir ışık radyasyonu bölgesindeki tüm dalgaboyları üretilebilmektedir. Birçok konvansiyonel ışık kaynağından farklı olarak LED'ler, beyaz ışık kaynakları değillerdir. Ürettikleri ışık, elektromanyetik spektrumun görülebilir bölgesinin kısa dalgaboyu tarafının bir bölümünü kapsamakta olup neredeyse tek renkli sayılabilecek özelliktedir. Bu yüzden tek renk ışık kullanan uygulamalarda –trafik ışıkları, yol işaretleri, elektronik göstergeler vb.- oldukça verimli sayılabilirler. Temelde LED'lerden beyaz ışık elde etmek için iki yöntem kullanılır. Birinci yöntem, mavi veya mor ötesi bölgede ışıma yapan bir LED çipinin fosfor tabakası ile kaplanarak beyaz ışık yaymasıdır [20]. Fosfor tabaka, kısa dalga boylarındaki ışık radyasyonunu yutarak daha uzun dalgaboyunda ışık radyasyonu yaymaktadır. Farklı malzemelerden üretilen örnek LED çiplerinin baskın dalga boyları ve CIE renk uzayındaki koordinatları Şekil 2.9'da gösterilmiştir [21].



Şekil 2.9 : Farklı yarıiletken malzemeler için baskın dalgaboyları ve CIE renk uzayındaki koordinatları.

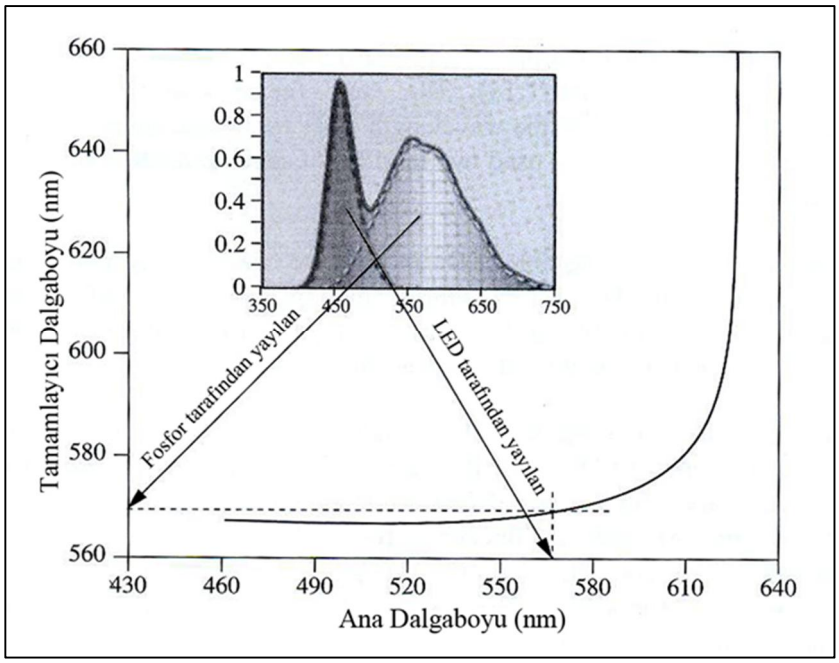
LED çipleri'nin her biri ayrı ayrı fosfor ile kaplanabildiği gibi, daha esnek tasarımlar için kısa dalgaboylu LED'ler, paketlerinin dışından harici bir fosfor tabakası ile de kaplanabilirler (Şekil 2.10).



Şekil 2.10 : Çip bazlı ve harici fosfor tabaka uygulamaları.

Kısa dalga boyunda ışık yayan bir LED, fosfor ile kaplandıktan sonra görünür bölgenin her tarafında radyasyon yaymaya başlar. Şekil 2.11'de örnek olarak kısa dalga boyunda ışık yayan bir LED'in fosfor ile kaplanarak görünür bölgenin sonuna kadar (780 nm) radyasyonunu genişletmesi ve beyaz ışık yayması gösterilmiştir [16].

İkinci yöntem, birçok tek renkli LED kullanarak (genelde kırmızı, yeşil, mavi) karışımlarından beyaz ışık elde etmektir [20]. Sadece iki renk kullanarak beyaz ışık elde etmek mümkün olsa da, renk özelliklerinin iyileştirilmesi için üç tek renkli LED kullanılmaktadır.



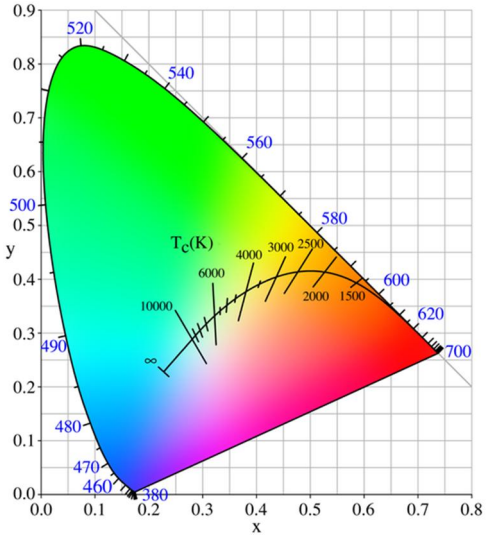
Şekil 2.11 : Kısa dalga boyunda ışık yayan bir LED'in fosfor ile kaplanarak beyaz ışık eldesi.

LED'lerin spektrumu, farklı sıcaklıklarda değişebildiği için, farklı renklerde LED'ler kullanılarak beyaz ışık elde etmenin kontrolünün zor ve değişkenlik gösterebilen bir yöntem olduğu söylenebilir.

2.4.1 LED'lerin renk sıcaklığı

Renk sıcaklığı, bir ışık kaynağının renginin, aynı spektruma sahip ideal bir siyah cismin rengi ile karşılaştırılması yöntemi ile belirlenir. Işık kaynağının rengi, siyah cismin belirli bir sıcaklıktaki rengi ile eşleştiğinde, Kelvin birimi cinsinden rengi belirlenmiş olur [22]. Düşük renk sıcaklığı daha kırmızı/sarı –sıcak renge karşılık gelirken, yüksek renk sıcaklıkları daha beyaz -soğuk ışığı ifade eder. Siyah cisim, üzerine düşen tüm ışık radyasyonunu tamamen yutan ve ideal olduğu kabul edilen bir malzemedir [23]. Şekil 2.12'de siyah cisim ışımasının, CIE renk uzayındaki yeri gösterilmiştir [24].

Tüm ışık kaynaklarının renklerinin Şekil 2.12'de görülen siyah cisim çizgisi üzerine düşmesi mümkün değildir. Bu yüzden korele edilmiş renk sıcaklığı tanımı kullanılmaktadır (CCT – Correlated Color Temperature).



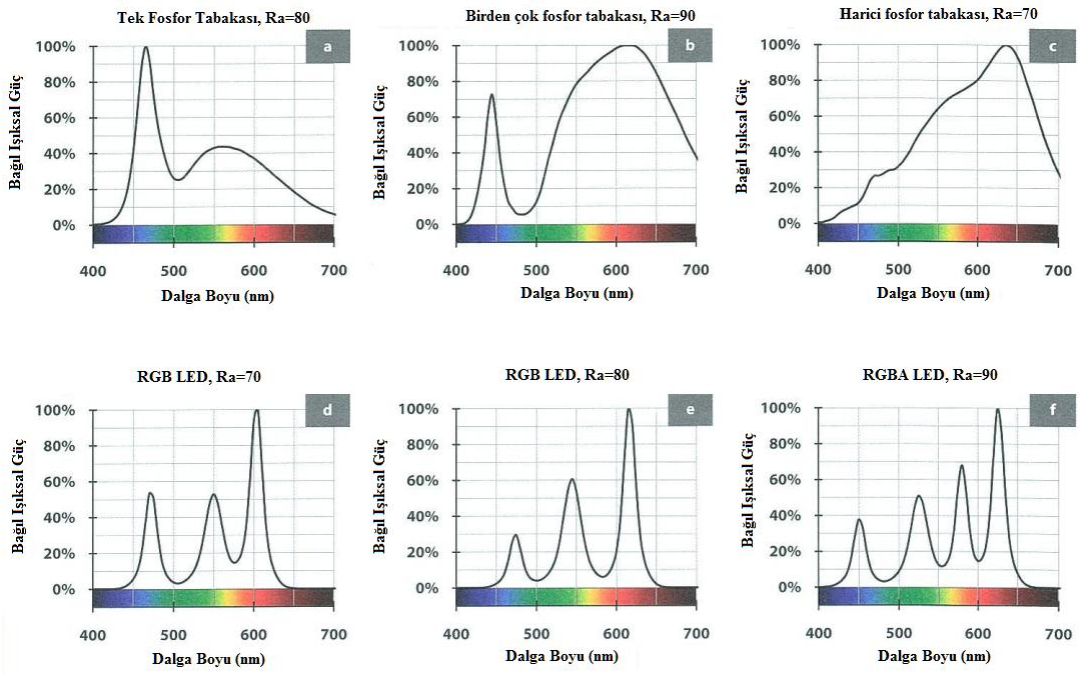
Şekil 2.12 : Siyah cisim ışımasının CIE renk uzayındaki yeri.

Korele edilmiş renk sıcaklığı, renk koordinatları olarak (x,y) ideal siyah cisim çizgisinin (planckian locust) dışına düşen ışık kaynaklarının renklerini, ideal siyah cisim ile eşleştirmek için kullanılır. Şekil 2.12'de görülen 1500-10000 K arasındaki ekstra çizgiler, ışık kaynaklarının renklerini, siyah cisim ile korele etmek ve renk sıcaklıklarını belirlemek için kullanılır.

2.4.2 LED'lerin renksel geriverim endeksi

Renksel geriverim endeksi, ışık kaynaklarının aydınlattıkları cismin renklerini, referans bir ışık kaynağına göre ayırt ettirebilme özelliğidir (CRI – Color Rendering Index) [23]. Bir referans kaynak ile ışık kaynaklarının bu karakteristikleri ölçülebilmektedir. Bu ölçümlerde, spektrumu sürekli olan gün ışığı referans alınmaktadır. Renksel geriverim endeksi R_a ile gösterilir ve birimsizdir. Değeri 0 ile 100 arasındadır. Bir ışık kaynağının renksel geriverim endeksi maksimum olan 100 değerine sahipse (R_a=100), bu durum o kaynağın tayfının referans kaynak ile aynı olduğu anlamına gelmektedir.

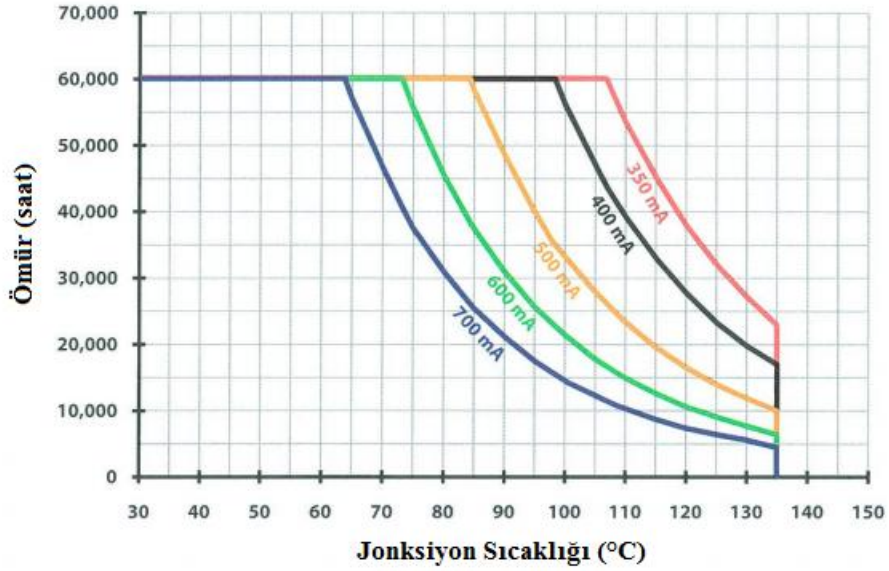
Farklı renksel geriverimlere sahip örnek LED'lerin, beyaz ışık oluşturma yöntemine göre sahip olduğu spektrumlar Şekil 2.13'te gösterilmiştir [21]. RGB (Red, Green, Blue) LED'ler kırmızı (Red), yeşil (Green) ve mavi (Blue) LED'lerin kullanılması ile üretilirler. Daha yüksek renksel geriverim elde etmek için RGB dizilimine kehribar (Amber) rengi bir LED de ilave edilebilir.



Şekil 2.13 : Farklı beyaz ışık oluşturma yöntemlerien göre üretilen LED spektrumları ve renksel geriverim endeksleri.

2.5 LED Ömrü

LED ışık kaynaklarının ömürleri potansiyel olarak çok uzundur. LED ömrünü etkileyen parametreler olarak açılıp kapanma sayıları, sürücü özellikleri, çalışma sıcaklıkları, ortam koşulları (nem ve sıcaklık) sayılabilir. Genelde ışık kaynaklarının ışık akıları kullanıldıkça azalmaktadır. LED'ler sürekli gelişen teknolojiye sahip ışık kaynakları olduğu için, tümü ile ilgili genelleştirmeler yapmak zordur. LED ışık kaynakları kullanılarak tesis edilmiş bir aydınlatma sisteminin ömrünü belirlerken iki farklı performans parametresinden bahsedilebilir. Birincisi, LED'lerin elektriksel ve ısıl yük altında ışık veremeyecek şekilde bozulmalarıdır. İkincisi, LED'lerin belirli özelliklerinin (ışık akısı, renk, spektrum vs.) ilk durumdaki hallerinden sapmasıdır. Şekil 2.14'te örnek bir LED'in farklı sürme akımları ve jonksiyon sıcaklıklarına göre tahmin edilen ömürleri gösterilmiştir [21].



Şekil 2.14 : Farklı sürme akımları için jonksiyon sıcaklığına bağlı ömür tahmini.

LED'lerin çip ve armatür bazında ömürlerinin tanımı ve belirlenmesi henüz daha netlik kazanmamış, üzerinde çalışmaların devam ettiği bir konudur. LED'lerin ömürlerinin tayini için Kuzey Amerika Aydınlatma Mühendisliği Topluluğu (IESNA – Illuminating Engineering Society of North America), 2008 yılında IES LM-80-08 "LED Işık Kaynaklarının İlk Durumdaki Işık Akısını Koruma Yüzdesinin Ölçümü" yöntemini yayınlamıştır. Yöntem ile ilgili bilgiler ve diğer standartlar, Bölüm 2.6'da verilmiştir.

2.6 LED Standartları

LED ışık kaynaklı armatürlerin, mevcut iç/dış aydınlatma armatürlerinin yerini alabilmeleri için, öncelikle aydınlatma standartlarında belirtilen aydınlık düzeyi, parıltı, düzgünlük ve kamaşma sınırlandırılması gibi minimum aydınlatma gereksinimlerini yerine getirmeleri gerekmektedir. Bu süreç uygun LED standartlarının geliştirilmesi ile desteklenmelidir. Konvansiyonel ışık kaynakları ve bu kaynakları kullanan aydınlatma armatürleri için; fotometrik, mekanik ve elektriksel gereklilikleri içeren standartlar yürürlüktedir. LED'lerin ışık üretim teknikleri gereği konvansiyonel kaynaklardan farklı olması nedeniyle, LED'lere özel yeni standartların gelişimine ihtiyaç duyulmaktadır. LED'lerle ilgili en büyük sorunlardan biri; LED ışık kaynakları, modülleri ve armatürleri için üreticilerden alınan verilerin tutarlı olmamasıdır. Çoğu zaman verilen teknik değerler yanıltıcı olabilmektedir. Bu durum

da esas olarak, üreticilerin söz konusu verileri elde ederken veya yayınlarken başvurabilecekleri standartların eksikliği ve/veya yetersizliğinden kaynaklanmaktadır.

Bu bölümde, LED ışık kaynağı kullanan katı hal aydınlatma sistemleri için Dünya genelinde yürürlükte olan anahtar standartlar konu içerikleri açıklanarak özetlenecek, katı hal aydınlatma sistemlerinde kullanılabilecek standartlar; lamba, modül, kontrol aksamı, armatür, sistem, elektromanyetik uyumluluk ve alan başlıkları altında listelenecektir. Buna ek olarak, standart geliştirmek amacıyla çalışan kurumlar ve teknik komiteler hakkında da bilgi verilecektir.

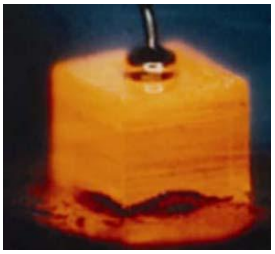
Günümüzde bir çok kuruluş, LED ve LED uygulamaları için teknik doküman ve standart oluşturmaya çalışmaktadır. ANSI (American National Standarts Institute) [25], CEN (European Committee for Standardization) [26], CIE (International Commission on Illumination) [27], FCC (Federal Communications Commission) [28], IEC (International Electrotechnical Commission) [29], IESNA (Illuminating Engineering Society of North America) [30], JEDEC (Joint Electron Device Engineering Council) [31], NEMA (National Electrical Manufacturers Association) [32], NFPA (National Fire Protection Association) [33], UL (Underwriters Laboratories Inc.) [34], ZHAGA (Zhaga Consortium) [35] gibi kuruluşlar bu çalışmalarda aktif görevler üstlenmişlerdir. LED'lerin bir aydınlatma tesisatında kullanılabilmeleri için armatür formatına getirilme zorunluluğu vardır. Konvansiyonel ışık kaynaklarının kullanıldığı armatürler lamba ve yardımcı elemanlardan (balast, trafo, vs.) oluşurken, LED'li armatürler LED paketi, lens, baskı devre, soğutucu, sürücü gibi daha fazla elemanı içermektedir. Elektronik eleman olma özelliklerinden dolayı, şebekeye olası bozucu etkilerinin de daha detaylı ele alınması gerekmektedir. Bu bölümde LED'lerle ilgili lamba-modül, kontrol elemanları, armatür, sistem, ölçüm, EMC (Electromagnetic Compatibility/Elektromanyetik Uyumluluk) ve EMF (Electromagnetic Field/Elektromanyetik Alan) konularında geçerli standartlar incelenecektir. Amerika Birleşik Devletleri (ABD)'ndeki standartlar uluslararası platformlardaki benzerlerine göre zamanlama ve içerik yönünden farklılıklar gösterebildiği için inceleme temelde ABD LED aydınlatma standartları ve Uluslararası LED aydınlatma standartları başlıkları altında gerçekleştirilmiştir.

2.6.1 LED ve LED ışık kaynağı kullanan sistem tanımları

Bu bölümde standart ve önerilerde kullanılan LED, LED sistemleri ve yardımcı eleman tanımlarına yer verilecektir.

2.6.1.1 LED yarıiletkeni

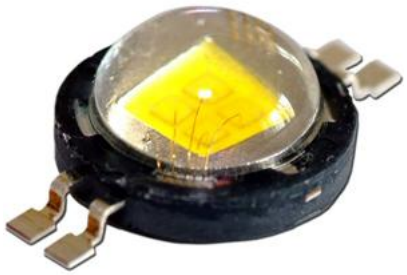
Bir LED çipinin ışık yayan, p ve n tipi yarıiletkenlerden oluşan bölgesidir (Şekil 2.15).



Şekil 2.15 : LED yarıiletkeni.

2.6.1.2 LED çipi/paketi

Bir veya birden çok LED yarıiletkeninin çevresini saran, dış ortamdan korumak, gerekli elektriksel bağlantıları sağlamak, üretilen ısıyı dışarı atmak ve istenilen ışık dağılımını elde etmek için kullanılan koruyucu kılıftır (Şekil 2.16).



Şekil 2.16 : Örnek bir LED paketi.

2.6.1.3 LED dizisi

Birden çok LED çipi veya paketinden oluşan ve bir baskı devre üzerinde bulunan LED'lerin bütününün oluşturduğu yapıdır (Şekil 2.17).



Şekil 2.17 : Örnek LED Dizileri.

2.6.1.4 LED modülü)

Bir veya birden çok LED paketinin, elektriksel, optik veya ısıl arabirimlerinden en az birini içeren halidir (Şekil 2.18).



Şekil 2.18 : Örnek LED modülleri.

2.6.1.5 LED sürücüsü

LED sistemlerine gereken elektriksel gücü sağlamak için sistem ile şebeke arasında çalışan ve LED sisteminin karakteristiğine uygun akım/gerilim değerlerini ayarlayan elektronik devredir (Şekil 2.19).



Şekil 2.19 : LED sürücü örnekleri.

2.6.1.6 LED ışık motoru

Bir veya birden fazla LED paketi/modülünden oluşan, sürücü, elektriksel, ısıl ve optik arabirimleri içeren yapılardır (Şekil 2.20).



Şekil 2.20 : LED ışık motoru.

2.6.1.7 LED armatür

LED bazlı aydınlatma elemanlarının (LED paket, dizi, modül veya ışık motoru) bir araya gelerek oluşturduğu; elektriksel, optik, ısıl ve mekanik elemanlardan oluşan, LED ışık kaynaklarının fiziksel olarak korunmasını, konumlandırılmasını ve ışık ve elektriksel kontrollerini sağlayan yapılardır (Şekil 2.21).



Şekil 2.21 : LED armatür örnekleri.

2.6.2 Amerika Birleşik Devletleri – LED aydınlatma standartları

Bu bölümde ABD genelinde yürürlükte olan LED standartları hakkında bilgi verilecektir. ABD'de LED standartları ile ilgilenen kuruluşlar olarak; ANSI [25], UL [34], NEMA [32], ASSIST (The Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies) [36], NIST [37] ve IESNA [30]sayılabilir. Özellikle IESNA, NIST ile beraber çalışarak, LED alanında bir çok standart yayınlamıştır. Bu standartlardan en çok kullanılanları aşağıdaki bölümlerde özetlenmiştir.

2.6.2.1 IESNA LM-79-08: approved method: electrical and photometric measurements of solid state lighting products, (standart yöntem: katı hal aydınlatma ürünleri için elektriksel ve fotometrik ölçümler)

Bu yöntem, LED ışık kaynaklı armatürlerin ve kendinden balastlı LED lambaların fotometrik ve elektriksel ölçümlerini içermektedir [38]. Toplam ışık akısı, etkinlik faktörü, renksel özellikler, açısal ışık şiddeti ölçümleri için, küre-spektroradyometre, küre-fotometre ve gonyofotometre yöntemleri açıklanmaktadır. LED armatürlerin laboratuvar ölçümleri için yayınlanmış en kapsamlı yayındır. Armatürün bütün olarak ölçümü için tanımlanmıştır. LED ışık kaynaklarının performansları bağlı oldukları armatür gövdeleri ile birebir ilişkili olduğu için, konvansiyonel armatürlerin aksine mutlak fotometrik ölçümler tanımlanmıştır. Konvansiyonel armatürlerde tanımlanan bağıl fotometrik ölçümler, bir ışık kaynağının armatür içinde ve dışında ışık akısının ölçülmesi ile armatürün ışık çıktı oranını verebilmektedir. Isıl koşullardan dolayı, LED'lerin performansı armatür dışında tek başlarına çalıştıklarında farklı olacağı için

konvansiyonel armatürler gibi ölçümleri hatalıdır. Bu yüzden ölçümler armatür bazında bütün olarak yapılmaktadır. LM-79-08 ölçümü yapılan armatürün 1 metre çevresindeki ortam sıcaklığının 25±1 °C olması koşulunu öne sürmektedir. Ayrıca armatür çevresinde belirgin bir hava akımı da olmamalıdır. Armatür ölçüm aletine bağlanırken, alete temas eden yüzeylerin bir soğutucu blok olarak davranmaması için arada yalıtım malzemesi kullanılması gerektiği belirtilmektedir. Armatür konumu, armatür içindeki sıcaklık dağılımını değiştireceğinden, armatürler gerçek çalışma konumlarında ölçülmelidir [39]. Ölçümlerin, armatür çevre ile ısıl dengeye ulaşıp, elektriksel ve optik ölçümler sabitlendiğinde yapılması istenmektedir. Yöntem, armatür performansının sabitlenmesi için en az 15 dakika arayla alınan 3 optik ve elektriksel ölçüm farkının %0,5'ten az olmasını önermektedir.

2.6.2.2 ASSIST – LED life for general lighting: measurement method for LED components (genel aydınlatma için led ömrü: LED bileşenleri için ölçüm yöntemi)

LED ışık kaynakları ve bunları kullanan armatürler için ömür belirleme çalışmaları 2000'li yılların başında başlamıştır. Merkezi Amerika Birleşik Devleri'nde bulunan Lighting Research Center (LRC) bünyesinde 2002 yılında kurulan Katı Hal Aydınlatma Sistemleri ve Teknolojileri Birliği (ASSIST), katı hal aydınlatma sistemlerinin ömürleri ile ilgili ilk öneri dokümanını 2005 yılında yayınlamıştır [36]. ASSIST tarafından 2005 yılında yayınlanan bu doküman, genel aydınlatma sistemlerinde kullanılan LED çipleri kapsamakta ve LED'lerin kullanışlı ömürlerinin ölçülmesi için test yöntemlerini içermektedir. Doküman başlığında geçen LED bileşen, tekil bir LED ışık kaynağı olarak tanımlanmıştır. ASSIST, LED çiplerin ölçüm için toplam 6000 saat, üreticinin belirttiği nominal sürme akımında sürülmesini önerir. İlk 1000 saatlik ölçüm ömür hesaplarına katılmamalı, 6000 saatlik ölçümün son 5000 saati kullanılmalıdır. LED'lerin ısıl olarak da değerlendirilebilmesi için mümkünse lehim noktasına bir sıcaklık ölçüm cihazı bağlanarak sıcaklık ayarı yapılmasını önerir. ASSIST, yüksek güçlü LED çipleri için (100 mA üzerinde sürme akımına sahip) lehim noktası sıcaklıklarını 45, 65 ve 85 °C olarak belirtir. Düşük güçlü LED çipleri için (100 mA altında sürme akımına sahip) ise lehim noktasının sıcaklık değerleri 35, 45 ve 55 °C'ye ayarlanmalıdır. 1000 saat ve 6000 saat arasında farklı sıcaklıklarda çalıştırılan LED'ler izlenmeli ve 6000 saat sonundaki performansları raporlanmalıdır. İlk 1000 saatlik ölçüm sonunda elde edilen ışık akısı değerleri %100'e

normalize edilmeli ve ışık akısı düşümü buna göre hesaplanmalıdır. Eğer ölçülen LED'lerin ışık akısı, 6000 saat sonunda ilk durumdakinin %70'ine veya %50'sine ulaşmadıysa, bu değerlere ulaşmak için geçecek zaman ekstrapolasyon yöntemi ile hesaplanabilir. Tam olarak belirli ölçüm ve hesap yöntemleri önermese de ASSIST önerileri LED ömür ölçümleri için bir altyapı oluşturması açısından önemlidir.

2.6.2.3 IESNA LM-80-08: approved method: lumen maintenance testing of LED light sources, (standart yöntem: LED ışık kaynaklarının zamana bağlı ışık akısı ölçümleri)

IES tarafından 2008 yılında yayınlanan IES LM-80-08, inorganik LED bazlı çiplerin, dizilerin ve modüllerin ilk durumdaki ışık akısı sürekliliğinin ölçümü için bir yöntem tanımlar [40]. Bu dokümanda LED ışık kaynaklı armatürler için bir yöntem sunulmamaktadır. Kontrollü laboratuvar ortamlarında tekrar edilebilir ve karşılaştırılabilir sonuçlar elde etmek için geçerli bir ömür ölçüm yöntemi açıklanmaktadır. Genel olarak LED çip üreticileri tarafından sağlanan LM-80 verileri, sadece laboratuvar ortamında ölçülen ışık akısı düşümünü verir. Mutlak ölçülen çalışma saati dışındaki ışık akısı düşümü tahmini için bir yöntem önermez ve kaynakların ışık akılarının zamanla azalması dışında bozularak devre dışı kalmaları da dikkate alınmaz.

LED ışık kaynaklarının 55, 85 °C ve üreticinin belirleyeceği bir LED çip kasa sıcaklığında, eşit sürüş akımlarıyla test edilmesi gerekmektedir. LED çip kasa sıcaklığı mümkünse jonksiyon noktasına yakın bir yerden hassas bir sıcaklık ölçüm elemanı ile ölçülmelidir. Sürüş akımı ve LED çip kasa sıcaklığı seçimi yapılırken, gerçek uygulamalarda kullanılacak değerlere yakın değerler seçilmelidir. Ömür ölçümü süresince kasa sıcaklığı ±2°C'den fazla değişmemeli, ortam sıcaklığı ise kasa sıcaklığının en fazla 5 °C altında veya üzerinde tutulmalıdır. Test süresince bağıl nem %65'in altında olmalıdır.

Belirli çalışma sürelerinin sonunda alınacak olan fotometrik ölçümler, test için kullanılan sürüş akımında gerçekleştirilmelidir. Işık akısı düşümünün yanında, renk değişimlerinin de izlenmesi açısından ölçümlerin bir spektroradyometre yardımı ile yapılması tavsiye edilmektedir. Ömür deneylerinde ısınan LED ışık kaynaklarının fotometrik ölçümlerine başlanmadan önce 25±2 °C oda sıcaklığına kadar soğumasının beklenmesi gerekmektedir.

Ölçümler minimum 6000 saat, ideal olarak 10000 saat, en fazla 1000 saatlik aralıklarla veriler alınarak yapılmak zorundadır. Ölçüm sonucunda farklı sıcaklıklarda uzun süre çalıştırılan LED'lerin ışık akısı azalma miktarlarının ve renk kaymalarının belirlenmesi amaçlanmaktadır. En fazla 1000 saat aralıklarla minimum 6000 saat sonunda elde edilen en az altı veri ile LED'lerin ışık akılarının %70'ine inene kadar geçecek sürenin tahmini ise, IES TM-21-11 "Life Estimation Test Method – Ömür Öngörü Yöntemi" dokümanı ile gerçekleştirilmektedir [41].

LM-80 verilerinin, LED çip üreticileri tarafından yayınlanarak armatür üretici ve tasarımcılarına yol göstermesi hedeflenmiştir. LED çipleri farklı akımlarda sürülebildiği için üreticiler sadece belirli sürme akımı değerlerinde, belirli kasa sıcaklığı için değerler sağlayabilmektedir. Armatür üreticilerinin ve tasarımcıların kendi tasarım sonuçlarına yakın LM-80 verilerini eşleştirip ömür performansı tahmini yapması amaçlanmıştır.

Not: 9 Ocak 2014'te IES ölçüm için gerekli kasa sıcaklığı şartını üçten ikiye indirmiştir. Bu sıcaklıklardan en az birisi 55 veya 85 °C olmalıdır.

2.6.2.4 IESNA TM-21-11: life estimation test method (ömür öngörü test yöntemi)

TM-21-11 Ömür Öngörü Test Yöntemi, LM-80-08 ölçümlerinden elde edilen veriler ile uzun dönem tahmin yapmak için istatistiksel bir yöntem önerir [41]. IES tarafından 2011 yılında yayınlanmıştır. LED'lerin ışık akılarını koruma yüzdeleri, p koruma yüzdesi olmak üzere L_p sembolü ile verilmektedir. Örneğin L_{70}, saat olarak LED'in ilk ışık akısının %70 değerine düştüğü zamanı gösterir. LED çiplerin ışık akısı düşümleri birçok faktöre bağlıdır. Bu faktörlere örnek olarak, kullanım zamanı, çalışma sıcaklığı, sürme akımı ve kullanılan malzemelerin cinsi verilebilir. Bu nedenle, LED'lerin ışık akılarını koruma yüzdeleri, LED çip üreticilerine göre hatta aynı grup LED çipleri içinde bile farklılık gösterebilmektedir.

TM-21, 6000 saatlik LM-80 ölçümünün son 5000 saatini kullanır. Eğer LM-80 ölçümleri, 10000 saatten uzun yapıldı ise, ölçüm süresinin ikinci yarısı kullanılır. Örneğin 13000 saatlik bir ölçüm için, 6500-13000 saat arasındaki veriler kullanılmaktadır. Sonuçlar raporlanırken, LM-80 verisi üzerinden hesaplanan ışık akısını koruma yüzdesi süresi saat cinsinden ölçüm zamanının 6 katından fazla ise, ömür tahmini büyüktür işareti ile verilmelidir. Örneğin 7500 saatlik LM-80 verisi ile

ölçülen bir LED çipinin tahmin edilen L_{70} değeri 45000 saatin üzerinde ise, TM-21, L_{70} süresi tahminini L_{70}(7,5k)>45000 saat olarak belirtir. TM-21, ölçüm zamanının 6 katından fazla ömür tahmini yapmaya istatistiksel hatanın artması sebebi ile izin vermez. TM-21 tahmini verilirken, mutlaka LED çip kasa sıcaklığı ve sürme akımı da belirtilmelidir. Örnek olarak, L_{70} (7,5k) > 45000 saat (T = 55 °C, I = 350 mA) gösteriminin açıklaması: "55°C LED çip kasa sıcaklığında, 350 mA sürme akımında 7500 saat çalıştırılıp her 1000 saatte bir ölçülen ışık akısı değerleri kullanılarak, bu çalışma koşulları geçerli kalması halinde söz konusu LED ışık kaynağının ışık akısının %70 değerine düşeceği sürenin 45000 saatten fazla olacağı tahmin edilmektedir" şeklindedir. TM-21 belirli bir hata payı ile LED çiplerin ömür öngörü tahmin yöntemini açıklamaktadır.

2.6.2.5 IES LM-84-14 measuring luminous flux and color maintenance of LED lamps, light engines and luminaries (LED lambaların, ışık motorlarının ve armatürlerin ışık akısı ve renk sürekliliğinin ölçümü)

LM-84-14 IES tarafından 2014 yılında yayınlanmıştır. LED'lerin çip bazında ömür ölçümleri için geliştirilen IES LM-80-08 dokümanının LED lambalara, LED ışık motorlarına ve LED armatürlere genişletilmiş halidir [42]. Işık akısının ve renk özelliklerinin zamanla değişiminin ölçümü için gerekli laboratuvar koşulları tanımlanmaktadır. LED çipi dışındaki diğer armatür elemanlarının da (optik, mekanik ve elektriksel elemanlar) ışık akısı düşümüne ve renk bozulmalarına sebep olduğu bilinmektedir. LED lamba, ışık motoru, armatür gibi sistemlerin zamanla ışık akısı düşümü ve renk özelliklerinin değişiminin ölçümü sadece LED çip bazında olmamalıdır.

Farklı bir sıcaklık belirtilmediyse, fotometrik ölçümler 25±5 °C ortam sıcaklığında yapılmalıdır. Sıcaklık ölçüm elemanları LED'lerin direkt ışığına maruz kalmamalıdır. Laboratuvar ortamındaki bağıl nem seviyesi %65'in altında olmalı, ölçülen ürün etrafındaki hava akışı minimize edilmelidir. Ürünler fiziksel olarak tasarlandığı konumda çalıştırılmalı, ölçülmeli ve üreticinin belirttiği gerilim/akım değerleri altında, belirtilen frekansta saf sinüs kaynağı ile sürekli olarak beslenmelidir. LED ürünlerinin ışık akıları belirli aralıklarda IES LM-79-08'e uygun olarak ölçülmelidir [38]. LM-84 sadece ürünlerin ölçümü için gerekli laboratuvar şartlarını içermektedir. Ürünlerin geleceğe dönük performansları hakkında bir tahmin yöntemi sunmamaktadır. LM-84'e

uygun ölçülen ürünlerin ömür tahminleri için IES TM-28-14 "LED Lamba ve Armatürlerin Uzun Dönem Işık Akısı Sürekliliği Öngörüsü" dokümanı yayınlanmıştır [43].

2.6.2.6 IES TM-28-14 projecting long-term luminous flux maintenance of LED lamps and luminaires (LED lamba ve armatürlerin uzun dönem ışık akısı sürekliliği öngörüsü)

IES tarafından 2014 yılında yayınlanan IES TM-28-14, LM-84-14'e göre ölçümleri yapılan LED ürünler için zaman içindeki ışık akısı düşümü tahmin yöntemini açıklamaktadır [43]. Yöntemde ömür öngörüsü için LM-84 ölçüm verisi ile birlikte, LED lamba veya armatürde kullanılan LED çiplerinin LM-80 verisi ile de hesap yapılabilmektedir. TM-28, ömür öngörüsü tahmini için "direkt ekstrapolasyon" ve "kombine ekstrapolasyon" olmak üzere iki yöntem tanımlamaktadır.

Direkt ekstrapolasyon yönteminde, LED lamba veya armatürler için minimum 6000 saatlik LM-84 ölçüm sonuçları ile matematiksel yöntemler kullanılarak ömür tahminleri tanımlanmaktadır. TM-28, ışık akısının belirli seviyelere geliş zamanını veya belirli bir süre sonundaki ışık akısı düşümünü tahmin etmek için kullanılabilir (ölçümler LM-84'e uygun olarak maksimum 1000 (±48) saatlik aralıklarla gerçekleştirilmiş olmalıdır). Direkt ekstrapolasyon yöntemi ile ömür tahmininde en az üç LED ürün örneği kullanılarak bir tahmin yapılabilir. Üç ürün ile yapılmış LM-84 test verileri, TM-28 ile kullanılırsa, laboratuvar ölçüm süresinin en fazla üç katına kadar tahmin gerçekleştirilebilir. Örneğin 6000 saatlik LM-84 ölçümleri için ömür tahmini 18000 saate kadar yapılabilir. TM-28'in hesapladığı belirli bir ışık akısı düşümü (örneğin L_{70}, L_{80} vb.) için 18000 saatin üzerindeki değerlerdeki sonuçlar büyüktür işareti ile verilmelidir ($L_{70}(6k)>18000$). Test edilen ürün sayısına göre tahmin edilebilecek zaman çarpanı Çizelge 2.2'de verilmiştir. Bu çarpanlar LM-84'e göre laboratuvar ölçüm süreleri ile çarpılarak TM-28'in raporlanmasına izin verdiği zaman aralığı hesaplanabilir.

Çizelge 2.2 : Test örneği sayısına göre tahmin süresi çarpanı.

Örnek Sayısı	Çarpan
3	3
4	4
5-6	5
7-9	5,5
≥10	6

Direkt ekstrapolasyon yöntemine göre hesaplanmış sonuçlar verilirken, ürünlerin ölçüldüğü ortam sıcaklığı da belirtilmelidir. Direkt ekstrapolasyon yöntemi, minimum 6000 saatlik LM-84 ölçüm verisi ile ilk andaki ışık akısının belirli bir yüzdesine düşene kadar geçen zamanı tahmin etmektedir. İlk andaki ışık akısı %100'e normalize edilerek, sonraki ışık akısı düşümleri bağıl olarak hesaplanmaktadır.

Kombine ekstrapolasyon yönteminde, 6000 saatten az, 3000 saatten fazla LM-84 verisi ve kullanılan LED ışık kaynağının en az 6000 saatlik LM-80 verisi birlikte kombine edilerek ömür öngörü hesabı tanımlanmaktadır. Kombine yöntemde ilk ölçüm maksimum 1000 saat sonunda, diğer ölçümler ise maksimum 500 saatlik aralıklarda yapılmalıdır (±48 saat). LED ışık kaynağına, armatür etkisini belirlemek amacıyla bir düzeltme faktörü hesaplanarak, LED çipler için geçerli olan LM-80 verileri bu faktör ile çarpılıp LM-84 verilerine dönüştürülür. Ölçümler için kullanılacak LED lamba veya armatür test örneği sayısı direkt yöntemden farklı olarak en az beş olmalıdır. Kombine ekstrapolasyon yöntemi için test örneği sayısına göre tahmin edilebilecek zaman çarpanı Çizelge 2.3'te verilmiştir.

Çizelge 2.3 : Test örneği sayısına göre tahmin süresi çarpanı.

Örnek Sayısı	Çarpan
5	1,5
6	2
7	2,5
8	3
9	3,5
10	4
11	4,5
12	5
13-14	5,5
≥15	6

Çizelge 2.3'ten görülebileceği gibi, kombine ekstrapolasyon yönteminde daha fazla test örneğine ihtiyaç vardır. Direkt yöntemde olduğu gibi, örnek sayısına göre, ölçüm süresinin maksimum 6 katına kadar ömür öngörü tahmini yapılabilmektedir. TM-28-

14, LED çipler için ömür öngörü yöntemini tanımlayan TM-21-11 standardını LED lamba ve armatürlere genişletmek amaçlı bir hesap yöntemi öneren ilk doküman olması nedeniyle önemlidir.

2.6.3 Uluslararası LED aydınlatma standartları

LED'li aydınlatma sistemleri farklı elemanlardan oluştuğu için mevcut uluslararası standartlar da alttaki başlıklar altında toplanarak listelenmiştir:

- LED lamba ve modülleri
- LED kontrol elemanları
- LED ışık kaynaklı armatürler
- LED'li aydınlatma tesisatları
- LED aydınlatma sistemlerinin ölçümü
- LED'li aydınlatma sistemlerinin EMC ve EMF ölçümleri

Bu konulardaki IEC [29], CEN [26] ve CIE [27] standart ve önerileri aşağıda kısaca tanıtılmıştır.

2.6.4 LED lamba ve modülleri standartları

Bu başlık altında genel aydınlatma amaçlı kullanılan LED lamba ve modüllerinin performans ve güvenlik koşulları ile ilgili standartlar yer almaktadır.

2.6.4.1 IEC 62031:2008 / EN 62031:2008: LED modules for general lighting – safety specifications (genel aydınlatma amaçlı LED modülleri: güvenlik gereklilikleri)

Bu standart; sabit gerilim, akım veya güç altında çalışma için gerekli kontrol elemanına sahip olmayan LED modülleri ve 50 Hz veya 60 Hz frekansta, 250V gerilime kadar DC ve 1000V'a kadar AC kaynaklardan beslenebilen kendinden balastlı LED modülleri için güvenlik gerekliliklerini tanımlamaktadır [44].

2.6.4.2 IEC/PAS 62717:2011: LED modules for general lighting – performance requirements (genel aydınlatma amaçlı LED modülleri: performans gereklilikleri)

IEC tarafından çıkarılan bu standart, öncü-standart olarak nitelendirilmektedir (pre-standart) ve henüz son halini almamıştır [45]. Bu standartta aşağıda sıralanan nitelikteki LED modüllerinin performans gereklilikleri belirtilmiştir.

- 50 Hz veya 60 Hz frekansta, 250V'a kadar DC ve 1000V'a kadar AC kaynaklardan beslenebilen kendinden balastlı LED modülleri.
- Kontrol elemanının modül içinde, güç ünitesinin ise dışarıda olduğu "yarı-balastlı" LED modülleri.
- Hem kontrol elemanının hem de güç ünitesinin dışarıda olduğu balastsız LED modülleri.

2.6.4.3 IEC 62560:2011 / EN 62560: self-ballasted LED-lamps for general lighting services by voltage > 50 V - safety specifications (50 V'tan yüksek gerilimde çalışan, genel aydınlatma amaçlı, kendinden balastlı LED lambaları: güvenlik gereklilikleri)

Bu standart, genel aydınlatma ve konutsal kullanım amaçlı kendinden balastlı LED lambaların, değiştirilebilirlik ve güvenlik gerekliliklerini, test yöntemlerini içermektedir [46]. Standart kapsamındaki LED lambaların özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Nominal güçleri 60 W'tan az,
- Nominal gerilimleri 50 V ile 250 V arasında,
- Standartta belirtilen duy başlıklarına sahip olanlar.

2.6.4.4 IEC/PAS 62612:2009: self-ballasted LED-lamps for general lighting services by voltage > 50 V – performance requirements (50 V'tan yüksek gerilimde çalışan, genel aydınlatma amaçlı, kendinden balastlı LED lambaları: performans gereklilikleri)

2.6.4.3'te belirtilen tipteki kendinden balastlı LED lambaların performans gerekliliklerini içerir [47]. Sadece beyaz renk ışık veren LED lambalar için geçerlidir.

2.6.4.5 IEC 60061: lamp caps and holders together with gauges for the control of interchangeability and safety (güvenlik ve değiştirilebilirliğin kontrolü için, lamba başlık ve duyları)

Bu standart, bütün lambalar için lamba başlığı ve duylarının fiziksel gerekliliklerini tanımlamaktadır [48]. LED lambalar da standart kapsamındadır.

2.6.4.6 IEC 60838-2-2:2006 / EN 60838-2-2:2006: miscellaneous lampholders – part 2-2: particular requirements – connectors for LED-modules (çeşitli duylar – özel gereklilikler – LED modülleri için bağlantı elemanları)

Bu standart baskı devre üzerindeki LED modülleri ile kullanılacak bağlantı elemanlarının özelliklerini tanımlamaktadır [49].

2.6.4.7 IEC 61231:2010 / EN 61231:2010: international lamp coding system (ilcos) (uluslararası lamba kodlama sistemi)

Bu standartta araç (otomotiv) lambaları hariç, aydınlatmada kullanılan tüm lamba tipleri için geçerli kısaltma terminolojisi yer almaktadır [50]. LED lambalar da standart kapsamındadır.

2.6.4.8 IEC/PAS 62707-1:2011: LED – binning – part 1 : general requirements and white grid (LED – gruplama – birinci bölüm: genel gereklilikler ve beyaz ışık bölümü)

Bu standartta, beyaz ışık yayan LED'lerin, grup olarak paketlenmesindeki (binning) renk özelliklerinin ve renk matrisinin gereklilikleri tanımlanmaktadır [51].

2.6.5 LED kontrol elemanları standartları

Bu konu ile ilgili IEC ve CEN standartları aşağıda özetlenmiştir.

2.6.5.1 IEC 61347-1:2010-11 / EN 61347-1:2008: lamp controlgear – part 1: general and safety requirements (lamba kontrol elemanları – birinci bölüm: genel gereklilikler ve güvenlik gereklilikleri)

Bu standartta 50 Hz veya 60 Hz frekansta, 250 V'a kadar DC ve 1000 V'a kadar AC kaynaklardan beslenen LED modül kontrol elemanları için güvenlik gereklilikleri tanımlanmaktadır [52].

2.6.5.2 IEC 61347-2-13:2006: lamp controlgear – part 2-13: particular requirements for dc or ac supplied electronic controlgear for LED modules (lamba kontrol elemanları – bölüm 2-13: dc veya ac beslenmiş LED modüllerinin kontrol elemanları için özel gereklilikler)

Bu standart, 50 Hz veya 60 Hz frekansta, 250 V'a kadar DC ve 1000 V'a kadar AC kaynaklardan beslenen LED modül kontrol elemanlarının, besleme frekansından farklı frekanslarda çalışmaları halinde gerekli güvenlik gerekliliklerini tanımlamaktadır [53].

2.6.5.3 IEC 62384:2009 / EN 62384:2009: dc or ac supplied electronic control gear for LED modules – performance requirements (dc veya ac beslenmiş LED modüllerinin kontrol elemanları için performans gereklilikleri)

Bu standart, 50 Hz veya 60 Hz frekansta, 250 V'a kadar DC ve 1000 V'a kadar AC kaynaklardan beslenen LED kontrol elemanlarının, besleme frekansından farklı frekanslarda çalışmaları halinde gerekli performans gerekliliklerini içerir [54]. Bir önceki IEC61347-2-13:2006 standardının geliştirilmiş halidir. Bu standartta belirtilen kontrol elemanlarının, sabit akım ve gerilim altında çalışacağı kabul edilmiştir.

2.6.5.4 IEC 62386-101:2009 / EN 62386-101:2009: digital addressable lighting interface – part 101: general requirements – system (dijital adreslenebilir aydınlatma arabirimi – bölüm 101: genel gereklilikler)

Bu standartta DC veya AC bir kaynakla kullanılan aydınlatma elemanlarının, dijital sinyal ile kontrolünü sağlamak için gerekli protokol verilmektedir [55]. LED ışık kaynaklı aydınlatma tesisatları da standart kapsamındadır.

2.6.5.5 IEC 62386-102:2009 / EN 62386-102:2009: digital addressable lighting interface – part 102: general requirements – control gear (dijital adreslenebilir aydınlatma arabirimi – bölüm 102: genel gereklilikler – kontrol aksamı)

Bu standart 2.6.5.4'te belirtilen kontrol elemanlarının test yöntemlerini açıklamaktadır [56].

2.6.5.6 IEC 62386-207:2009 / EN 62386-207:2009: digital addressable lighting interface – part 207: particular requirements for control gear – LED modules

(dijital adreslenebilir aydınlatma arabirimi – bölüm 207: kontrol aksamı için özel gereklilikler – LED modülleri)

Bu standart 2.6.5.4'te açıklanan standartın, LED modülleri için özelleştirilmiş halidir [57].

2.6.6 LED ışık kaynaklı armatür standartları

Bu bölümde LED ışık kaynaklı armatürler için mevcut IEC ve CEN standartları özetlenmiştir.

2.6.6.1 IEC 60598 / EN 60598: luminaire safety (armatür güvenliği)

IEC 60598 serisi, 1000V'a kadar besleme gerilimi ile çalışan tüm aydınlatma armatürleri için güvenlik gerekliliklerini, armatür sınıflandırmasını, etiketlenmesini, mekanik ve elektriksel gereklilikleri ve bunlarla ilgili testleri içermektedir. Dolayısıyla LED ışık kaynaklı armatürleri de kapsamaktadır [58].

2.6.6.2 IEC/PAS 62722-1:2011: luminaire performance – part 1 – general requirements ve iec/pas 62722-2-1:2011 luminaire performance – part 2-1 – particular requirements for LED luminaires (armatür performansı – bölüm 1 – genel gereklilikler ve armatür performansı – bölüm 2-1 – LED armatürler için özel gereklilikler)

IEC/PAS 62722-1, 1000 V'a kadar besleme gerilimi ile çalışan aydınlatma armatürleri ile birlikte verilmesi gereken çevresel ve performans verilerini tanımlamaktadır [59]. IEC/PAS 62722-2-1 ise aşağıda verilen sınıflara giren LED armatürleri için performans verilerini içermektedir [60].

- A Tipi: IEC/PAS 62717 standartına uyumsuz LED modülleri kullanan armatürler.
- B Tipi: IEC/PAS 62717 standartına uyumlu LED modülleri kullanan armatürler.
- C Tipi: IEC/PAS 62722-1 standartına uyumlu LED modülleri kullanan armatürler.

2.6.7 LED'li aydınlatma tesisatları için standartlar

LED'li aydınlatma tesisatları için geçerli olan IEC ve CEN standartları aşağıda özetlenmiştir.

2.6.7.1 IEC/TS 62504:2011: terms and definitions for LEDS and LED modules in general lighting (genel aydınlatma amaçlı kullanılan LED'ler ve LED modüller için terimler ve tanımlar)

Bu standart, genel aydınlatma amaçlı kullanılan LED ve LED modülleri için tanımları içermektedir [61].

2.6.7.2 IEC 62471:2006 / EN 62471:2008: photobiological safety of lamps and lamp systems ve ıec 62471-2:2009: photobiological safety of lamps and lamp systems – part 2: guidance on manufacturing requirements relating to non-laser optical radiation safety (lambaların ve lamba sistemlerinin fotobiyolojik güvenliği / lambaların ve lamba sistemlerinin fotobiyolojik güvenliği – bölüm 2: lazer dışı optik radyasyon güvenliği ile ilgili üretim gerekliliği kılavuzu)

Bu iki standart lambaların ve aydınlatma armatürlerinin fotobiyolojik güvenlikleri için gereklilikleri tanımlamaktadır. 200 – 3000 nm dalga boyları arasında radyasyon yayan kaynaklar ve dolayısıyla LED'ler için de kullanılabilmektedirler [62] [63].

2.6.8 LED'li aydınlatma sistemlerinin ölçümü için standartlar

LED'li aydınlatma sistemlerinin ölçümü ile ilgili standartlar ve öneriler aşağıda açıklanmıştır.

2.6.8.1 CIE 127:2007: measurement of LEDs (LED'lerin ölçümü)

LED'lerin fotometrik ölçümleri için bir çok standart ve öneriye temel oluşturan, en çok başvurulan dokümanlardan biri, CIE 127:2007'dir [64]. Teknik rapor olarak yayınlanmış olan bu çalışma birçok standarda kaynak olma niteliği taşımaktadır. Yüksek güçlü LED'lerin aydınlatma sistemlerinde kullanılmaya başlanmasından sonra CIE, 127:1997 no'lu aynı adı taşıyan teknik dokümanını güncelleyerek 127:2007'yi yayınlamıştır. Bu yayında "tekil" LED paketlerinin laboratuvar koşullarında fotometrik, radyometrik ve renksel ölçümleri için yol gösterici bilgiler yer almaktadır. Birden fazla LED içeren modül şeklindeki kaynaklar, LED aydınlatma armatürleri ve organik LED'ler (OLED) bu dokümanın kapsamı dışındadır. Standart, LED'lerin

üretimi esnasında gerekli olan test yöntemlerini de içermemektedir. LED'lerin 25 °C ortam sıcaklığında ölçülmesini tavsiye eden doküman, fotometrik ve radyometrik analizler için geniş açıklamalara yer vermiştir. Bunun yanında sıcaklık için çok az bir bölüm ayırmış ve LED'lerin özelliklerinin sıcaklık ile değişebileceğini vurgulamış, fakat sıcaklığa bağlı değişimler için bir ölçüm yöntemi önermemiştir.

2.6.8.2 EN 13032 : light and lighting – measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires (ışık ve aydınlatma – lamba ve armatürlerin ölçümü ve fotometrik verilerin sunumu)

EN 13032 standartı sırasıyla,

- 13032-1. Ölçüm ve fotometrik verilerin sunumu
- 13032-2. İç ve dış çalışma ortamları için fotometrik verilerin sunumu
- 13032-3. Acil aydınlatma sistemleri için fotometrik verilerin sunumu bölümlerinden oluşmaktadır. LED'li aydınlatma sistemleri de farklı bir çalışma olmadığı için, bu kapsamda değerlendirilmektedir [65].

2.6.8.3 IEC/TR 61341:2010: method of measurement of centre beam intensity and beam angle(s) of reflector lamps (reflektörlü lambalar için merkez ışın şiddeti ve ışın açılarını ölçme yöntemi)

Bu standartta, enkandesen, tungsten halojen, gaz-deşarj ve LED bazlı reflektörlü lambaların merkez ışın şiddetini ve yayılan ışığın açısını ölçmek için gereklilikler açıklanmaktadır [66].

2.6.9 LED'li aydınlatma sistemlerinin elektromanyetik gereklilikleri (electromagnetic compatibility – emc) ve elektromanyetik alan (electromagnetic field – emf) ölçümleri için standartlar

LED'li aydınlatma armatürlerinin EMC ve EMF testleri:

- IEC/EN 61547 (2009) "Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements", (Genel aydınlatma amaçlı cihazlar – Elektromanyetik uyumluluk gerekleri) [67]
- IEC/EN 61000-3-2 (2009), "Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions (equipment input current ≤16

A per phase)", (Elektromanyetik uyumluluk – Bölüm 3-2: Limitler – Harmonik akım emisyonları için limitler (faz başına giriş akımı ≤16 A)) [68]

- IEC CISPR 15/EN 55015 (2009) "Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment", (Elektriksel aydınlatma sistemleri ve benzer cihazlar için, radyo bozunum karakteristiklerinin limitleri ve ölçüm yöntemleri) [69]
- IEC/EN 62493 (2009) "Assessment of lighting equipment related to human exposure to electromagnetic fields", (Aydınlatma elemanlarının oluşturduğu elektromanyetik alanın insanlar üzerine etkilerinin değerlendirilmesi) [70] standartları ile belirlenmektedir.

2.6.10 LED standardizasyonu için teknik komiteler

LED'ler konusunda gerekli olan standartların hazırlanması amacıyla bir çok kurum bünyesinde teknik komiteler oluşturulmuş ve aktif olarak LED standardizasyonu üzerine çalışmalar başlatılmıştır.

Bu konuda CIE bünyesinde çalışan teknik komiteler aşağıda sıralanmıştır:

- TC2-46 CIE/ISO standards on LED intensity measurements (LED ışık şiddeti ölçümleri için CIE/ISO standartlarının hazırlanması)
- TC2-50 Measurement of the optical properties of LED clusters and arrays (LED demeti ve dizilerinin optik özelliklerinin ölçülmesi)
- TC2-58 Measurement of LED radiance and luminance (LED radyans ve parıltı değerlerinin ölçümü)
- TC2-63 Optical measurement of High-Power LEDs (Yüksek güçlü LED'lerin optik ölçümleri)
- TC2-64 High speed testing methods for LEDs (LED'ler için hızlı test yöntemleri)
- TC1-69 Colour rendition by white light sources (Beyaz ışık kaynaklarının renk özelliklerinin sunumu)

IEC bünyesinde oluşturulan teknik komiteler ise aşağıdadır:

- TC34 Lamp and related equipment (Lamba ve ilgili ekipmanları)

- SC34A Lamps and glow starters (Lambalar ve ateşleyicileri)
- SC34B Lamp caps and holders (Lamba başlık ve duyları)
- SC34C Lamp control gear (Lamba kontrol elemanları)
- SC34D Luminaires (Armatürler)

Bunlar dışında IESNA ve JEDEC bünyesinde de LED standardizasyonu konusundaki teknik çalışmalar yoğun olarak devam etmektedir.

Bir sonraki bölümde LED armatürlerin tasarımı ile ilgili genel bilgi verilecektir.

3. LED ARMATÜR TASARIMI

Bu bölümde LED armatür tasarımı ile ilgili optik, ısıl ve elektriksel tasarım süreçlerine yer verilecektir.

3.1 Armatürler

Armatürler ışık kaynaklarını barındıran yapılardır. Işık kaynaklarını, ışığı dağıtmak için optik elemanları, ışık kaynaklarını korumak, yerleştirmek ve elektrik bağlantısını sağlamak için tutucuları ve bağlantı parçalarını, montaj ve koruma için gerekli mekanik bağlantı elemanlarını içerirler. Aşağıdaki işlevleri yerine getirmek için tasarlanırlar [71]:

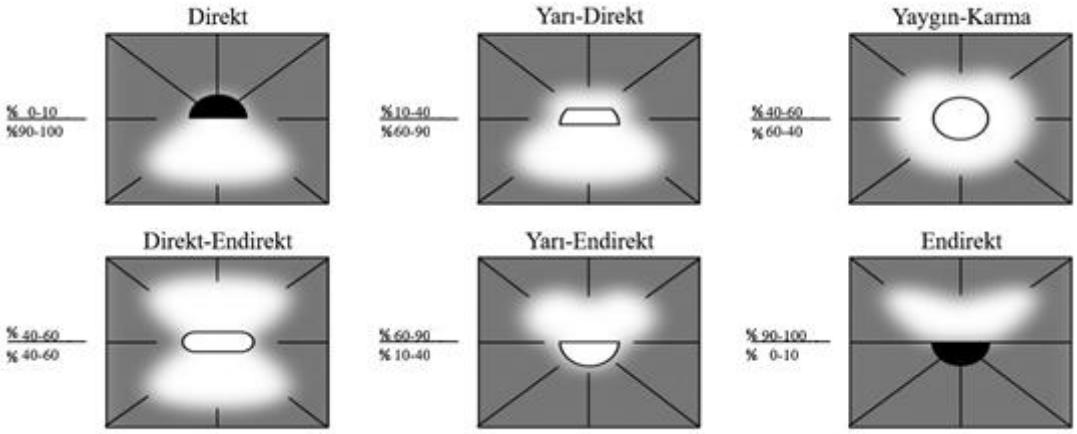
- Işık kaynağından çıkan ışık akısını kontrollü bir şekilde dağıtmak
- İçlerindeki ışık kaynakları için gerekli elektrik bağlantısını sağlamak
- Işık kaynağını fiziksel olarak korumak
- Yüksek verimli olmak
- Kullanım koşullarına dayanıklı olmak
- Güvenli olmak

Armatürün boyutu, malzemesi, optik, ısıl ve elektriksel tasarımları kullanılan ışık kaynağının cinsine göre değişir. Verimli uygulamalar için armatürlerin optik, ısıl-mekanik ve elektriksel açıdan doğru tasarlanmaları gerekmektedir.

3.2 Armatürlerin Sınıflandırılması

Armatürler içlerindeki ışık kaynağına, montaj tipine, fiziksel yapısına, kullanıldığı uygulamaya veya fotometrik karakteristiklerine göre sınıflandırılırlar. Örnek olarak endüstriyel yapılarda, konutlarda veya ticari binalarda kullanılan armatürler, farklı uygulama örnekleri olarak adlandırılır. Fotometrik karakteristiklerine göre sınıflandırma için CIE'nin sınıflandırma sistemi örnek gösterilebilir. CIE, armatürleri alt ve üst yarı uzaya gönderdikleri ışık akısı oranlarına göre sınıflandırır. Bu sistem

genelde iç aydınlatma armatürlerinde kullanılır. İç aydınlatma armatürleri CIE sistemine göre Şekil 3.1'de gösterildiği gibi sınıflandırılmaktadır [9]:



Şekil 3.1 : Işık akısı dağılımlarına göre CIE iç aydınlatma armatürleri sınıflandırma sistemi.

- Direkt Aydınlatma: Armatürün toplam ışık akısının %90-100'ünün, alt yarı uzaya doğru yönlendirildiği aydınlatma sistemleridir.
- Yarı-Direkt Aydınlatma: Armatürün toplam ışık akısının %60-90'ının, alt yarı uzaya yönlendirildiği aydınlatma sistemleridir. Işık akısının kalanı, tavan, duvarlar gibi yapı elemanlarından yansıyarak çalışma düzlemine ulaştırılır.
- Yaygın-Karma Aydınlatma: Armatürden çıkan toplam ışık akısı, eşit oranlarda her yöne yönlendirilerek çalışma düzlemlerine ulaştırılır.
- Direkt-Endirekt Aydınlatma: Armatürden çıkan toplam ışık akısının, eşit oranlarda direkt ya da endirekt olarak çalışma düzlemine ulaştığı aydınlatma biçimidir. Armatürün toplam ışık akısının %40-60'ı alt yarı uzaya yönlendirilirken, %60-40'ı üst yarı uzaya yönlendirilir.
- Yarı-Endirekt Aydınlatma: Armatürden çıkan toplam ışık akısının %60-90'ı üst yarı uzaya, kalan kısım ise alt yarı uzaya yönlendirilir.
- Endirekt Aydınlatma: Armatürden çıkan toplam ışık akısının %90-100'ü üst yarı uzaya yönlendirilir.

Bir diğer sınıflandırma yöntemi ise uluslararası koruma sistemidir (Ingress Protection - IP) ve armatürleri dışarıdan gelen toz, nem vs. gibi etkilere dayanıklılıklarına göre sınıflandırmaktadır. IP sistemi IEC tarafından geliştirilmiştir ve IEC 60529 numaralı

"Muhafazalar Tarafından Sağlanan Koruma Seviyesi – IP Kodu (Degrees of Protection Provided by Enclosures - IP Code)" standartı ile test şartları belirlenmiştir [72]. Koruma sınıfları IP harflerinden sonra gelen 2 rakamla ifade edilirler. İlk rakam dışarıdan gelebilecek katı cisimlere ve toza karşı koruma sınıfını; ikinci rakam ise suya karşı koruma sınıfını gösterir. Çizelge 3.1 ve 3.2'de koruma sınıflarını gösteren rakamların açıklamaları verilmiştir:

Çizelge 3.1 : Dışarıdan gelebilecek katı cisimlerin ve tozun girişine göre koruma seviyeleri.

Rakam	Koruma seviyesi
0	Korumasız
1	Çapı 50 mm'den büyük katı cisimlere karşı korumalı
2	Çapı 12 mm'den büyük katı cisimlere karşı korumalı
3	Çapı 2,5 mm'den büyük katı cisimlere karşı korumalı
4	Çapı 1 mm'den büyük katı cisimlere karşı korumalı
5	Tozun birikmesine karşı korumalı
6	Toz geçirmez

Çizelge 3.2 : Sıvıya karşı koruma seviyeleri.

Rakam	Koruma seviyesi
0	Korumasız
1	Düşey su damlalarına karşı korumalı
2	15°'lik açıyla gelen su damlalarına karşı korumalı
3	60°'lik açıyla gelen su damlalarına karşı korumalı
4	Herhangi bir yönden sıçrayan su damlalarına karşı korumalı
5	Su jetlerine (basınçlı suya) karşı korumalı
6	Deniz ve okyanus şartlarına göre korumalı
7	Suya batırılmaya karşı korumalı
8	Belirli bir derinliğe kadar korumalı
9	Sıcak, basınçlı suya karşı korumalı

Bu sınıflandırmalar dışında elektrik yalıtımına, yanabilirliğine, maksimum ışık şiddeti açısına göre farklı armatür sınıflandırma sistemleri mevcuttur. LED ışık kaynaklı armatürler de diğer konvansiyonel armatürler gibi bu sınıflandırmalara ve mevcut standartlara uygun olmak zorundadırlar.

3.3 Armatürler ile Işık Kontrolü

Bir çok ışık kaynağı, ışık akısını bir küre şeklinde her açıda dağıtır. Armatürlerde, ışık kaynağından çıkan ışığı toplayıp belirli bir yöne verimli bir şekilde dağıtmak için optik kontrol elemanları kullanılır. LED ışık kaynakları ise, diğer ışık kaynaklarından farklı olarak ışığı belirli bir yöne, doğrultuya toplu olarak yönlendirirler. Günümüzde

kullanılan bir çok yüksek güçlü LED, üzerlerinde yarım küre şeklinde bir dağıtıcı lens ile birlikte üretilmektedir. Birincil lens olarak adlandırılan bu lensler LED'lerin ışığının kontrollü bir şekilde ortama verilmesini sağlarlar.

Işığın optik kontrolü için armatürlerde kullanılan en temel elemanlar aşağıda listelenmiştir.

3.3.1 Reflektörler (yansıtıcılar)

Reflektörler, yüksek yansıtma katsayısına sahip, kaplanmış metal veya plastikten üretilen ve ışık kaynağından çıkan ışığı yansıtan elemanlardır. Yüzey özelliklerine göre aynasal, izotrop yayınık ve yayınık olarak ayrılırlar (Şekil 3.2) [9].



Şekil 3.2 : Aynasal, izotrop yayınık ve yayınık yansımalar.

Işık yönünü hassas olarak ayarlamak için aynasal reflektörler kullanılır. Işık, yüzeye geldiği açı ile yüzeyi terkeder. İzotrop yayınık reflektörler (ideal dağıtıcı-Lambert yüzeyi) üzerine düşen ışığı her yönde eşit olarak dağıtırlar. Eşit bir ışık dağılımı istendiğinde kullanılırlar. Yayınık reflektörler, aynasal reflektörlerin yüzey şekillerinin istenilerek belirli desenlerde bozulmuş halleridir. Üzerlerine gelen ışığı her yöne rastgele dağıtırlar. Genelde ışığı geniş bir şekilde dağıtmak için kullanılırlar. Farklı reflektör yüzeyi örnekleri Şekil 3.3'te verilmiştir [73].



Şekil 3.3 : Farklı reflektör yüzeyi örnekleri.

3.3.2 Refraktörler (kırıcılar)

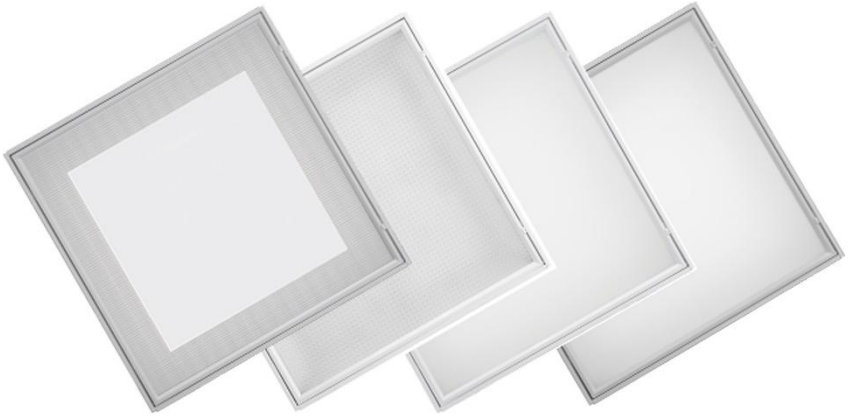
Işık kaynağından çıkan ışığa yön vermek için kullanılırlar. Genel olarak cam veya plastik gibi havadan farklı kırılma endeksine sahip malzemelerden üretilirler. Işık bu malzemelerden geçerken, kırılma endeksinin farkına göre yön değiştirir. Armatürlerde kullanılan prizmatik yüzeyler veya daha küçük LED gibi noktasal kabul edilebilecek ışık kaynaklarında kullanılan lensler refraktörlere örnek olarak verilebilirler (Şekil 3.4) [74].



Şekil 3.4 : LED ışık kaynakları için lens örnekleri.

3.3.3 Yayıcılar

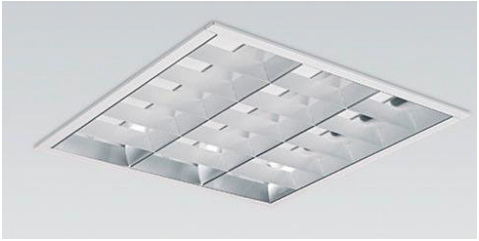
Bir ışık kaynağı tarafından yayılan ışığın homojen olarak her yöne dağıtılması için kullanılırlar. Malzemenin cinsine göre bir miktar yutulma olacağı için ışık miktarı azalır. Opak camlar, yarısaydam plastikler gibi çeşitleri mevcuttur. Şekil 3.5'te yayıcı örnekleri verilmiştir [75].



Şekil 3.5 : Yayıcı örnekleri.

3.3.4 Ekranlama elemanları (louvrlar)

Kamaşmanın önlenmesi için belirli açılardan ışık kaynağının direkt olarak görülmesini engellemek için kullanılırlar (Şekil 3.6).



Şekil 3.6 : Ekranlama elemanı örneği.

3.4 LED Işık Kaynağı Kullanan Armatür Tasarım Süreci

LED armatür tasarlarken 2 temel yöntem kullanılabilir. Sıfırdan LED bazlı bir armatür tasarlamak veya LED bazlı bir ışık kaynağı tasarlayarak konvansiyonel ışık kaynağı kullanan mevcut bir armatür içine yerleştirmek. Sıfırdan tasarlanan bir armatürde LED'lerin optik, ısıl ve elektriksel performansları dikkate alındığı için konvansiyonel ışık kaynağına göre tasarlanmış bir armatüre göre daha verimli olacaktır. Tasarım süreci için örnek bir yol haritası aşağıdaki gibi tanımlanabilir:

- Armatürün kullanılacağı ortamdaki gerekli aydınlatma kriterlerinin belirlenmesi
- Belirlenen aydınlatma kriterlerine göre tasarım hedeflerinin belirlenmesi
- Tasarlanacak armatürün optik, ısıl ve elektriksel verimlerin belirlenmesi
- Belirlenen verimlere göre gerekli LED sayısının bulunması
- Optik, mekanik ve ısıl analizler yapılarak tasarımın gerçekleştirilmesi
- Prototip üretilerek simülasyon sonuçları ile gerçek verilerin karşılaştırılması

Yukarıda sıralanan adımlar aşağıdaki bölümlerde açıklanmıştır.

3.4.1 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 armatür tasarım hedeflerinden önce belirlenmesi gerekmektedir. Armatür tasarımına başlarken tasarlanacak armatürün kullanılacağı alanlar için geçerli mevcut standart ve öneriler incelenmelidir. Farklı bir yaklaşım olarak da, o alanda kullanılan mevcut armatürlerin fotometrik özelliklerine göre tasarım hedefleri belirlenebilir. Armatür tasarımının bu ilk adımında kullanılabilecek örnek armatür karakteristik özellikleri aşağıda sıralanmıştır:

- Armatür ışık dağılımı
- Armatür renksel özellikleri (renk sıcaklığı, renksel geriverim endeksi)
- Armatür kamaşma sınırlaması
- Armatür koruma sınıfı [IPXY]
- Armatürün toplam ışık akısı [lm]
- Armatür maksimum gücü [W]
- Armatür etkinlik faktörü [lm/W]

Tasarıma başlarken ilk adım olarak yukarıdaki kriterlerin minimum değerleri belirlenmelidir.

3.4.2 Tasarım hedeflerinin belirlenmesi

Minimum tasarım kriterleri belirlendikten sonra tasarım hedefleri konulmalıdır. Kritik tasarım hedefleri armatür içindeki ışık kaynaklarının toplam ışık akısı çıktısı ve çekilen güç ile ilgili olacaktır. Tasarım hedefi olabilecek diğer kriterler aşağıda sıralanmaktadır:

- Kullanılacak LED'lerin sıcaklığa bağlı ışık akıları ve güçleri [lm, W ve lm/W]
- Kullanılacak LED'lerin renksel özellikleri (renk sıcaklığı ve renksel geriverim)
- Kullanılacak LED'lerin IES LM-80-08'e göre ölçülüp [40] IES TM-21-11'e göre [41] hesaplanmış ömür değerleri [saat]
- Armatür ışık dağılım eğrileri
- Armatür koruma sınıfı [IPXY]
- Kullanılacak optik elemanlar, mekanik gövde ve sürücü devresine göre armatürün optik, ısıl ve elektriksel verimleri
- Armatürden dış ortama yayılan toplam ışık akısı [lm]
- Armatür toplam gücü (yardımcı elemanlar ve sürücü kayıpları dahil) [W]
- Armatür etkinlik faktörü [lm/W]
- Armatür ömrü [saat]
- Armatür maliyeti [TL]

Tasarım sürecinde en önemli konulardan biri kullanılan LED sayısıdır. LED sayısı direkt olarak ışık akısını, çalışma sıcaklığını, güç tüketimini ve armatür maliyetini etkiler. Hedeflenen ışık akısını, LED'lerin katalogda verilen ışık akısı değerlerine bölerek LED sayısını hesaplamak çok kullanılan bir yöntemdir. LED'lerin ışık akıları jonksiyon sıcaklığı, sürme akımı gibi bir çok faktöre bağlıdır. Sürme akımı ve çalışma sıcaklığı gözetilmeden, sadece katalog değerleri ile yapılan tasarımlar genel olarak beklenenden düşük ışık akısı elde edilmesine sebep olmaktadır. Gerekli LED sayısını kesin olarak belirlemek için optik, ısıl kayıplar göz önünde bulundurulmalıdır. Bu yüzden tasarımların bilgisayar ortamında gerek optik gerekse ısıl yönden analizi önemlidir.

3.4.3 Tasarlanacak armatürün optik, ısıl ve elektriksel verimlerinin belirlenmesi

Optik verim, armatürün optik tasarımı ile ilgilidir. Bu kayıplar iki şekilde olabilir; ışığı istenilen şekilde dağıtmak için Bölüm 3.3'te verilen optik elamanların kullanılması ve kullanılan optik eleman cinsine göre ışığın yutulması veya ışığın düzgün kontrol edilemeyip armatür gövdesi içinde yutulması. Armatür içinde kayıplar olursa, dış ortama yayılan ışık akısı azalmaktadır. Armatür verimi (armatürden çıkan ışık akısı/ışık kaynaklarının ürettiği toplam ışık akısı), ışık kaynağının yerleşimi, armatürün fiziksel özellikleri, kullanılan malzeme vb. gibi etkenlere bağlıdır.

Isıl verim, LED'lerin jonksiyon sıcaklığına bağlıdır. Literatür özetinde verilen bir çok kaynakta, ışık akısının sıcaklığın artışı ile düştüğü açıklanmaktadır [1]. Piyasada bulunabilecek LED çip katalogları genel olarak 25°C jonksiyon sıcaklığındaki ışık akısını vermektedir. Literatürde soğuk ışık akısı olarak da adlandırılan bu değerler, genel olarak LED üretim bandında 10-20 ms aralığında darbeli akımlar sonucunda elde edilen ışık akısı değerleridir [76]. Bu ölçümlerde LED'ler çok kısa bir süre için ışık vermekte ve jonksiyon bölgelerinde sıcaklık artışı olmamaktadır. Isıl dengeye ulaşmadan ölçülen LED'ler, gerçek çalışma koşullarında daha düşük performans göstermektedir. Bazı LED üreticileri kataloglarında belirli bir jonksiyon sıcaklıklığındaki ışık akılarını (genelde 85 °C) verebilmektedir. Sıcak lümen olarak adlandırılan bu ışık akıları ile yapılan armatür tasarımları daha gerçeğe yakın sonuçlar verebilmektedir. Armatürün ısıl analizi yapılarak LED'lerin çalışma sıcaklığı belirlenmeli ve buna göre performans tahmini yapılmalıdır.

LED ışık kaynaklı armatürlerin ihtiyaç duyduğu doğru akımı sağlamak için sürücüler kullanılır. Sürücüler, şebekeden çektikleri gücü LED'lerin çalışması için gerekli sabit akıma çevirirler. Bu dönüşüm %100 verimli değildir. Piyasada bulunabilecek tipik sürücülerin verimi %60-95 aralığındadır. Sürücü seçimi yapılırken, armatür etkinlik faktörü hedefi gözetilmeli ve uygun, yüksek verimli sürücüler seçilmelidir.

3.4.4 Gerekli LED sayısının belirlenmesi

LED armatür için kullanılacak LED'lerin seçiminden sonra, armatürün optik ve ısıl verimi belirlenmelidir. Tasarım kriterlerinde belirlenen ışık akısı değeri, optik ve ısıl verimlerin çarpımına bölünerek gerekli LED sayısı bulunur. Elektriksel verim şebekeden çekilen gücü etkilediği için, ışık akısı hesabında etken değildir. Armatür etkinlik faktörü, armatür toplam ışık akısının şebekeden çekilen güce bölünmesiyle hesaplanır [lm/W].

Armatür tasarım hedeflerinde belirlenen gerekli ışık akısı ve LED sayısı denklem 3.1 ve 3.2'de gösterildiği gibi hesaplanır. Armatür için gereken ışık akısı, armatürün LED'lerin ısıl verimine etkisi ve kullanılan optik elemanların ışık yutma oranlarına bağlı olarak hedeflenen ışık akısından fazla olmalıdır. Kullanılan LED'lerin ışık akıları, sıcaklık etkisi ile düşecek, ayrıca kullanılan optik elemanların (lens, reflektör, kapak vb.) yutuculuğu sebebiyle de azalacaktır. Armatürün vereceği ışık akısının istenilen değerde olması için ısıl ve optik verimler dikkate alınmalıdır.

$$\text{Gerekli Işık Akısı} = \text{Hedeflenen Işık Akısı}/(\eta_{\text{ısıl}} \times \eta_{\text{optik}}) \quad (3.1)$$

$$\text{LED Sayısı} = \text{Gereken Işık Akısı}/\text{Tek LED'in verdiği ışık akısı} \quad (3.2)$$

Denklem 3.1'den görüldüğü gibi, LED armatürün sağlayacağı ışık akısı (hedeflenen ışık akısı), sistemin optik ve ısıl verimine bağlıdır. Bu verimler hesaplandıktan sonra gerekli LED sayısı denklem 3.2 kullanılarak hesaplanabilir.

3.4.5 Optik, mekanik ve ısıl analizler yapılarak tasarımın gerçekleştirilmesi

Kullanılacak LED ışık kaynaklarının optik ile ısıl verimleri ve kullanılacak sürücünün elektriksel verimleri belirlendikten sonra bütünsel tasarıma geçilir. Bütünsel tasarım sistem tüm elemanları ile ele alınarak optik ve ısıl simülasyon programları kullanılarak

gerçekleştirilir ve prototip üretiminden önce tasarım hedefleri kontrol edilerek prototip aşamasına geçilir.

3.4.6 Prototip süreci

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

Görüldüğü gibi LED armatür tasarlanırken, armatürü ve ışık kaynağını bir bütün olarak düşünmek gerekmektedir. Konvansiyonel sistemler ile LED'li armatür tasarımları arasındaki temel fark budur. LED'ler ile kurulan sistemler, soğutma sorunları nedeniyle, kullanılacakları yerlere veya kullanılan LED'lere özel çözümler içereceklerdir. Farklı bir LED kullanılırsa, ısıl özelliklerden dolayı tasarım değişebilir. LED armatür için tasarım çalışması yapılırken, LED'lerin optik, ısıl ve elektriksel özellikleri iyi belirlenip, simülasyon yazılımları ile gerçek çalışma koşulları doğrulanmalıdır. Bir sonraki bölümde LED çiplerinin ısıl simülasyonları anlatılacaktır.

4. LED ÇİPLERİN KOMPAKT ISIL MODELLER İLE SİMÜLASYONU

Sıcaklığın yükselmesiyle ömürleri azalan, verimleri düşen ve renksel özellikleri bozulan LED'ler, tasarımcıların katalog verilerine dayanarak yaptıkları tasarımlarda ilk tasarım kriterlerini sağlayamamaktadır. LED armatür tasarımında, armatürün iç sıcaklığını ve buna bağlı olarak da LED jonksiyon sıcaklığını tahmin edebilmek, o sıcaklıkta kullanılacak LED'lerin optik ve renksel özelliklerini belirlenebilir bir hale getirmektedir.

Bu bölümde LED jonksiyon sıcaklıklarını bilgisayar yardımı ile tahmin edebilmek için kullanılabilecek simülasyon yöntemleri açıklanarak, örnek armatürler üzerinde gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarına yer verilecektir.

4.1 Kompakt Isıl Modeller

Teknolojinin gelişmesi, tekil olarak elektronik elemanların ısıl modellenmesinin yanı sıra, elektronik eleman içeren sistemlerin bütünüyle modellenmesine olanak sağlamaktadır. Elemanların lehimlendiği baskı devre kartları, ısıl arabirim malzemeleri, gövde ve mekanik aksamın da detaylı ısıl analizleri gerçekleştirilebilmektedir. Bu tür elemanların ısıl simülasyonları, uzun hesaplama sürelerini kısaltabilmek için basitleştirilmiş kompakt ısıl modeller ile yapılmaktadır. JEDEC ısıl modellerin basitleştirilebilmesi için iki kompakt ısıl model (KIM) önermiştir [31]. KIM'lar üreticiden üreticiye modelleri aktarabilmek ve gerçeğe yakın sonuçlar alabilmek için geliştirilmiştir. Bu modeller sınır şartlarından bağımsız, çok kompleks olmayan ve üreticiden üreticiye değişmeyen yapılar olmalıdırlar.

Kompakt ısıl modeller aşağıdaki kabulleri içermektedir:

- Elektronik elemanın ısı yayan bölgesi tek bir nokta ile ifade edilir (jonksiyon noktası)
- Elektronik eleman bir baskı devre üzerine lehimlidir
- Isıl direnç ağları, ısıl yolları ve direnç noktalarını belirlemek için kullanılır

- Dış yüzeyler tek bir sıcaklık noktası olarak ifade edilir

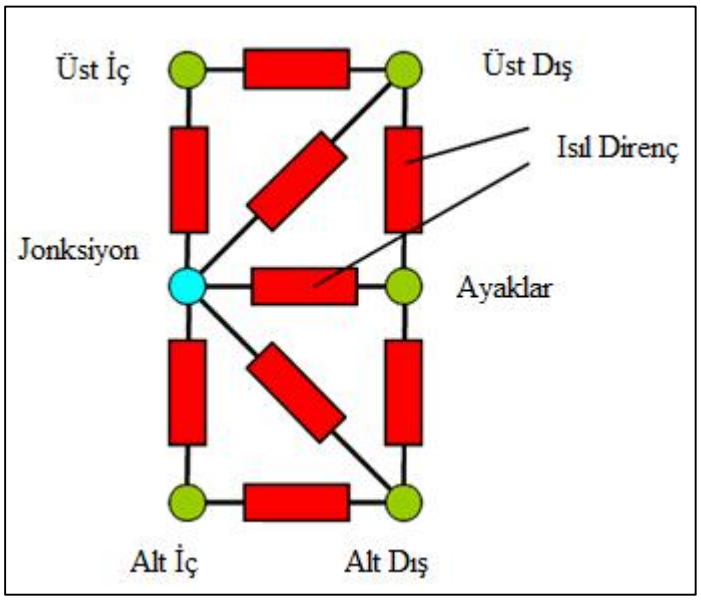
Isı, elektronik elemandan aşağıdaki noktalara ilerleyebilir:

- Üst yüzeyden ortamdaki akışkana veya soğutucu bloğa
- Yan yüzeylerden ortamdaki akışkana
- Alt yüzeyden lehim bacaklarına ve baskı devre kartına

JEDEC tarafından standartlaştırılan iki adet kompakt ısıl model mevcuttur:

- DELPHI (DEvelopment of Libraries of PHysical models for an Integrated design) KIM [77]
- İki-Direnç (İD) KIM [78]

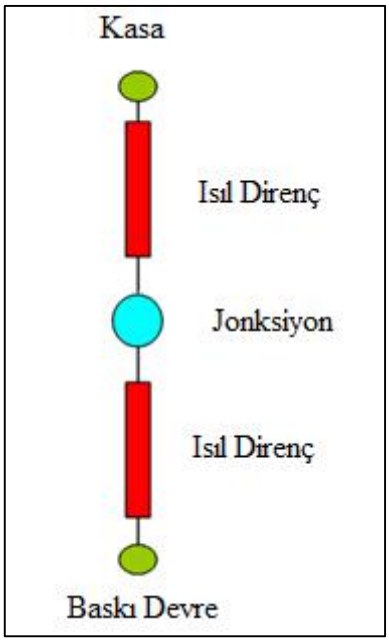
DELPHI, ısıl direnç yollarıyla bağlanmış karmaşık elektronik elemanları modellemeye yarayan bir kompakt ısıl modeldir. Isıl direnç ağı Şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1 : DELPHI kompakt ısıl model.

DELPHI modelinde ısının üretildiği jonksiyon noktası alt ve üst yüzeyin, iç ve dış noktaları ile baskı devre bağlantı noktalarına direkt olarak ısıl dirençler ile bağlanmıştır. Elektronik eleman ise baskı devreye ayaklar ile bağlanmıştır. Her yol için tek bir ısıl direnç kullanılmaktadır. Yan yüzeyler için herhangi bir nokta tanımlaması yoktur.

İki-Direnç (2D) modeli, DELPHI modeline göre daha sadeleştirilmiş bir modeldir. Her yol için tek bir ısıl direnç kullanılmaktadır. Jonksiyon bölgesi, alt ve üst bölgeler tek bir nokta ile temsil edilmiştir. Şekil 4.2'de 2D modeli gösterilmektedir.



Şekil 4.2 : İki-direnç kompakt ısıl model.

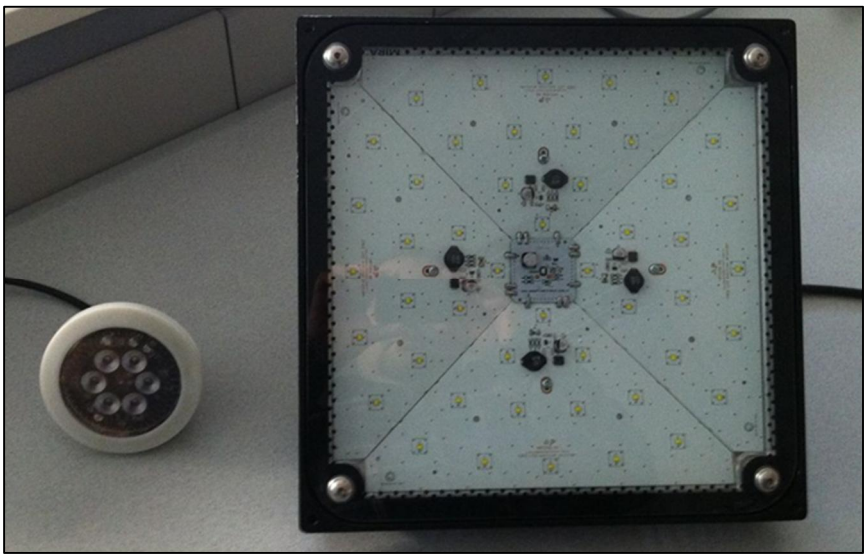
Elektronik elemandan atılan ısının jonksiyon noktasından çıktığı kabul edilmiştir. Isının bir kısmının alttan baskı devreye, bir kısmının da üst taraftan ortamdaki akışkana veya soğutucu bloğa geçtiği varsayılır. 2D modeli LED'lerin ısıl olarak modellenmesi için çok uygundur. Çünkü LED'ler de, jonksiyon noktalarından ısı yayan ve üst tarafları ortamdaki akışkan ile temasta bulunan, alt kısımları ise baskı devreye bağlı elektronik elemanlardır. Yan taraflardan olan ısı akışı 2D modelinde ihmal edilmiştir. LED çiplerin yan yüzeylerinin çok küçük ve dar olduğu düşünüldüğünde, yan yüzeylerden havaya geçecek olan ısı ihmal edilebilir. Şekil 4.1 ve 4.2'den görüldüğü gibi, 2D modeli, DELPHI modeline göre daha basit bir yapıya sahiptir. Basit yapısından dolayı hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programına kolaylıkla entegre edilebilmektedir. Karmaşık olmayan yapısıyla hesaplama sürelerini düşürmektedir.

4.2 İki-Direnç Modeli Kullanılarak LED Armatürlerin Modellenmesi

Tez çalışması sürecinde LED armatürlerin 2D modeli kullanılarak modellenmesi konusunda "Thermal simulation and validation of LED based luminaires using two-resistor compact thermal model" isminde bir makale yayınlanmıştır . Bu bölümde

makale içeriğinde kullanılan yöntemlerden ve modelin doğrulanması için izlenen yoldan bahsedilecektir [79].

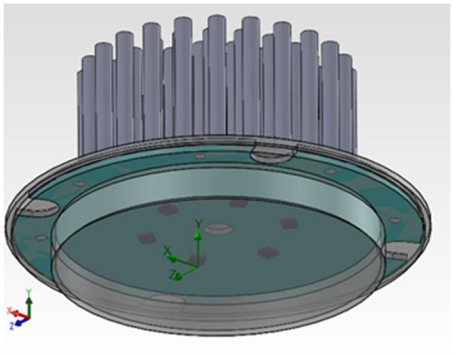
Yapılan çalışma için Enerji Verimliliği ve Aydınlatma Tekniği laboratuvarında bulunan iki adet LED armatür seçilmiştir (Şekil 4.3). Armatürlerden biri IP20 koruma sınıfına sahip, 90 mm çapında, 6 adet CREE XP-E LED çipine sahip bir downlight'tır. LED'lerin renk sıcaklığı laboratuvarda bulunan 2 metre çaplı Labsphere marka küre ve Ocean marka spektroradyometre kullanılarak 4200 K olarak ölçülmüştür [8]. Downlight armatürün ön kapağı PMMA (polymethyl methacrylate) malzemesinden üretilmiştir. Diğer armatür ise IP 65 koruma sınıfına sahip 340x340 mm ölçülerinde, içinde 48 adet CREE XT-E LED çip bulunan kanopi türü bir armatürdür. Renk sıcaklığı küre ve spektrometre yardımı ile 5500 K olarak ölçülmüştür. Ön tarafında şeffaf cam bulunmaktadır. Her iki armatürde de metal baskı devre kartı kullanılmıştır.



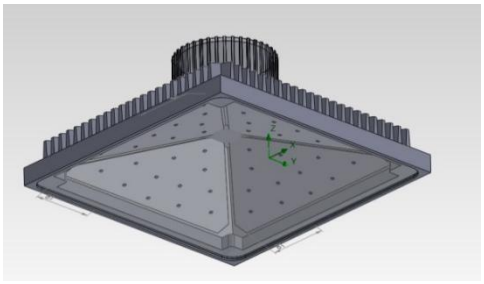
Şekil 4.3 : Modelleme için kullanılan armatürler.

Şekil 4.3'te gösterilen armatürler, FloEFD programı kullanılarak 3 boyutlu olarak modellenmiştir. LED çiplerinin ısıl direnç değerleri için katalog verileri kullanılmıştır. Modelleme aşamasında kullanılan parametreler ve armatürlerin 3 boyutlu modelleri Çizelge 4.1 ve 4.2'de gösterilmiştir. LED'lerin üzerindeki ısıl güçler, elektriksel güçler yardımıyla hesaplanmıştır.

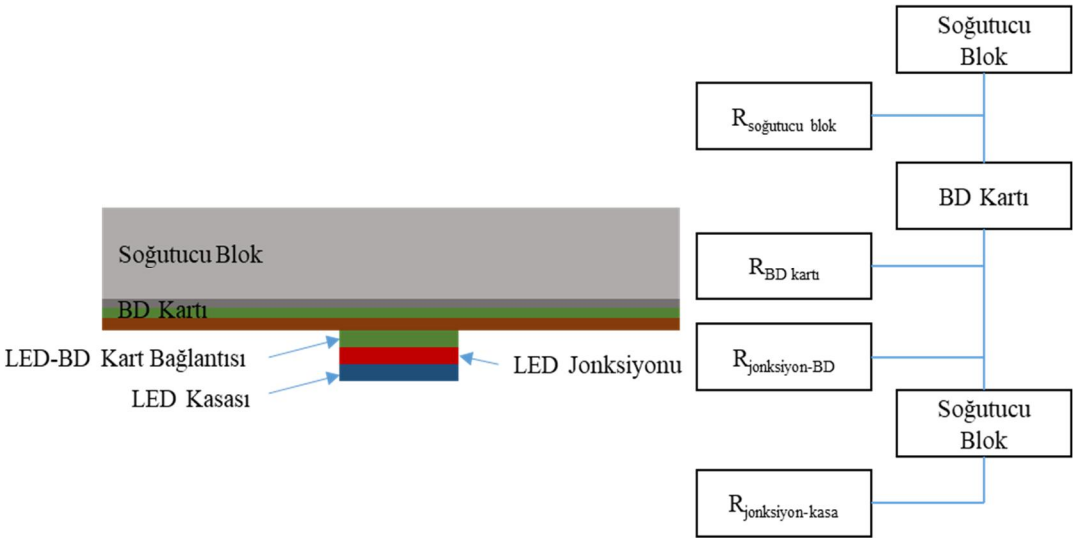
Çizelge 4.1 : Downlight 3 boyutlu modelinin özellikleri.

3B Model	LED Sayısı	LED Başına Isıl Güç [W]
	6	1,6

Çizelge 4.2 : Kanopi 3 boyutlu modelin özellikleri.

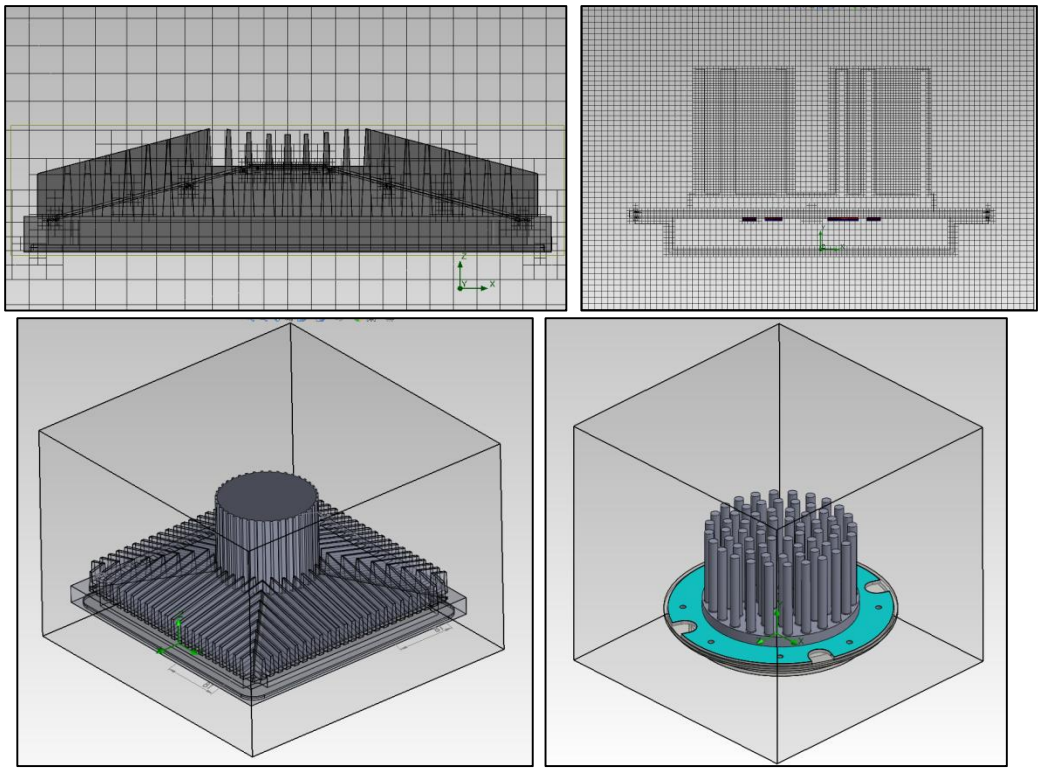
3B Model	LED Sayısı	LED Başına Isıl Güç [W]
	48	1,52

LED'ler için oluşturulan 2D modeli Şekil 4.4'te gösterilmiştir.



Şekil 4.4 : 2D LED kompakt ısıl modeli.

Doğal taşınım etkilerini görebilmek amacıyla yerçekimi etkileri de göz önüne alınmıştır. Sıcaklık gradyenlerini daha iyi inceleyebilmek için sık bir ağ yapısı kullanılmıştır. Çözücü için kullanılan ağ yapısı ve hesaplama domenleri Şekil 4.5'te verilmiştir.



Şekil 4.5 : Çözücü ağ yapısı ve hesaplama domenleri.

Simülasyon için kullanılan diğer ortak parametreler Çizelge 4.3'te verilmiştir.

Çizelge 4.3 : Armatür ortak parametreleri.

Malzeme	Kalınlık (mm)	Isıl İletkenlik (W/mK)
Dielektrik ve Bakır	0,03	1
Alüminyum PCB	1,2	155
Cam	1	1,05
Soğutucu Blok	Çeşitli	150

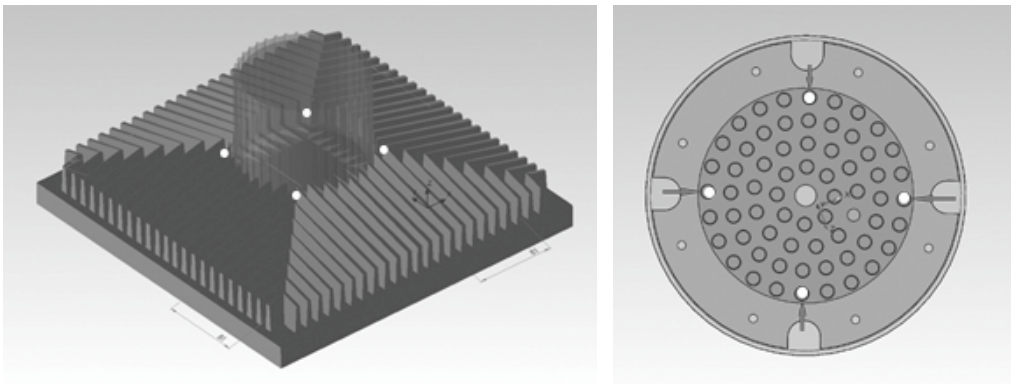
4.3 Laboratuvar Ölçümleri

Gerçek değerleri ve simülasyon sonuçlarını karşılaştırmak için, iki armatürün de soğutucu bloklarından ısıl çiftler yardımı ile sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Laboratuvar sıcaklığı 25 °C'de sabit tutulmuş, armatürler etrafında bir hava akımı olmamasına dikkat edilmiştir (Şekil 4.6).



Şekil 4.6 : Armatür sıcaklık ölçümleri.

Armatürler saf sinüs kaynağı kullanılarak 220V ile beslenmiştir. Armatürler kendi içlerinde yer alan sürücüler yardımı ile çalıştırılmıştır. Güç analizörü ile yapılan ölçümlerde downlight armatürün 14,7W, kanopi armatürün 92,6W güç çektiği belirlenmiştir. Armatürler, oryantasyonun etki etmemesi için tasarlanan yanma pozisyonlarında çalıştırılmıştır. Armatürlerin güç ve sıcaklık değerleri sabitlenene, yani ısıl dengeye ulaşana kadar ölçümler devam etmiştir. Armatürler üzerindeki ölçüm noktaları Şekil 4.7'de gösterilmiştir.



Şekil 4.7 : Armatür sıcaklık ölçüm noktaları.

Model ve armatürler üzerinde seçilen noktaların sıcaklık değerleri karşılaştırılmıştır. Ölçüm ve simülasyon sonuçlarının karşılaştırılması Çizelge 4.4 ve 4.5'te verilmiştir.

Çizelge 4.4 : Downlight armatür için simülasyon/ölçüm sonuçları karşılaştırması.

Ölçüm Noktası	1	2	3	4
Ölçülmüş Sıcaklık	52,5	54,5	52,9	55,1
Simülasyon Sonucu (°C)	55,4	55,4	55,4	55,4
Sıcaklık Farkı (°C)	2.9	0.9	2.5	0.3
% Sapma	%5,2	%1,6	%4,5	%0,5

Çizelge 4.5 : Kanopi armatür için simülasyon/ölçüm sonuçları karşılaştırması.

Ölçüm Noktası	1	2	3	4
Ölçülmüş Sıcaklık	46,5	46,0	47,4	46,4
Simülasyon Sonucu (°C)	50,1	49,3	50,5	50,1
Sıcaklık Farkı (°C)	3,6	3,3	3,1	3,7
% Sapma	%7,2	%6,7	%6,1	%7,3

Simülasyon yardımı ile hesaplanan jonksiyon sıcaklıklarının minimum, maksimum ve ortalama değerleri Çizelge 4.6'da verilmiştir.

Çizelge 4.6 : Simülasyon yardımı ile hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları.

Armatür	Maksimum (°C)	Minimum (°C)	Ortalama (°C)
Downlight	68,6	68,6	68,6
Kanopi	81,4	64,3	73,2

Daha ileri bir analiz için simülasyondan elde edilen jonksiyon sıcaklıkları ile katalog değerleri kullanılarak toplam ışık akısı tahmini yapılmıştır. CREE marka LED'ler için firma tarafından sunulan Web tabanlı "Ürün Karakterizasyon Aracı" kullanılmıştır [15]. Karşılaştırma için mevcut armatürler küre içinde ölçülerek gerçek ışık akıları belirlenmiştir. Hesaplanan ve ölçülen ışık akılarının farkı Çizelge 4.7'de verilmiştir.

Çizelge 4.7 : Armatürlerin hesaplanan ve ölçülen ışık akıları.

Armatür	Hesaplanan [lm]	Ölçülen [lm]	Fark [%]
Downlight	679,8	693,4	%-2,0
Kanopi	7161	7464	%-4,2

4.4 Sonuçlar

Simülasyonları ve ölçümleri yapılan iki armatür karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.4 ve 4.5'deki değerlerden görüldüğü gibi downlight armatürde ölçüm-simülasyon farkı ortalama %3,25, kanopi armatürde ise %6,75 olarak hesaplanmıştır. Daha sonra simülasyon yardımı ile bulunan jonksiyon sıcaklıkları kullanılarak katalogdan ışık akıları hesaplanmış, kürede ölçülen ışık akıları ile karşılaştırılmıştır. Çizelge 4.7'de görüldüğü gibi, downlight için bu fark %2 mertebesinde iken, kanopi için %4,1'dir. Bu fark genel olarak simülasyonlarda oluşan hatalardan ve LED çiplerinin içindeki ışık akısı değişimlerinden meydana gelebilmektedir. Bu sonuçlara dayanılarak

çalışmada kullanılan iki armatür için de 2 direnç modelinin oldukça iyi sonuç verdiği söylenebilmektedir.

LED jonksiyon sıcaklıklarının ölçülmesi ve tahmini için kullanılan yöntemlerin karışık olması ve pahalı ekipmanlar gerektirmesi, belirlenmelerini zorlaştırmaktadır. 2 Direnç modeli kullanılarak yapılan bu çalışma, LED'lerin sıcaklık ve performans tayinleri için modelin uygunluğunu göstermektedir. Model ve gerçek ölçümler arasındaki kabul edilebilir toleranslardaki farklar malzeme özelliklerinin iyi tanımlanamamasından, bilgisayarın sayısal hatasından ve 2 Direnç modelinin basitleştirilmiş yapısından kaynaklanabilmektedir. Bilgisayar simülasyonları, prototip aşamasından önce tasarımın iyileştirilmesi için en iyi kaynaklardan biridir. Bu sayede farklı armatür konfigürasyonları için tasarımlar çalıştırılıp en optimum çözümlere ulaşmak mümkün olabilmektedir.

5. LED ARMATÜR ISIL TASARIMINA ETKİ EDEN FAKTÖRLER ve İSTATİSTİKSEL ANALİZİ

LED'lerde üretilen ısı miktarı temelde sürme akımına ve LED verimine bağlıdır. LED çip üzerinden geçen sürme akımı arttıkça çektiği elektriksel güç ve ışık akısı artmaktadır. Diğer yandan elektriksel güç arttıkça, açığa çıkan ısı da yükselmektedir. Bu yüzden yüksek akımlarda sürülen LED'ler için daha geniş soğutucu yüzeylere ihtiyaç duyulmaktadır. LED verimi, LED'in yaydığı optik gücün, çektiği elektriksel güce oranı olarak tanımlanabilir. Sonuç olarak verim de, sıcaklığa ve sürme akımına bağlıdır. Sıcaklık arttıkça LED verimi düşmektedir [1]. LED'lerin ısıl modellenmesinde, LED paketinin yaydığı ısı miktarının doğru belirlenmesi önemlidir. Bu nedenle ısıl tasarımdan önce kullanılacak LED paket yada modüllerinin optik, ısıl ve elektriksel ölçümleri yapılmış, farklı akım ve sıcaklık kademeleri için ısıl güçleri hesaplanmış olmalıdır.

LED'ler ürettikleri ısının büyük bir kısmını iletim yoluyla lehimlendikleri baskı devre (BD) kartlara ve BD kartı aracılığıyla da armatür gövdesine veya soğutucu bloğa, daha sonra da çevre ortam havasına iletirler. Özellikle yüksek güçlü LED armatürlerde, LED'lerde üretilen ısıyı çevre ortam havasına aktarmak için metal soğutucu elemanlar kullanılır. Kullanılan soğutucu elemanlar, genelde elektronik elemanların soğutulmasında kullanılan ve yüzey alanını arttırmak için tasarlanan soğutucu bloklardır. Bu soğutucu bloklar, LED'in jonksiyonunda üretilen ısıyı ortam havasına aktarmak için ısıl bir yol görevi görürler. Genelde ısıl iletkenliği yüksek malzemelerden seçilirler. Soğutucu blok yüzeyi arttırılırken ekonomik ve mekanik olarak uygulanabilir çözümler aranmalıdır. Yüksek güçlü armatürlerde artan soğutucu gereksinimi ile armatür ağırlıklarını uygun seviyelerde tutmak ve soğutucu maliyetlerini düşürmek için optimum çözümler oluşturulmalıdır.

Armatür ısıl tasarımında önemli bir diğer nokta da ısıl arabirim malzemelerinin kullanımıdır. Isıl arabirim malzemeleri genel olarak farklı parçaların mekanik birleşimlerinde meydana gelebilecek ısı iletimi sorunlarını çözmek için kullanılırlar. Örneğin BD kartı arkasına montajı yapılacak bir soğutucu blok ile BD kartı arasında

hava boşluğu kalmaması için bu boşlukları kapatabilecek ısıl bant, macun, jel, ped gibi ısıl arabirim malzemeleri kullanılmaktadır. Aynı şekilde mekanik olarak birleşim sağlayan LED ve BD kartı arasındaki lehim malzemesi de ısıl arabirim olarak adlandırılır. Yüksek performanslı soğutma çözümleri için ısıl arabirim malzemelerinin de yüksek performans verecek malzemeler arasından seçilmesi gereklidir. Isıl arabirim malzemelerinin ısı geçiş dirençleri ne kadar düşükse LED'lerde üretilen ısıyı o kadar iyi iletirler. Armatür ısıl tasarımı yapılırken ısıl arabirim malzemelerinin mekanik ve ısıl özellikleri iyi değerlendirilmelidir.

Bu bölümde örnek olarak seçilmiş bir yol aydınlatma armatüründe LED jonksiyon sıcaklığına etki edebilecek BD kartı malzemesi, ısıl arabirim malzemeleri, armatür gövde malzemesi, LED çip ısıl gücü ve ortam sıcaklığı gibi parametrelerin istatistiksel faktör analizi gerçekleştirilmiş ve ANOVA (Analysis of Variance) çizelgesi oluşturulmuştur. Literatürde LED armatürler için daha önce gerçekleştirilmiş bir etki analizi çalışmasına rastlanmadığı için, tam faktöriyel tasarım yöntemi seçilmiş ve tasarım sonuçları yorumlanmıştır. Öncelikle belirlenen faktörler ve faktör seviyeleri için simülasyonlar gerçekleştirilmiş ve ön inceleme yapılmıştır. İlk etapta toplamda 2^5 = 32 simülasyon yapılarak temel, ikili, üçlü, dörtlü ve beşli etkilerin görülmesi hedeflenmiştir. 32 simülasyona ek olarak modeldeki eğriliğin incelenebilmesi amacıyla bir adet merkez noktası eklenmiş ve toplamda 33 simülasyon gerçekleştirilmiştir. Daha sonra elde edilen simülasyon sonuçlarının artmasıyla daha geniş faktör seviyeleri için çok değişkenli regresyon modeli oluşturulmuş, örnek armatür üzerinden ısıl tasarıma etki eden faktörlerin belirlenmesi ve irdelenmesi gerçekleştirilmiştir.

5.1 Deney Tasarım İlkeleri

Deney tasarımı mühendislik, tıp, psikoloji, tarım vb. alanlarda sıkça kullanılan istatistiksel bir analiz aracıdır. Bir veya birden çok bağımsız değişken bilinçli ve planlı bir şekilde değiştirilirken, bir veya birden çok bağımlı değişken analiz edilerek, bağımsız değişkenlerin etkilerini ve birbirleri ile etkileşimlerini incelemek için kullanılmaktadır. Kaynağın (süre, maliyet, iş gücü, vb.) kısıtlı olduğu süreçlerde, az deney sayısı ile mümkün olan en fazla bilgiyi elde etmek amaçlı istatistiksel analiz yöntemlerini içerir. İyi tasarlanmış deneyler, eldeki kaynaklar verimli bir şekilde kullanılabildiği için, rastgele yapılan deneylere göre zaman, kaynak ve maliyet

tasarrufu sağlar. Ayrıca bir defada tek faktör değiştirilen deneylerde gözlemlenmesi çok zor olan değişkenler arasındaki etkileşimlerin incelenmesine de olanak tanır. Değişkenler arasındaki etkileşim, "girdi değişkeninin sonuç değişkenine olan etkisinin başka bir girdi değişkeninin seviyesine bağlı olması" olarak tanımlanabilir. Bir seferde tek faktörü değiştirilen deneyler ile deney tasarımı yöntemiyle planlanan deneyler arasındaki belirgin farklar aşağıdaki gibi tanımlanabilir [80]:

- İstatistiksel deney tasarımı daha az kaynak kullanımına olanak sağlar. Özellikle kısıtlı kaynaklar göz önüne alındığında deneyler çok maliyetli ve zaman alıcı olabilmektedir.
- Her bir girdi değişkeni için etki tahmini daha kesin bir şekilde yapılabilir.
- Değişkenler arasındaki etkileşimler sistematik olarak tahmin edilebilir.
- Deney sonuçları değişken uzayının daha geniş bir bölgesinde incelenebilir.

Deney tasarımı yapılırken tasarımın amacı belirlenmelidir. Tasarımın amacının belirlenmesi, problemin tanımlanması ile başlar. Bu aşamada yapılacak deney ile cevap aranan sorular belirlenir, hedefler ortaya konulur. Sonuç değişkenine etki edebilecek değişkenler ve uygun deney tasarım deseni belirlenir. Deney kaynakları (malzeme, iş gücü, zaman, maliyet vb.) tasarlanan deneyi destekleyebilecek düzeyde olmalıdır. Deney hatasını azaltmak için kontrol edilemeyen değişkenlerin etkileri minimize edilmelidir. Tekrarlama, bloklama ve tesadüfilik ilkeleri kullanılarak sistematik hatalar önlenebilir. Tasarlanan deneyin sonuçlarına ulaşıldıktan sonra, elde edilen veriler istatistiksel yöntemler kullanılarak irdelenebilir. Hedeflenen sonuçlar için elde edilen değişken seviyeleri tekrar edilerek deneyler tekrarlanmalı ve istikrarlı/kararlı sonuçların elde edilebildiği gözlemlenebilmelidir.

5.1.1 Farklılık analizi (ANOVA – analysis of variance)

Farklılık analizi (Analysis of Variance – ANOVA), iki veya daha fazla veri grubunun ortalamaları arasında fark olup olmadığını test etmeye yarayan bir yöntemdir. ANOVA'nın temelini, "bağımlı değişkendeki değişimin ayrıştırılması, veri grubu ortalamalarındaki farkların sebebinin girdi değişkenlerin seviyelerindeki değişimden mi, yoksa gruplar içindeki mevcut farklılıktan mı kaynaklandığına istatistiksel olarak karar verilmesi" oluşturmaktadır. Özetle ANOVA, toplam farkın bileşenlerine

ayrılması yardımıyla gerçekleştirilir. Bu bölümde, kullanılan matematiksel modelin açıklanabilmesi amacıyla "sabit etkili, tek faktörlü ANOVA" örneği ele alınmıştır.

En genel olarak tek faktörlü, birden fazla seviyeye sahip bir deney için örnek sonuçlar matrisi Çizelge 5.1'de gösterilmiştir [81].

Çizelge 5.1 : Tek faktörlü ANOVA için örnek sonuçlar matrisi.

(Seviye)	Gözlemler			Toplam	Ortalama
1	y_{11}	y_{12}	y_{1b}	$y_{1.}$	$\overline{y_{1.}}$
2	y_{21}	y_{22}	y_{2b}	$y_{2.}$	$\overline{y_{2.}}$
a	y_{a1}	y_{a2}	y_{ab}	$y_{a.}$	$\overline{y_{a.}}$

Burada $y_{1.}$ faktörün birinci seviyesindeki gözlemlerin toplamını, $\overline{y_{1.}}$ ise faktörün birinci seviyesindeki gözlemlerin ortalamasını simgelemektedir. Çizelge 5.1'de verilen tek faktörlü örnek sonuçlar matrisi için etki modeli denklem 5.1'deki gibi tanımlanabilir.

$$y_{ij} = \mu + \tau_i + \varepsilon_{ij} \begin{cases} i = 1,2,\dots,a \\ j = 1,2,\dots,b \end{cases} \tag{5.1}$$

y_{ij}, i seviyesindeki j. gözlemi, μ bütün sonuçların ortalamasını, τ_i ise i seviyesinin etkisini göstermektedir. a ve b sayıları sırasıyla seviyeleri ve herbir seviye için gözlem sayısını göstermektedir. Modelde bulunan ε_{ij} "rastgele hata terimi" deneyde bulunan diğer fark kaynaklarının etkisini simgelemektedir. Diğer hata kaynaklarına örnek olarak ölçüm hatası, kontrol edilemeyen değişkenlerin etkisi, ölçülen malzemelerdeki farklılıklar, zaman içinde değişebilen değişkenlerin etkisi ve ortam özellikleri gibi çevre şartları sayılabilir.

Toplam farkın bileşenlerine ayrıştırılması tek faktörlü bir deney analizi için kareler toplamları (SS – Sum of Squares) üzerinden yapılır ve temel olarak denklem 5.2 ile formülize edilebilir.

$$SS_{Toplam} = SS_{seviye} + SS_{Hata} \tag{5.2}$$

Burada SS_{Toplam} bütün sonuçların kareler toplamını, SS_{seviye} seviyelere bağlı kareler toplamını, SS_{Hata} ise hata teriminden gelecek kareler toplamını simgeler. Kareler toplamları hesaplandıktan sonra ANOVA tablosu oluşturularak hipotez testi yürütülür. Sıfır hipotezi, göz önüne alınan faktörün (burada tek faktör) farklı seviyeleri için (a adet seviye) gözlemlerin ortalamalarının değişmediği üzerine kurulur (H_0: $\mu_1 = \mu_2 =$

…..= μ_a). Daha sonra F-Testi yapılarak gözlem grupları arasındaki farkın grup içindeki farka oranı hesaplanır. İstatistiksel modelin açıklayabildiği ortalama değişkenliğin, açıklayamadığına oranı olarak tanımlanan F istatistiği, denklem 5.3 ile hesaplanabilir. F istatistiği, basit ve çoklu regresyon analizinin uygunluğunu ve deneylerde oluşturulan grup ortalamalarının birbirlerine göre olan farklarını belirlemek için kullanılır.

$$F = \frac{\frac{SS_{seviye}}{a-1}}{\frac{SS_{Hata}}{(N-a)}} \tag{5.3}$$

Formül 5.3'de "a" seviye sayısını, "N" ise toplam gözlem sayısını simgelemektedir. Grup içi ve gruplar arası fark hesabı için her bir kareler toplamı serbestlik derecelerine bölünür. Serbestlik derecesi herhangi bir istatistik parametre tahmininde kullanılan verilerin bağımsız olarak değişebilen miktarının sayısal ölçüsüdür [82]. Kareler toplamlarının serbestlik derecelerine bölünmesi ile ortalama kareler (MS – Mean Square) hesaplanır. Çizelge 5.1'deki gibi tek faktörlü bir analiz için oluşturulan örnek bir ANOVA tablosu Çizelge 5.2'de verilmiştir.

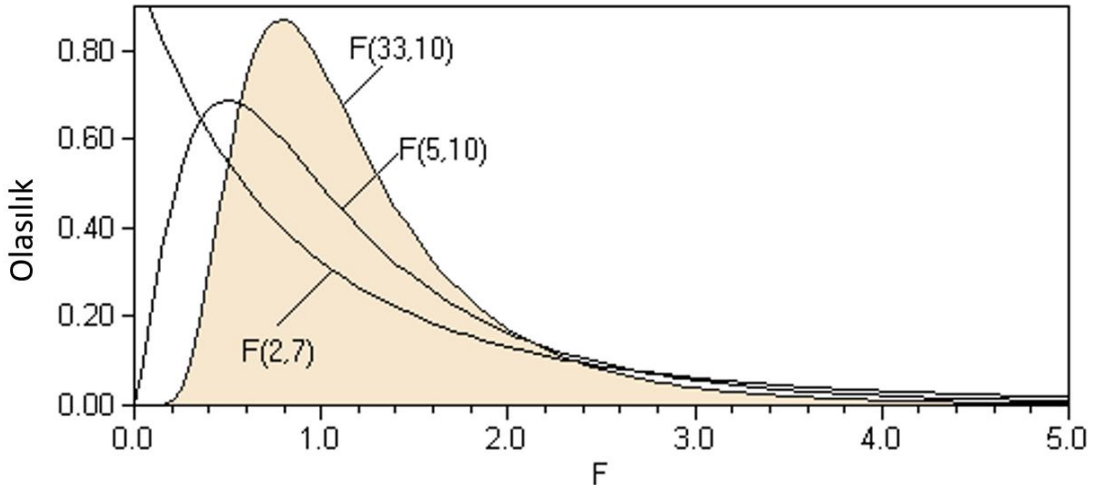
Çizelge 5.2 : Tek faktörlü ANOVA için örnek sonuçlar matrisi.

Fark Kaynağı	Kareler Toplamı	Serbestlik Derecesi	Ortalama	F
Gruplar Arası	$SS_{seviye} = n\sum_{i=1}^{a}(\overline{y_{i.}} - \overline{y_{..}})^2$	a-1	MS_{seviye}	$F = \frac{MS_{seviye}}{MS_{Hata}}$
Hata (Grup içi)	$SS_{Hata} = SS_{Toplam} - SS_{Faktör}$	N-a	MS_{Hata}	
Toplam	$SS_{Toplam} = \sum_{i=1}^{a}\sum_{j=1}^{n}(\overline{y_{ij}} - \overline{y_{..}})^2$	N-1		

ANOVA tablosu oluşturulduktan ve F değeri hesaplandıktan sonra, hipotez testi yürütülür. F istatistiği değerlendirilirken karar verilmesi gereken diğer bir nokta da "anlamlılık seviyesi"nin belirlenmesidir (α – level of significance). Anlamlılık seviyesi, sıfır hipotezi doğruyken reddedebilme olasılığını belirler (Tip 1 hata) [82]. Sıfır hipotezi, hipotez testinde öne sürülen ve test edilen hipotezdir. F-testi yürütülürken hesaplanan F-değeri, anlamlılık seviyesi (α), payın serbestlik derecesi (a-1) ve paydanın serbestlik derecesine (N-a) göre değerlendirilir ($F_{\alpha,a-1,N-a}$). Eğer hesaplanan F değeri, deneyin serbestlik dereceleri ve anlamlılık seviyesine göre

bulunan F değerinden büyükse sıfır hipotezi reddedilir. Eldeki kanıtların, istatistiksel olarak sıfır hipotezini desteklemediği söylenebilir. F dağılımları bağımlı ve bağımsız faktör sayısına ve anlamlılık seviyesine göre değişiklik gösterir.

Deney tasarımı perspektifinden düşünülünce, deney sistemine uyguladığımız faktör seviyesi değişikliğinin ortalamaları değiştirdiği, özetle bir etkisinin olduğu söylenebilir. Şekil 5.1'de farklı serbestlik derecelerine göre örnek F dağılımları verilmiştir. Yatay eksen F değerini, dikey eksen ise bu değerin görülme olasılık yoğunluğunu belirtir.



Şekil 5.1 : Farklı serbestlik derecelerine göre F dağılımları.

Hesaplanan F değeri'nin, Şekil 5.1'de verilen dağılımlara göre yeri ve kritik F değeri belirlenerek sıfır hipotezinin red edilip edilmeyeceğine karar verilir.

5.1.2 ANOVA kabulleri

ANOVA belirli kabüllere dayanır. ANOVA modelleri oluşturulurken bu varsayımların kontrol edilmesi önemlidir. Hata terimleri (ε_{ij}), grup içindeki tanımlanamayan değişkenliktir. Ortaya konan model ile, gerçek sonuçların farklarından hesaplanabilir. ANOVA için temel olarak aşağıdaki varsayımlar sağlanmalıdır [83]:

- Gruplar birbirinden bağımsız olmalı, birinin sonucu diğerini etkilememelidir.
- Grupların farklılıkları homojen olmalıdır.
- Hata terimlerinin dağılımı normal olmalıdır.
- Hata terimleri (ε_{ij}) ortalamaları 0, varyansları σ^2 olmak üzere homojen olarak dağılmalıdır.

Analiz yapılırken oluşturulan deneysel modelin uygunluğu, yukarıda listelenen kabuller ile desteklenerek onaylanmalıdır.

5.1.3 Faktör analizi

Çoğu deney, birden çok faktörü ve etkilerini incelemeyi gerektirmektedir. Faktöriyel tasarımlar, faktörlerin ve faktörlerin birbirilerine olan etkilerinin incelendiği istatistiksel deney tasarımı desenleridir. Sonuç değişkenine etki edebilecek potansiyel faktörlerin doğrusal kombinasyonları ve hata terimleri birleştirilerek istatistiksel model kurulur. Faktörlerin kendilerinin ve etkileşimlerinin etkileri yukarıda açıklanan farklılık analizi yöntemi (ANOVA) ile incelenebilir. Faktör analizi iki veya daha fazla faktörü aynı anda kontrol etme olanağı sağlamaktadır. Nitel değişkenlerin yanında, nicel değişkenlerin de modelde beraber kullanımına izin verilerek faktörlerin temel ve birbirlerine olan etkileri hesaplanabilir. Faktör analizi, deneyler sırasında müdahale edilemeyen değişkenleri (gürültü, vb.) kontrol edebilme ve deneye etkilerini inceleme olanağı da vermektedir.

Bir faktörün etkisi, seviyesinin değişmesi ile sonuç değişkeni üzerinde oluşturduğu değişimle tanımlanmaktadır. Modelde kullanılan temel faktörlerin seviyelerinin meydana getirdiği bu değişim, ana etki olarak adlandırılmaktadır. Bazı deneylerde, bir faktörün seviye değişimlerinin meydana getirdiği fark, diğer faktörlerin seviyelerine bağlı olabilir. Bir faktörün seviye değişim etkisinin, başka faktörün/faktörlerin seviyelerine bağlı olmasına faktörler arası etkileşim adı verilir.

Faktöriyel deney tasarımları, tam faktöriyel ve kısmi faktöriyel olarak ikiye ayrılabilir. Tam faktöriyel deney tasarımları bütün temel etkileri ve faktörlerin birbirleri ile olan tüm etkileşimlerini göz önüne almaktadır. Tam faktöriyel deney tasarımında iki seviyeli "k faktörlü" bir deney için gerçekleştirilmesi gereken deney sayısı 2^k'dır. Faktör sayısı arttıkça, deney sayısı üstel olarak artmaktadır. Çok faktörlü deneylerin sahip olduğu yüksek sayıdaki deney sayısını azaltabilmek için kısmi faktöriyel deney tasarımları kullanılabilir. Kısmi faktöriyel tasarımlar, tam faktöriyel tasarımların bir alt kümesi olarak değerlendirilebilir. Kısmi faktöriyel tasarımların en çok kullanıldığı alan, faktör sayısının fazla olduğu deneylerde, en etkili parametrelerin ve olası etkileşim olasılıklarının belirlenmeye çalışıldığı durumlardır.

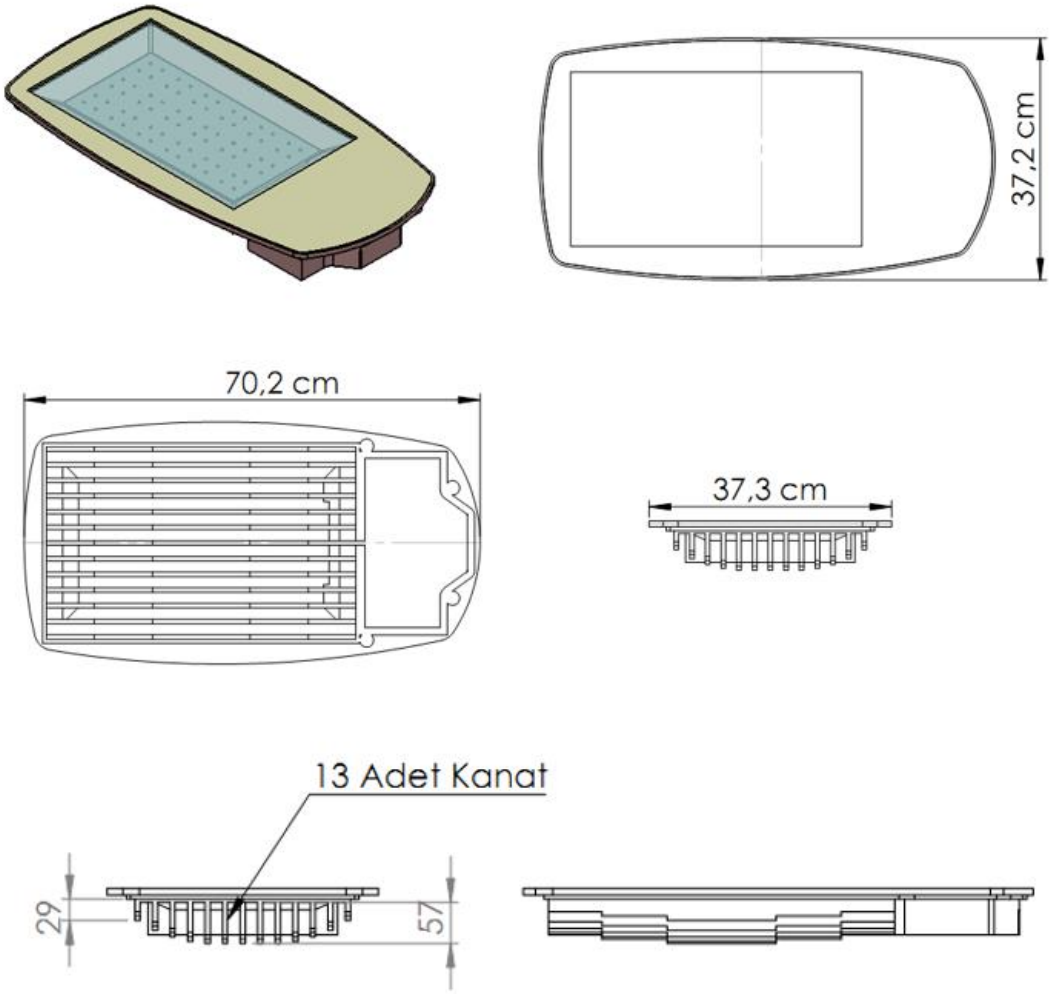
5.2 Isıl Simülasyon Faktöriyel Analizi

Literatür incelendiğinde, LED ışık kaynağı kullanan armatürlerin ısıl analizleri için herhangi bir istatistiksel deney tasarımı çalışmasına rastlanmamıştır. Bu nedenle tüm belirsizlikler dikkate alınarak, deney tasarımı yapılırken bütün temel etkilerin ve etkileşimlerin belirlenmesi amacıyla, tam faktöriyel deney tasarımının kullanılmasına ve oluşturulan modelin eğriliğinin kontrolü için de tasarıma merkez nokta eklenmesine karar verilmiştir.

LED armatür ısıl tasarımına etki eden faktörlerin belirlenmesi amaçlı ısıl analizler, örnek bir LED ışık kaynaklı yol aydınlatması armatürü üzerinde gerçekleştirilmiştir. Yol aydınlatmasında kullanılan armatürler dış ortam şartlarına dayanıklı olmalıdır. Armatürün ortam şartlarına dayanıklılığı koruma faktörü ile ifade edilir (IP - ingress protection) [84]. TEDAŞ (Türkiye Elektrik Dağıtım A.Ş.) LED'li Yol Aydınlatma Armatürleri Şartnamesine göre yol aydınlatması amaçlı kullanılacak LED armatürlerin IP 66 toz ve nem koruma sınıfına sahip olması gerekmektedir [85]. Nemin ve tozun girişini engellemek için genel olarak silikon conta sistemleri kullanılmaktadır. Koruma sınıfı yüksek aydınlatma armatürlerinde ısıl analizlerin daha kritik olduğu ortadadır.

Bu tezde gerçekleştirilecek simülasyon ve analizlerde örnek olarak kullanılacak armatür ve boyutları Şekil 5.2'de gösterilmektedir. Armatürün, gerçek uygulamalarda benzerleri sık kullanılan, gerekli teknik yeterliliklere sahip ama maliyet etkin olan bir örnek olması amaçlanmıştır. Çalışmada örnek olarak seçilen armatürün gövdesi üzerinde soğutma amaçlı yükseklikleri 29 mm ile 57 mm arasında değişen 13 adet kanat yer almaktadır.

Analiz amaçlı seçilen faktörler için, FloEFD programı kullanılarak Şekil 5.2'de teknik çizimi verilen armatür üzerinde ısıl simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Örnek seçilen LED ışık kaynaklı armatür, TEDAŞ LED'li Yol Aydınlatma Armatürleri Şartnamesi gereğince M3 aydınlatma sınıfı yollar için optik olarak optimize edilmiştir [85]. Tasarım sonuçlarına göre üretilen prototip ile laboratuvarda gerekli ölçümler yapılmıştır. Örnek armatür, M3 aydınlatma sınıfı gerekleri için 350 mA sürme akımında, 87 W güç çekmekte ve 9630 lümen ışık akısı vermektedir. Örnek LED ışık kaynaklı armatür prototipinin resimleri Şekil 5.3'te verilmiştir.



Şekil 5.2 : Isıl simülasyonlar için kullanılan örnek LED armatür teknik çizimleri.

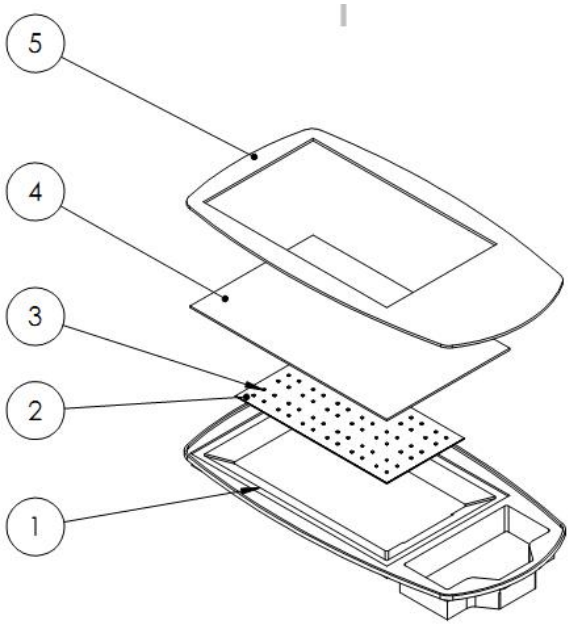


Şekil 5.3 : Analizlerde kullanılan LED ışık kaynaklı armatür prototipi.

5.2.1 Faktörlerin belirlenmesi

Daha önceki bölümlerde açıklandığı gibi, ısıl tasarımda etkili olan faktörlerin belirlenmesi amacıyla ilk olarak tam faktöriyel tasarım yönteminin kullanılmasına karar verilmiştir. FloEFD programı yardımıyla ısıl simülasyonlar gerçekleştirilmiş, faktörlerin etki analizleri yapılmış ve etkileşimleri incelenmiştir. Seçilen faktörler programda parametre olarak değiştirilebilen ve geçmiş tecrübelere dayanılarak etkisi olduğu düşünülen faktörlerdir. Sonuç değişkeni olarak "LED jonksiyon sıcaklığı" seçilmiştir. LED jonksiyon sıcaklığı, LED'lerin ışık akısı, verim, etkinlik faktörü, ömür ve renksel özelliklerini olumsuz yönde etkilediği için düşük olması istenen bir değerdir. Deney tasarımı ve ANOVA tabloları, jonksiyon sıcaklığı bağımlı değişken kabul edilerek hazırlanmıştır.

Kullanılan üç boyutlu modelin ayrıntıları ve eleman listesi Şekil 5.4'te verilmiştir.



NO	Parça	MİKT.
1	Gövde	1
2	PCB	1
3	LED	72
4	Cam	1
5	Üst Kapak	1

Şekil 5.4 : Örnek modelin eleman listesi.

Tasarlanan deneyde jonksiyon sıcaklığına etki edebilecek ve ısıl analiz programında değişken olarak tanımlanabilecek faktörler aşağıda açıklanmaktadır:

Ortam Sıcaklığı [T_{ort}]: LED çiplerinde üretilen ısının atılacağı ortamın sıcaklığının, jonksiyon sıcaklığı üzerindeki etkisinin araştırılması için ortam sıcaklığı istatistiksel modele bir faktör olarak eklenmiştir. LED çiplerinde üretilen ısı iletim yolu ile armatür gövdesine geçer ve daha sonra da ortam havasına aktarılır. Doğal taşınım prensibi ile ortam havasına aktarılan ısı miktarı, gövde sıcaklığı ile ortam havası sıcaklığı farkı arttıkça artmaktadır. Öncül tasarımda ortam sıcaklığı seviyeleri için 0 °C ve 25 °C değerleri seçilmiştir.

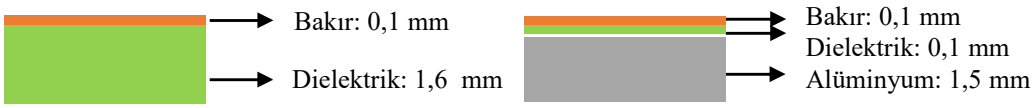
LED Çip Isıl Gücü [P_{led}]: LED çiplerinde çekilen elektriksel gücün bir kısmı optik güç olarak yayılırken, geriye kalan bölüm ısıl güç olarak üretilmektedir. LED'lerin verimli çalışabilmeleri için, çalışma koşullarında üretilen bu ısıl gücün LED'lerden sürekli bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir. İç bölümlerinde oluşan sıcaklık artışı LED'lerin ömürlerinin kısalmasına ve arıza yapmalarına sebep olmaktadır. LED ışık kaynağı kullanılan armatür tasarımında olası koşullarda LED'lerin yaydığı ısıl güç belirlenmeli ve tasarımlar bu güç değerlerine göre yapılmalıdır. LED çiplerin yaydığı ısının hesaplanabilmesi için, belirli sıcaklıklardaki optik ve elektriksel güçlerinin ölçümü gerekmektedir. Optik güç ile elektriksel güç arasındaki farktan, o sıcaklıktaki ısıl güç hesaplanabilmektedir. Armatür gövde geometrilerinin dış ortama iletebileceği ısı miktarları ancak belirli değerlerde kalabildiğinden, ısı armatür içinde kalarak birikmekte, bunun sonucunda da jonksiyon sıcaklığı yükselmektedir. Yapılan tasarımlarda LED çip ısıl güçleri 0,3 W ve 1,1 W olarak seçilmiştir.

Gövde Malzemesi [$K_{gövde}$]: Farklı gövde malzemeleri, LED çiplerde üretilen ısının yayılması ve dış ortam havasına taşınımında etkili olmaktadır. Aynı gövde geometrileri için farklı gövde malzemelerinin etkisinin incelenebilmesi amacıyla farklı ısı iletim katsayılarına sahip malzemeler seçilerek jonksiyon sıcaklığına olan etkileri incelenmiştir. Gövde malzemesi olarak alüminyum ve bakır seçilmiştir.

Baskılı Devre Kartı Tipi [K_{bd}]: Baskılı devre (BD) kartları LED çipleri'nin üzerine lehimlendiği, LED sürücüsünden gelen akımın LED'lere ulaşmasını sağlayan ve diğer elektronik elemanları üzerlerinde barındıran elemanlardır. Elektriksel olarak yalıtılmaları gerektiği için bir dielektrik katman içerirler. Diğer yandan, LED'ler boyutlarına göre yüksek ısıl güç üreten elemanlar olduğundan BD kartların aynı zamanda ısıl olarak da iletken olmaları gerekmektedir. Bu yüzden LED çiplerinin altında ısıyı BD kartına iletecek iletken bir tabaka kullanılmaktadır. LED'lerin bağlı bulundukları baskı devre kartlarının arkalarına genel olarak soğutucu bloklar

yerleştirilmektedir. Bu nedenle baskı devre kartlarının ısıl dirençlerinin düşük olması, yani LED'lerden iletilen ısıyı soğutucu bloklara iyi bir şekilde iletmeleri istenmektedir. LED'ler genel aydınlatma amaçlı kullanılmaya başlandıktan sonra, daha önce piyasada yaygın olarak bulunan büyük kısmı FR4 dielektrik malzemeden oluşan baskılı devre kartları yerlerini metal çekirdekli BD kartlara bırakmaktadır. Mevcut FR4 bazlı standart baskılı devre kartlarının ısıl direnç değerleri yüksek olduğu için, alüminyum eklenmiş metal çekirdekli BD kartı tasarımları LED'li çözümlerde daha verimli olmaktadır. Hala devam eden araştırma çalışmaları ile de dielektrik malzemelerin ısıl dirençlerinin düşürülmesine çalışılmaktadır. Standart ve metal çekirdekli BD kartı etkilerinin analizi için iki farklı çözümle simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Kullanılan iki çeşit BD kartı için katman detayları Şekil 5.5'te verilmiştir.



Şekil 5.5 : Standart ve metal çekirdekli BD kartı katman detayları.

Isıl Arabirim Malzemesi [$R_{ıam}$]: Isıl arabirim malzemelerinin temel amacı, birbirine değen katı yüzeylerdeki boşlukları doldurmak ve hava boşluklarının oluşturacağı yüksek dirençleri engellemektir. Isıl arabirim malzemeleri bazı tasarımlarda BD kartı ile ona bağlanacak olan soğutucu blok arasında yapıştırıcı görevi de görebilirler. Genelde ısıl macunlar ve jeller, ısıl bantlar, ısıl pedler gibi çeşitleri mevcuttur. Üzerine düşecek basınca ve kullanım alanına uygun olarak seçilip uygulanırlar. Analizlerde ısıl arabirim malzemesi olarak farklı ısıl dirence sahip malzemeler oluşturulmuş ve BD kartı ile gövde arasına uygulanmıştır. Isıl arabirim malzemeleri için 0,0001 ve 0,001 m^2K/W seviyeleri kullanılmıştır.

Seçilen tüm faktörler, seviyeleri ve modeldeki eğriliğin incelenebilmesi amacıyla eklenen merkez noktası değerleri Çizelge 5.3'te verilmektedir.

Isıl simülasyonlar için seçilen parametreler ile oluşturulan deney tasarımı bir sonraki bölümde açıklanmıştır.

Çizelge 5.3 : Deney tasarımı için seçilen faktörler ve seviyeleri.

Faktör	Seviye 1	Seviye 2	Merkez Nokta
Ortam Sıcaklığı [°C]	0	25	12,5
LED Çip Isıl Gücü [W]	0,3	1,1	0,7
Gövde Malzemesi [W/mK]	140 (Alüminyum)	400 (Bakır)	270
Baskılı Devre Kartı Tipi [W/mK]	0,32 (Standart)	5 (Metal Çekirdekli)	2,66
Isıl Arabirim Malzemesi [m^2K/W]	0,0001	0,001	0,0005

5.2.2 Deney tasarımı

Jonksiyon sıcaklığı üzerine etkisi olabileceği düşünülen ve bir önceki bölümde açıklanan beş faktör (k) seçilerek 2^5=32 deneyli, tam faktöriyel deney tasarım deseni oluşturulmuştur. Oluşturulan modelin doğrusallığının kontrolü ve daha yüksek derece parametrelerinin varlığını denetlemek için deneye bir adet merkez nokta eklenmiştir. Eklenen nokta ile toplam deney sayısı 33'e çıkmıştır. Deney matrisi ve simülasyon sonuçları Çizelge 5.4'te verilmektedir. Deney tasarımı Minitab istatistiksel yazılım paketi kullanılarak oluşturulmuş ve analiz edilmiştir [86]. Deneyler simülasyon üzerinden yürütüldüğü için bloklama ve deney sıralamasında rastgelelik gibi gürültüyü kontrol altına alacak yöntemler kullanılmamıştır.

Bir sonraki bölümde sonuçlar incelenerek ANOVA tablosu oluşturulacak, istatistiksel model kurulacaktır.

Çizelge 5.4 : Simülasyonlar için oluşturulan deney tasarımı ve simülasyon sonuçları.

No	T_{ort} [°C]	P_{led} [W]	$K_{gövde}$ [W/mK]	K_{bd} [W/mK]	$R_{ıam}$ [m^2K/W]	Maksimum Jonksiyon Sıcaklığı [°C]
1	0	0,3	140	0,32	0,0001	16,43
2	25	0,3	140	0,32	0,0001	42,06
3	0	1,1	140	0,32	0,0001	48,04
4	25	1,1	140	0,32	0,0001	74,33
5	0	0,3	400	0,32	0,0001	15,36
6	25	0,3	400	0,32	0,0001	40,93
7	0	1,1	400	0,32	0,0001	44,78
8	25	1,1	400	0,32	0,0001	70,92
9	0	0,3	140	5,00	0,0001	14,19
10	25	0,3	140	5,00	0,0001	39,82
11	0	1,1	140	5,00	0,0001	39,46
12	25	1,1	140	5,00	0,0001	66,40
13	0	0,3	400	5,00	0,0001	13,39

Çizelge 5.4 (devam): Simülasyonlar için oluşturulan deney tasarımı ve simülasyon sonuçları.

No	T_{ort} [°C]	P_{led} [W]	$K_{gövde}$ [W/mK]	K_{bd} [W/mK]	$R_{ıam}$ [m^2K/W]	Maksimum Jonksiyon Sıcaklığı [°C]
14	25	0,3	400	5,00	0,0001	38,81
15	0	1,1	400	5,00	0,0001	36,55
16	25	1,1	400	5,00	0,0001	62,72
17	0	0,3	140	0,32	0,0010	16,84
18	25	0,3	140	0,32	0,0010	42,69
19	0	1,1	140	0,32	0,0010	49,83
20	25	1,1	140	0,32	0,0010	76,04
21	0	0,3	400	0,32	0,0010	15,92
22	25	0,3	400	0,32	0,0010	41,46
23	0	1,1	400	0,32	0,0010	47,05
24	25	1,1	400	0,32	0,0010	73,41
25	0	0,3	140	5,00	0,0010	14,74
26	25	0,3	140	5,00	0,0010	40,19
27	0	1,1	140	5,00	0,0010	42,00
28	25	1,1	140	5,00	0,0010	69,05
29	0	0,3	400	5,00	0,0010	13,84
30	25	0,3	400	5,00	0,0010	39,44
31	0	1,1	400	5,00	0,0010	38,39
32	25	1,1	400	5,00	0,0010	66,59
33	12,5	0,7	270	2,66	0,00055	41,00

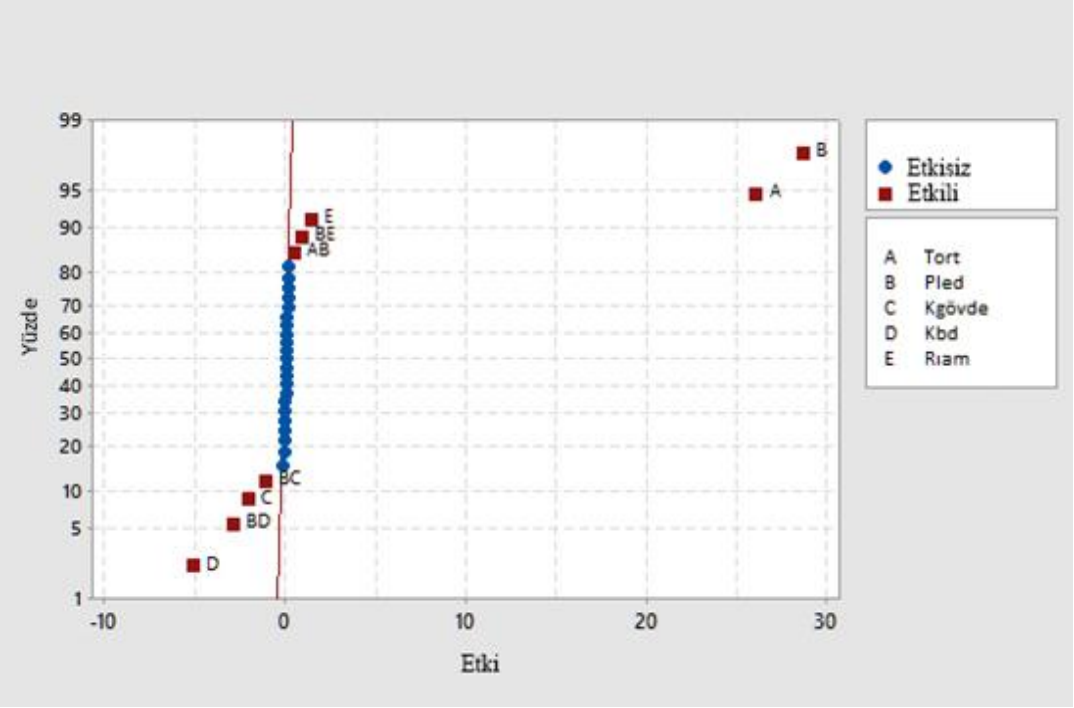
5.2.3 Deney tasarım analizi

Minitab yazılımı kullanılarak faktöriyel bir deney tasarımı oluşturulmuş ve tasarıma uygun olarak simülasyonlar gerçekleştirilerek model analizine başlanmıştır. Öncelikle temel parametrelerin ve etkileşimlerin derecelerinin belirlenmesi için tüm model terimleri ile analiz yapılmış, daha sonra model sadeleştirilmiştir. Model analizi gerçekleştirilirken yürütülecek hipotez testleri için anlamlılık seviyesi (α) 0,05 seçilmiştir. Tip 1 hata yapma olasılığını belirleyen α değerinin, genel mühendislik problemleri için 0,05 seçilmesi önerilmektedir [82]. Model analizi yapılırken aşağıdaki adımlar takip edilmiştir.

1. Tüm deney sonuçları ile temel analiz gerçekleştirilmiştir.

2. Minitab yazılımı ile oluşturulan normal ve yarı-normal olasılık dağılımları incelenerek temel faktörlerin 5. seviyeden başlayarak etkileşimlerinin etkileri belirlenmiş, istatistiksel olarak etkili olmayanlar sırayla model dışında bırakılarak hata terimi içinde değerlendirilmiştir (havuzlanmıştır). Bu yolla modelin geçerliliği denetlenmiştir.
3. Her bir seviyedeki etkili olan temel parametreler ve etkileşimleri için 2 numaralı adım tekrar edilmiştir.
4. Parametre analizleri tamamlandıktan sonra model kabulleri kontrol edilerek sonuçlar yorumlanmıştır.

Tüm parametreler dahil edilerek yürütülen analizlerden elde edilen normal olasılık dağılımı diyagramı Şekil 5.6'da verilmiştir .



Şekil 5.6 : Tüm faktörler göz önüne alınarak yapılan analizin normal olasılık diyagramı.

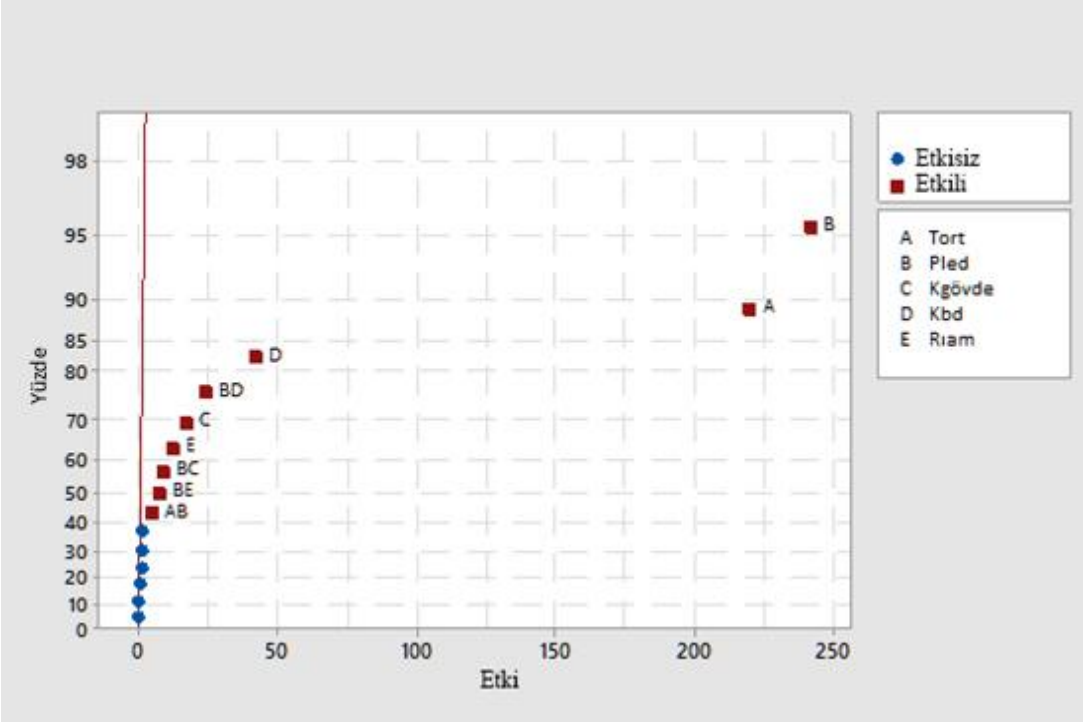
Şekil 5.5'ten görüldüğü gibi ilk analizde etkin parametre listesi -A: Ortam sıcaklığı (T_{ort}), B: LED çip ısıl gücü (P_{led}), C: Gövde malzemesi ($K_{gövde}$), D: BD kartı türü (K_{bd}) ve E: Isıl arabirim malzemesi ($R_{ıam}$)- olmak üzere etki sırasına göre aşağıdaki gibidir:

Temel Etkiler: P_{led}, T_{ort}, K_{bd}, $K_{gövde}$, $R_{ıam}$

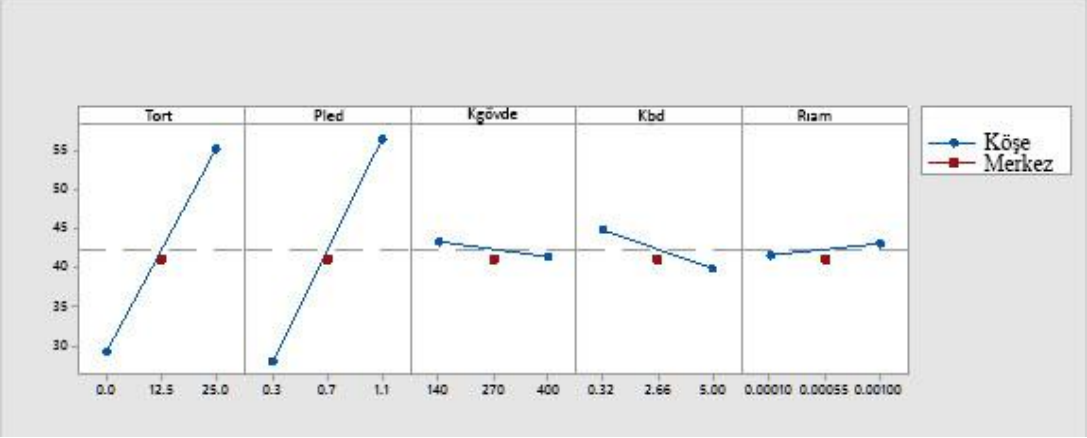
İkili Etkiler: P_{led} x K_{bd}, P_{led} x $R_{ıam}$, P_{led} x T_{ort}, P_{led} x $K_{gövde}$

Modeldeki etkin olmayan üçlü, dörtlü ve beşli etkileşim parametreleri havuzlanarak (hata teriminin içine atılarak) analiz tekrar edilmiştir. Havuzlama sonrasında oluşan yarı-normal olasılık dağılım diyagramı Şekil 5.7'deki gibi olmaktadır.

Şekil 5.7'den görüldüğü üzere etkili temel faktörler sırasıyla yine P_{led}, T_{ort}, K_{bd}, $K_{gövde}$ ve $R_{ıam}$ olarak ortaya çıkmaktadır İkili etkilerde ise en etkili faktör ikilisi P_{led} ve K_{bd} olarak gözükmektedir. Sadeleştirilmiş model ile ilk model benzer sonuçlar vermiştir. Kurulan model için temel etki grafikleri Şekil 5.8'de verilmiştir. Yatay eksen faktör seviyelerini, dikey eksen ise bağımlı değişken olan maksimum jonksiyon sıcaklığında olan ortalama değişimi °C cinsinden göstermektedir.

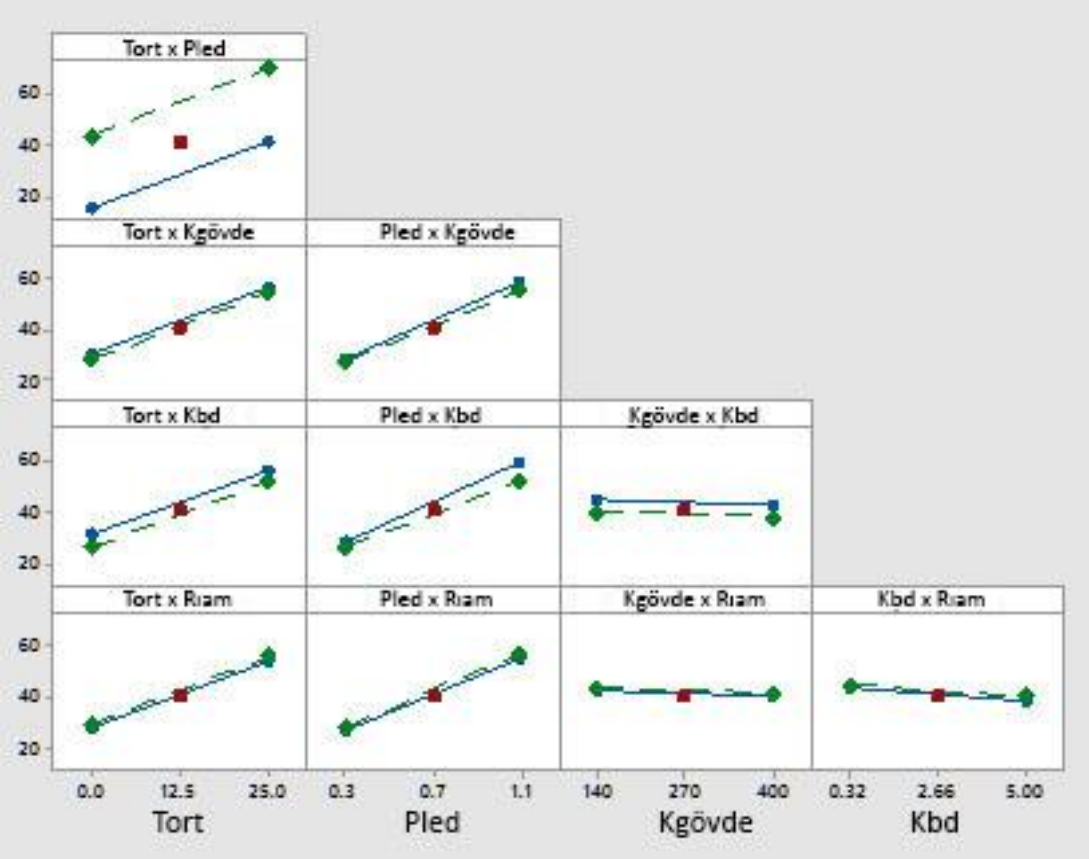


Şekil 5.7 : Sadeleştirilmiş modelin yarı normal olasılık diyagramı.



Şekil 5.8 : Temel parametrelerin etki grafikleri.

Şekil 5.9'da ise ikili etkileşim grafikleri verilmiştir. Yatay eksen farklı faktörlerin seviyelerini, dikey eksen ise maksimum jonksiyon sıcaklığı değişim ortalamasını göstermektedir.



Şekil 5.9 : Modelde kullanılan parametrelerin ikili etkileşim grafikleri.

Üçlü, dörtlü ve beşli etkiler havuzlandıktan sonra, sadece temel etkiler ve ikili etkileşimleri içeren ve Minitab tarafından hesaplanan ANOVA tablosu Çizelge 5.5'te verilmiştir. Hesaplar, Çizelge 5.2'de verilen formüller temel alınarak, beş faktör, bu faktörlerin 10 etkileşimi ve bir merkez noktası olmak üzere model kurularak, geri kalan serbestlik dereceleri modelin doğruluğunu arttırmak için hata terimi olarak kullanılarak Minitab tarafından gerçekleştirilmiştir. Hesaplanan F değerlerinin gerçekleşme olasılıklarını gösteren P değerleri ise, Minitab tarafından hesaplanarak çizelgeye dahil edilmiştir.

ANOVA tablosundan görüldüğü gibi etkin faktörlerin p değerleri, model için seçilen anlamlılık seviyesi olan 0,05'in altındadır. Bu analiz istatistiksel olarak, faktörlerin seviye farklarının, bağımlı değişken olan maksimum jonksiyon sıcaklığına etkisi olduğunu %5 hata ile belirtebileceğimizi göstermektedir. Etkin olmayan faktörlerin p değerleri ise seçilen anlamlılık seviyesinin üzerinde çıkmıştır ($p>0,05$).

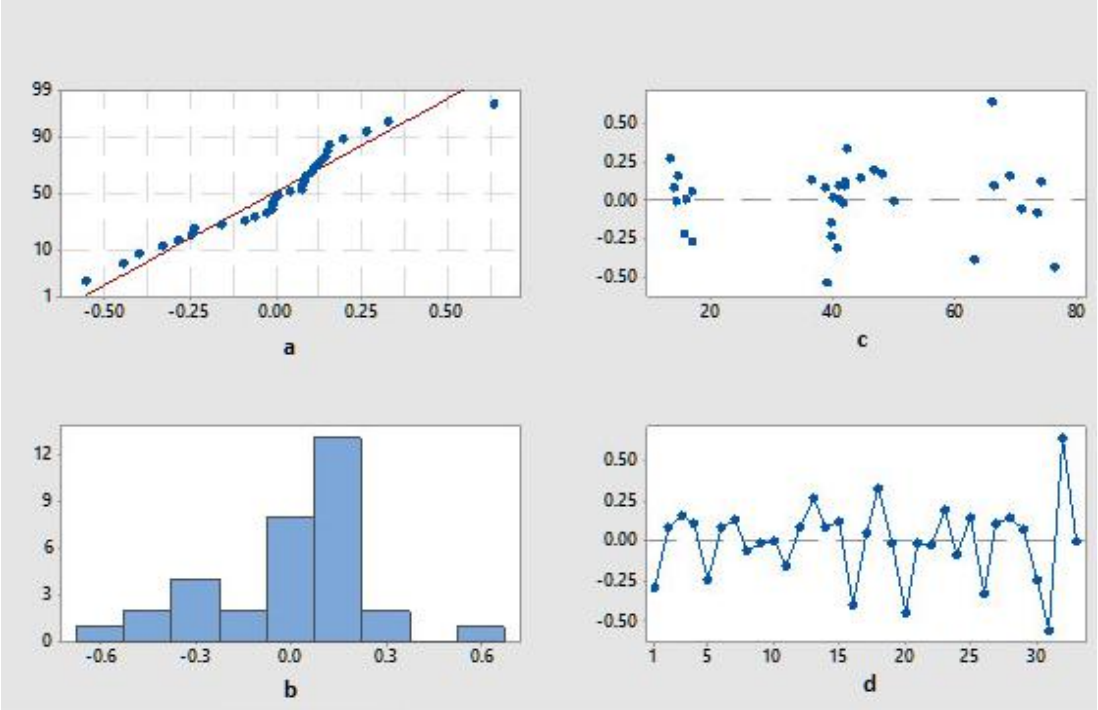
Çizelge 5.5 : Etkin parametreler seçildikten sonra oluşan ANOVA tablosu.

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Model	16	12397,4	774,8	6876,5	0,000
Doğrusal	5	12310,7	2462,2	21850,9	0,000
T_{ort}	1	5461,4	5461,4	48468,6	0,000
P_{led}	1	6596,7	6596,7	58543,8	0,000
$K_{gövde}$	1	33,1	33,1	293,8	0,000
K_{bd}	1	202,6	202,6	1797,7	0,000
$R_{ıam}$	1	17,0	16,9	150,4	0,000
İkili Etkileşimler	10	85,2	8,5	75,6	0,000
T_{ort} x P_{led}	1	2,3	2,4	20,9	0,000
T_{ort} x $K_{gövde}$	1	0,0	0,0	0,0	0,979
T_{ort} x K_{bd}	1	0,3	0,3	2,3	0,150
T_{ort} x $R_{ıam}$	1	0,2	0,2	1,7	0,212
P_{led} x $K_{gövde}$	1	9,0	8,9	79,5	0,000
P_{led} x K_{bd}	1	66,0	66,0	586,1	0,000
P_{led} x $R_{ıam}$	1	7,1	7,1	62,7	0,000
$K_{gövde}$ x K_{bd}	1	0,0	0,0	0,03	0,872
$K_{gövde}$ x $R_{ıam}$	1	0,1	0,1	1,1	0,310
K_{bd} x $R_{ıam}$	1	0,2	0,2	1,8	0,205
Eğrilik	1	1,5	1,5	13,2	0,002
Hata	16	1,8	0,1		
Toplam	32	12399,2			

Tablodaki sonuçlar, grafiksel normal olasılık dağılımı diyagramlarından da görülebilmektedir. Bu da seçilen faktörlerin ve bu faktörlerin bazı ikili etkileşimlerinin modelin maksimum jonksiyon sıcaklığı üzerine etkileri olduğunu göstermektedir. Özellikle LED çip ısıl gücü ile diğer faktörlerin ikili etkileri incelendiğinde, hepsinin etkili olduğu, dolaysıyla p değerlerinin düşük olduğu görülmektedir. LED ısıl gücünün farklı seviyeleri, diğer faktör davranışlarını da etkilemektedir. Modelin R^2 ve ayarlanmış R^2 değerleri sırasıyla %99,99 ve %99,97 olarak hesaplanmıştır. Bu değerler modeldeki farklılıkların, ele alınan faktörlerle iyi açıklandığını göstermektedir. ANOVA tablosundaki eğrilik için hesaplanan 0,002 P değeri, 0,05'ten düşük çıkmıştır. Bu da modelin yüksek seviye terimler içerdiğine işarettir. Şekil 5.8'den görüldüğü gibi, faktörlerin iki seviyesi arasındaki doğrusal çizgi, merkez noktasının etkisinin hesaplanması ile eğrilik kazanmaktadır. Özellikle gövde malzemesi, BD kartı türü ve ısıl arabirim malzemesi etkisinde eğrilik daha belirgindir. Bir sonraki bölümde ANOVA analizinin kabulleri detaylı incelenerek doğrulanacaktır.

5.2.4 ANOVA kabullerinin incelenmesi

Bölüm 5.1.2'de verilen ANOVA kabullerinin doğrulanması için yine Minitab yazılımı kullanılmıştır. Hata terimlerinin istatistiksel grafikleri Şekil 5.10'da verilmektedir. Hata terimleri, istatistiksel model sonuçları ile gerçek sonuçlar arasındaki farktır.



Şekil 5.10 : Hata terimlerinin istatistiksel bilgileri.

Şekil 5.10-a ve b'den görüldüğü gibi hata terimleri normale yakın bir dağılım sergilemiştir. Grafiklerdeki yatay eksenler model sonuçlarının gerçek değerlerle farkını, dikey eksenler ise sırasıyla yüzde olasılık ve frekans değerlerini göstermektedir. Şekil 5.10-c'de görülen frekans dağılımlarında herhangi bir yöne doğru belirgin bir kayma yoktur (hatalar sıfır çizgisinin iki tarafına homojen olarak dağılmıştır). Yatay eksen model kullanılarak elde edilmiş değerleri, dikey eksen ise gerçek değerlerden sapmaları göstermektedir. Şekil 5.10-d'den de deney sırasına göre oluşan hataların bağımsız, herhangi bir deseni takip etmemekte ve sıfır çizgisinin iki tarafında homojen olarak dağıldığı görülmektedir. Yatay eksen 1-33 arası sonuçları, dikey eksen ise hataları göstermektedir.

5.2.5 Faktöriyel deney tasarım sonuçlarının yorumlanması

Modelleme amaçlı seçilen örnek armatür üzerinde, LED armatür ısıl tasarımına etki eden faktörler incelenmiştir. Isıl simülasyonlar 2-direnç LED modeli ile gerçekleştirilmiştir. Tam faktöriyel bir deney tasarlanarak seçilen parametrelerin,

model içindeki maksimum jonksiyon sıcaklığına etkileri ve birbirleri ile olan etkileşimleri araştırılmıştır. Şekil 5.2'de teknik çizimleri verilen armatür için etkili olabilecek beş adet parametre belirlenmiştir. Bu parametreler sırasıyla; ortam sıcaklığı, LED çip ısıl gücü, gövde malzemesi, baskılı devre kartı tipi ve ısıl arabirim malzemesi olarak seçilmiştir.

ANOVA tablosu, normal ve yarı-normal olasılık dağılımları incelenerek, LED çip jonksiyon sıcaklığına etki eden temel etkiler ve etkileşimler aşağıda açıklanmıştır:

Ortam Sıcaklığı [T_{ort}]: Ortam sıcaklığı 0 ºC ve 25 ºC olmak üzere iki farklı seviyede incelenmiştir. Ortamın 25 °C'lik sıcaklık farkında, maksimum jonksiyon sıcaklığında da yaklaşık 25 °C fark meydana gelmiştir. Bu da ele alınan seviyeler için jonksiyon sıcaklığı ile doğrusala yakın bir ilişki olduğunu göstermektedir.

Isıl Arabirim Malzemesi [$R_{ıam}$]: Oluşturulan öncül modelde, kullanılan faktör seviyeleri göz önüne alındığında, ısıl arabirim malzemesinin jonksiyon sıcaklığına etkisinin düşük olduğu gözükmektedir. LED gücü ile ikili etkisi ise, değişik LED güçlerinde farklı etki yapabileceğini göstermektedir. Malzemenin ısıl direncinin jonksiyon sıcaklığına etkisi, çok değişkenli regresyon analizi hesaplarında tekrar değerlendirilecektir.

Baskı Devre Kartı Türü [K_{bd}]: Baskı devre kartı türünün, jonksiyon sıcaklığı üzerindeki etkisi analiz sonuçlarına göre yüksektir. Özellikle LED ısıl gücü arttıkça bu etkinin de arttığı gözlemlenmektedir. Daha detaylı analiz, regresyon ile bir sonraki bölümde gerçekleştirilecektir.

LED Çip Isıl Gücü [P_{led}]: Öncül tasarımda jonksiyon sıcaklığı üzerinde en yüksek etkisi olan faktörün LED çip ısıl gücü olduğu ortaya çıkmıştır. Ayrıca ikili etkileşimler incelendiğinde, seçilen faktör seviyeleri için LED ısıl gücü ile birlikte birçok ikili etki gözlemlenmektedir.

Armatür Gövde Malzemesi [$K_{gövde}$]: İncelenen modelde gövdenin alüminyum veya bakır olması halinde jonksiyon sıcaklığına etkisi araştırılmıştır. Alüminyum (k=140 W/mK) ve bakır (k=400 W/mK) kullanılarak gerçekleştirilen analizlerde gövde malzemesinin jonksiyon sıcaklığına etkisinin düşük olduğu görülmüştür. Diğer yandan bu faktörün LED çip ısıl gücünün farklı seviyelerinde etki derecesi değişmektedir.

LED Çip Isıl Güç – Baskı Devre Tipi Etkileşimi: ANOVA tabloları ve etki grafikleri incelendiğinde yüksek ısıl güçte düşük ısıl iletkenliğe sahip standart BD kartı

kullanıldığında, atılması gereken ısının atılamadığı ve jonksiyon sıcaklığının yükseldiği gözükmektedir. Düşük güç seviyesi için metal çekirdekli ve standart BD kartı kullanılan tasarımlarda jonksiyon sıcaklığı fazla değişmezken, yüksek güç seviyesinde normal BD kartı ile yapılan simülasyonlarda, jonksiyon sıcaklığının metal çekirdekli BD kartı kullanan tasarıma göre arttığı görülmektedir. Bunun sebebi yüksek ısıl dirence sahip standart BD kartlarının ısı geçişine engel olması ve darboğaz yaratmasıdır. Isı, LED çipinden sürekli bir biçimde uzaklaştırılamadığı için jonksiyon sıcaklığını arttırmaktadır. BD kartı türünün temel etkisi de göz önüne alındığında, LED'li armatürler için BD kartı türünün seçimi, güç değerine bağlı olarak çok önemli olabilmektedir.

Göz önüne alınan beş faktörün etkileri ve bu faktörlerin ikili etkileri Minitab programı kullanılarak hesaplanmış ve Çizelge 5.5'te verilen ANOVA tablosu oluşturulmuştur. ANOVA tablosundan görüleceği gibi, göz önüne alınan faktörlerin hepsinin jonksiyon sıcaklığı üzerinde etkisi olduğu söylenebilir. Bu etkiler özellikle yüksek ısıl güçlerde daha da fazla ortaya çıkmaktadır. Temel etkilerin yanında dört tane ikili etkileşim de istatistiksel olarak anlamlı çıkmıştır. İkili etkileşimlerin kare toplamları incelendiğinde, bu değerlerin LED ısıl gücü ve ortam sıcaklığı faktörlerinin kare toplamlarının yanında çok düşük kaldığı görülmektedir. Bu da LED çip ısıl gücü ile etkileşim içinde olan bu faktörlerin, LED ısıl gücünün yüksek etkisi ile istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir. Tez çalışması süresince bir çok simülasyon gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel deney tasarımının temel amaçlarından birinin az deney sayısı ile yüksek miktarda bilgi elde etmek olduğu düşünüldüğünde ve tez çalışması süresince simülasyon sayılarının çok arttığı da dikkate alınarak, deney sonuçları ile çok değişkenli regresyon analizi yapılmasına karar verilmiştir. Bir sonraki bölümde bilgisayar yardımı ile gerçekleştirilen simülasyonlar yine Minitab programı ile incelenecek ve regresyon modeli analiz edilecektir. Regresyon modeli oluşturulurken, deney tasarımında kullanılan parametrelerin daha yüksek seviyeli terimleri ve daha geniş aralıklar kullanılarak, öncül deney tasarımında ortaya çıkan eğrilik de hesaba katılacaktır.

Simülasyonlarda kullanılan armatür bir yol aydınlatması armatürü prototipi olduğu için mevcut şartnamelerde geçerli olan örnek koşullar dikkate alınarak, seçilen faktörlerden ortam sıcaklığı ve LED ısıl gücü, şartnamelerde belirtilen aralıklarda test edilerek modelin doğruluğu simülasyonlar ile denetlenecektir [85]. Bu faktörlerin

etkileri pratik olarak tahmin edilse de, simülasyon sonuçlarının istatistiksel analizi ile matematiksel olarak da ispat edilmesi amaçlanmaktadır. Bir sonraki bölümde ısıl simülasyonların regresyon analizi gerçekleştirilecektir.

5.3 Isıl Simülasyon Regresyon Analizi

Regresyon analizi için, kullanılan yol aydınlatması armatüründe tam faktöriyel deney tasarımında kullanılan bütün faktörler, bu faktörlerin yüksek seviyeli terimleri ve etkileşimleri incelenecek, gerçekleştirilen yüzden fazla simülasyon sonucu ve faktör seviyeleri verilecektir. Sonuçlar öncül analizin sonuçlarını da kapsamaktadır. Öncül analizden farklı olarak denenen bir çok farklı seviye de regresyon analizine eklenmiştir. Ortam sıcaklıkları için 0-50 °C arasında farklı değerler kullanılmıştır. Ortam sıcaklığının düşmesi genel olarak LED ışık kaynaklarının jonksiyon sıcaklığını düşürdüğü için peformans arttırıcı bir etki oluşturmaktadır. Bu sebeple çok düşük sıcaklıklar (sıfırın altında) kullanılmamıştır. LED ısıl güçleri uygulamada yaygın kullanılan değerler dikkate alınarak 0,1-1,1 W aralığında seçilmiştir. Gövde malzemesi olarak öncül analizdekine benzer şekilde ısıl iletim katsayıları çok farklı olan alüminyum ve bakır kullanılmıştır. BD kartı standart veya metal çekirdekli olarak analize dahil edilmiştir. Isıl arabirim malzemesi ısıl direnci de piyasada bulunabilecek ısıl ara birim malzemeleri düşünülerek 0,001-0,0007 m^2K/W aralığında değiştirilmiştir. Bilgisayar yardımı ile yapılan tüm ısıl simülasyon sonuçları Çizelge 5.6'da verilmiştir.

Simülasyon çalışmalarından elde edilen sonuçlar için Minitab programı yardımı ile bir regresyon model oluşturulacaktır.

Çizelge 5.6 : Tüm ısıl simülasyon sonuçları.

Sıra No	T_{ort} [°C]	P_{led} [W]	$K_{gövde}$ [W/mK]	K_{bd} [W/mK]	R_{tam} [m^2K/W]	Maksimum Jonksiyon Sıcaklığı [°C]
1	15	0,10	140	0,32	0,0002	21,87
2	28	0,10	140	0,32	0,0010	35,16
3	28	0,10	140	5,00	0,0010	34,30
4	0	0,25	140	5,00	0,0001	12,46
5	1	0,25	140	5,00	0,0001	13,42
6	50	0,25	140	5,00	0,0001	63,31
7	0	0,30	140	0,32	0,0001	16,43
8	0	0,30	140	0,32	0,0002	16,23
9	0	0,30	140	0,32	0,0010	16,84
10	0	0,30	140	0,32	0,0030	17,57
11	0	0,30	140	5,00	0,0001	14,19
12	0	0,30	140	5,00	0,0002	13,78
13	0	0,30	140	5,00	0,0010	14,74
14	0	0,30	140	5,00	0,0030	15,12
15	0	0,30	400	0,32	0,0001	15,36
16	0	0,30	400	0,32	0,0002	15,08
17	0	0,30	400	0,32	0,0010	15,92
18	0	0,30	400	0,32	0,0030	16,65
19	0	0,30	400	5,00	0,0001	13,39
20	0	0,30	400	5,00	0,0002	13,01
21	0	0,30	400	5,00	0,0010	13,84
22	0	0,30	400	5,00	0,0030	14,45
23	20	0,30	140	5,00	0,0030	36,31
24	20	0,30	400	5,00	0,0002	33,95
25	20	0,30	400	5,00	0,0030	35,40
26	25	0,30	140	0,32	0,0001	42,06
27	25	0,30	140	0,32	0,0002	41,59
28	25	0,30	140	0,32	0,0010	42,69
29	25	0,30	140	0,32	0,0030	43,31
30	25	0,30	140	5,00	0,0001	39,82
31	25	0,30	140	5,00	0,0002	39,30
32	25	0,30	140	5,00	0,0010	40,19
33	25	0,30	140	5,00	0,0030	40,61
34	25	0,30	400	0,32	0,0001	40,93
35	25	0,30	400	0,32	0,0002	40,69
36	25	0,30	400	0,32	0,0010	41,46
37	25	0,30	400	0,32	0,0030	42,35
38	25	0,30	400	5,00	0,0001	38,81
39	25	0,30	400	5,00	0,0002	38,45

Çizelge 5.6 (devam): Tüm ısıl simülasyon sonuçları.

Sıra No	T_{ort} [°C]	P_{led} [W]	$K_{gövde}$ [W/mK]	K_{bd} [W/mK]	R_{tam} [m^2K/W]	Maksimum Jonksiyon Sıcaklığı [°C]
40	25	0,30	400	5,00	0,0010	39,44
41	25	0,30	400	5,00	0,0030	39,91
42	18	0,35	140	5,00	0,0002	34,78
43	15	0,40	140	0,32	0,0002	36,24
44	15	0,40	140	5,00	0,0002	33,49
45	25	0,40	140	5,00	0,0002	43,93
46	15	0,50	140	5,00	0,0002	37,29
47	15	0,50	140	5,00	0,0007	37,58
48	20	0,50	140	5,00	0,0002	42,54
49	20	0,50	140	5,00	0,0007	42,9
50	25	0,50	140	0,32	0,0002	51,04
51	25	0,50	140	0,32	0,0030	53,63
52	25	0,50	140	5,00	0,0002	47,57
53	25	0,50	140	5,00	0,0002	47,74
54	25	0,50	140	5,00	0,0007	48,09
55	25	0,50	140	5,00	0,0030	49,88
56	30	0,50	140	0,32	0,0002	55,81
57	30	0,50	140	0,32	0,0030	58,42
58	30	0,50	140	5,00	0,0002	51,90
59	30	0,50	140	5,00	0,0030	54,07
60	0	0,55	140	5,00	0,0001	23,38
61	11	0,55	140	5,00	0,0010	35,88
62	50	0,55	140	5,00	0,0001	74,94
63	0	0,60	140	0,32	0,0002	28,76
64	0	0,60	140	0,32	0,0030	31,94
65	0	0,60	140	5,00	0,0030	26,94
66	0	0,60	400	0,32	0,0002	27,07
67	0	0,60	400	0,32	0,0030	30,07
68	0	0,60	400	5,00	0,0030	25,32
69	5	0,60	140	5,00	0,0002	30,22
70	10	0,60	140	0,32	0,0002	39,25
71	15	0,60	140	5,00	0,0002	40,94
72	20	0,60	140	0,32	0,0002	49,62
73	20	0,60	140	0,32	0,0002	50,03
74	20	0,60	140	0,32	0,0030	52,67
75	20	0,60	140	5,00	0,0002	45,10
76	20	0,60	140	5,00	0,0030	47,63
77	20	0,60	400	0,32	0,0002	47,71
78	20	0,60	400	0,32	0,0030	51,14
79	20	0,60	400	5,00	0,0002	43,41
80	20	0,60	400	5,00	0,0030	46,13
81	25	0,60	140	0,32	0,0002	54,97
82	25	0,60	140	0,32	0,0002	55,20

Çizelge 5.6 (devam): Tüm ısıl simülasyon sonuçları.

Sıra No	T_{ort} [°C]	P_{led} [W]	$K_{gövde}$ [W/mK]	K_{bd} [W/mK]	R_{tam} [m^2K/W]	Maksimum Jonksiyon Sıcaklığı [°C]
83	25	0,60	140	0,32	0,0030	57,87
84	25	0,60	140	0,32	0,0030	57,98
85	25	0,60	140	5,00	0,0002	50,17
86	25	0,60	140	5,00	0,0002	50,35
87	25	0,60	140	5,00	0,0002	51,26
88	25	0,60	140	5,00	0,0030	52,77
89	25	0,60	140	5,00	0,0030	52,94
90	25	0,60	400	0,32	0,0002	52,97
91	25	0,60	400	5,00	0,0030	51,34
92	25	0,60	400	5,00	0,0030	51,52
93	30	0,60	140	0,32	0,0002	59,70
94	30	0,60	140	0,32	0,0030	63,25
95	30	0,60	140	5,00	0,0002	55,24
96	30	0,60	140	5,00	0,0030	58,26
97	20	0,70	140	0,32	0,0002	54,43
98	9	0,72	140	0,32	0,0010	44,93
99	11	0,72	140	5,00	0,0010	41,99
100	5	0,80	140	5,00	0,0002	36,94
101	5	0,80	140	5,00	0,0002	36,94
102	15	0,80	140	5,00	0,0002	46,63
103	25	0,80	140	5,00	0,0002	57,97
104	4	0,85	140	0,32	0,0010	44,15
105	4	0,85	140	5,00	0,0010	38,89
106	28	0,85	140	0,32	0,0010	69,50
107	28	0,85	140	5,00	0,0001	62,19
108	28	0,85	140	5,00	0,0010	63,94
109	0	0,90	140	5,00	0,0001	34,24
110	15	0,90	140	0,32	0,0002	56,53
111	50	0,90	140	5,00	0,0001	85,82
112	15	1,00	140	5,00	0,0002	53,29
113	15	1,00	140	5,00	0,0007	55,03
114	20	1,00	140	5,00	0,0002	58,25
115	20	1,00	140	5,00	0,0007	59,32
116	25	1,00	140	5,00	0,0002	63,02
117	25	1,00	140	5,00	0,0007	65,22
118	30	1,00	140	5,00	0,0002	68,57
119	0	1,10	140	0,32	0,0001	48,04
120	0	1,10	140	0,32	0,0010	49,83
121	0	1,10	140	5,00	0,0001	39,46
122	0	1,10	140	5,00	0,0010	42,00
127	25	1,10	140	0,32	0,0001	74,33
128	25	1,10	140	0,32	0,0010	76,04
129	25	1,10	140	5,00	0,0001	66,40

Çizelge 5.6 (devam): Tüm ısıl simülasyon sonuçları.

Sıra No	T_{ort} [°C]	P_{led} [W]	$K_{gövde}$ [W/mK]	K_{bd} [W/mK]	R_{tam} [m^2K/W]	Maksimum Jonksiyon Sıcaklığı [°C]
130	25	1,10	140	5,00	0,0010	69,05
131	25	1,10	400	0,32	0,0001	70,92
132	25	1,10	400	0,32	0,0010	73,41
133	25	1,10	400	5,00	0,0001	62,72

5.3.1 Simülasyon sonuçlarının regresyon analizi

Çizelge 5.6'da verilen simülasyon sonuçları çok değişkenli bir regresyon modeli oluşturmak için kullanılmıştır. Öncül tam faktöriyel deney sonuçları, parametrelerin temel etkilerinin ve ikili etkilerinin göz önüne alınması gerektiğini ortaya çıkarmıştır. Aynı zamanda modelin eğrilik içerdiği de faktoriyel analiz sonuçlarından görülmektedir. Regresyon analizi için model değişkenleri seçilirken temel faktörlerin kendileri ve birbiri ile çarpımları kullanılmıştır. Böylece faktörlerin temel seviyeleri, yüksek seviyeleri ve birbirleri ile olan ikili etkileri de modele dahil edilebilmiştir. Model regresyon denklemi ve ANOVA tablosu yorumlanarak etki grafikleri oluşturulmuştur. Daha sonra regresyon modeli için ANOVA kabulleri incelenmiştir.

Model için FloEFD ile gerçekleştirilen simülasyon sonuçları Minitab yazılımı ile incelenmiştir. Havuzlama yapmak için Minitab yazılımının adım adım model terimi ekleme fonksiyonu kullanılmıştır. Model için anlamlılık seviyesi yine 0,05 seçilmiştir. Minitab yazılımı modele giren terimler için kritik F değerlerini hesaplayarak etkili parametreleri seçmiştir. Modeldeki hiyerarşinin korunması için ikili etkilerin içinde bulunan temel parametreler etkisiz gözükseler bile ($p>0,05$) yine de modelde tutulmuştur. Bu kabuller ile oluşturulan ANOVA tablosu Çizelge 5.7'de verilmiştir.

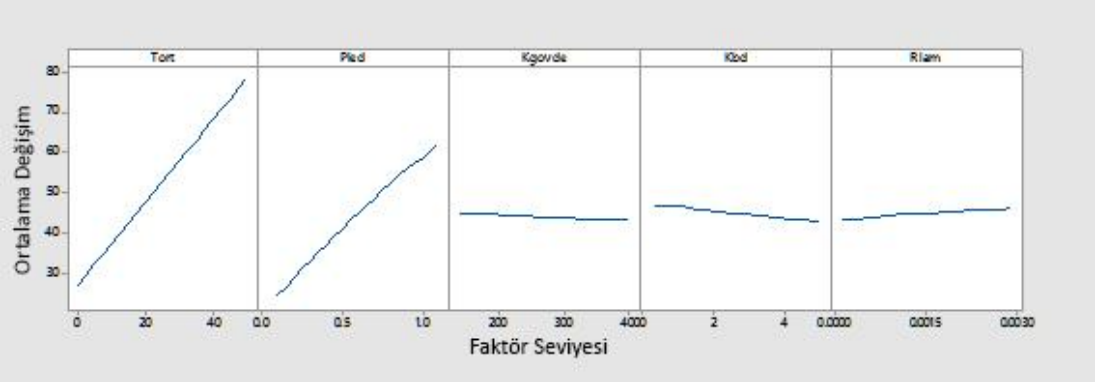
Çizelge 5.7'den görüldüğü gibi Minitab yazılımı adım adım beşli, dörtlü, üçlü ekileşimleri inceleyerek p değeri 0,05'in üzerinde olan terimleri elemiştir . Modelin R^2 ve ayarlanmış R^2 değerleri sırasıyla %99,96 ve %99,95 olarak hesaplanmıştır. Bu da mevcut faktörlerin ve göz önüne alınan seviyelerinin, model içindeki faklılığı %100'e yakın bir ölçüde açıkladığını göstermektedir. Standart sapma ise 0,35'tir.

Çizelge 5.7 : Regresyon modeli ANOVA tablosu.

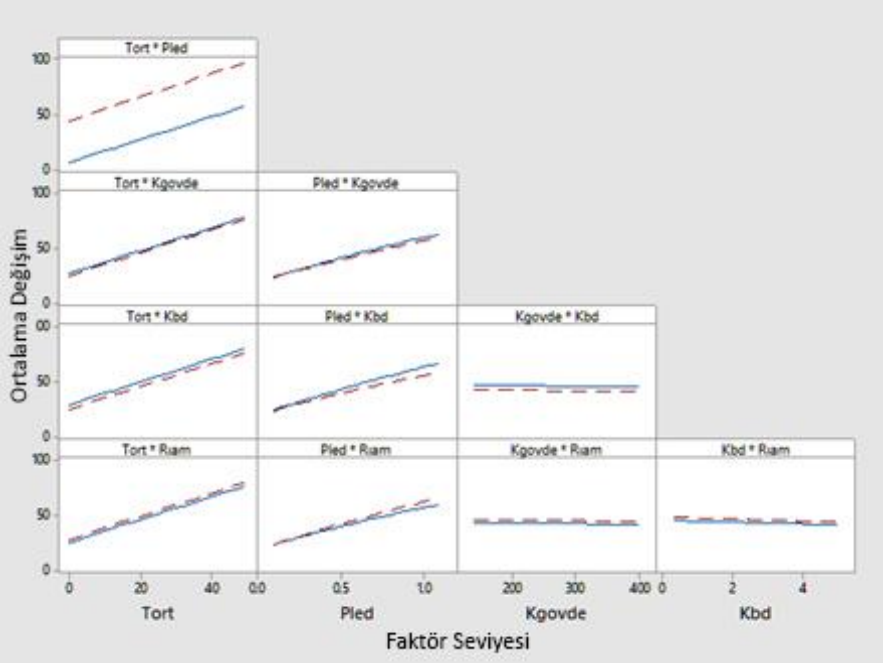
Kaynak	Serbetstlik Derecesi	Kareler Toplamı	Kareler Ortalaması	F-Değeri	p-Değeri
Regresyon	18	34268,9	1903,83	15255,64	0,00
T_{ortam}	1	835,4	835,42	6694,37	0,00
P_{led}	1	614,2	614,15	4921,29	0,00
K_{govde}	1	0	0,01	0,08	0,78
K_{bd}	1	0,7	0,71	5,73	0,02
$R_{ıam}$	1	0,8	0,83	6,67	0,01
T_{ortam} x T_{ortam}	1	0,1	0,09	0,71	0,40
P_{led} x P_{led}	1	23	22,98	184,16	0,00
$R_{ıam}$ x $R_{ıam}$	1	1,8	1,84	14,78	0,00
T_{ortam} x P_{led}	1	2,4	2,43	19,49	0,00
T_{ortam} x K_{govde}	1	0	0	0	0,95
T_{ortam} x K_{bd}	1	0	0,03	0,25	0,62
T_{ortam} x $R_{ıam}$	1	0,2	0,2	1,63	0,20
P_{led} x K_{govde}	1	17,2	17,24	138,15	0,00
P_{led} x K_{bd}	1	134	134	1073,74	0,00
P_{led} x $R_{ıam}$	1	12,2	12,2	97,79	0,00
K_{govde} x K_{bd}	1	0,1	0,08	0,67	0,42
K_{govde} x $R_{ıam}$	1	0,2	0,18	1,43	0,23
K_{bd} x $R_{ıam}$	1	1,4	1,44	11,55	0,00
Hata	114	14,2	0,12		
Model Uyumsuzluğu	105	13,4	0,13	1,36	0,33
Saf Hata	9	0,8	0,09		
Toplam	132	34283,1			

Yapılan regresyon analizi ile armatür gövdesi p değeri 0,78 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçtan armatür gövdesi için yüksek ısıl iletkenliğe sahip iki farklı malzeme (alüminyum ve bakır) seçiminin, jonksiyon sıcaklığına tek başına etkisi olmadığı ve alüminyum armatür gövdesini daha yüksek ısıl iletkenliğe sahip bir gövde malzemesi ile değiştirmenin etkili olmayacağı söylenebilir. Ancak armatür gövdesi malzemesi ikili etkileşimlerde etkili olduğu için, yükselen LED ısıl gücü ile dolaylı olarak jonksiyon sıcaklığına etkisi vardır. Regresyon modelinin temel etki grafikleri Şekil 5.11'de verilmiştir.

Temel etki grafikleri incelendiğinde, jonksiyon sıcaklığına en çok etki eden temel faktörlerin ortam sıcaklığı ve LED çip ısıl gücü olduğu söylenebilir. Öncül faktöriyel analizlerde de yaklaşık aynı sonuçlar elde edilmiştir. Minitab yazılımı tarafından oluşturulan ikili etkileşim grafikleri ise şekil 5.12'de verilmiştir.



Şekil 5.11 : Oluşturulan regresyon modeli için temel etki grafikleri.



Şekil 5.12 : Oluşturulan regresyon modeli için ikili etkileşim grafikleri.

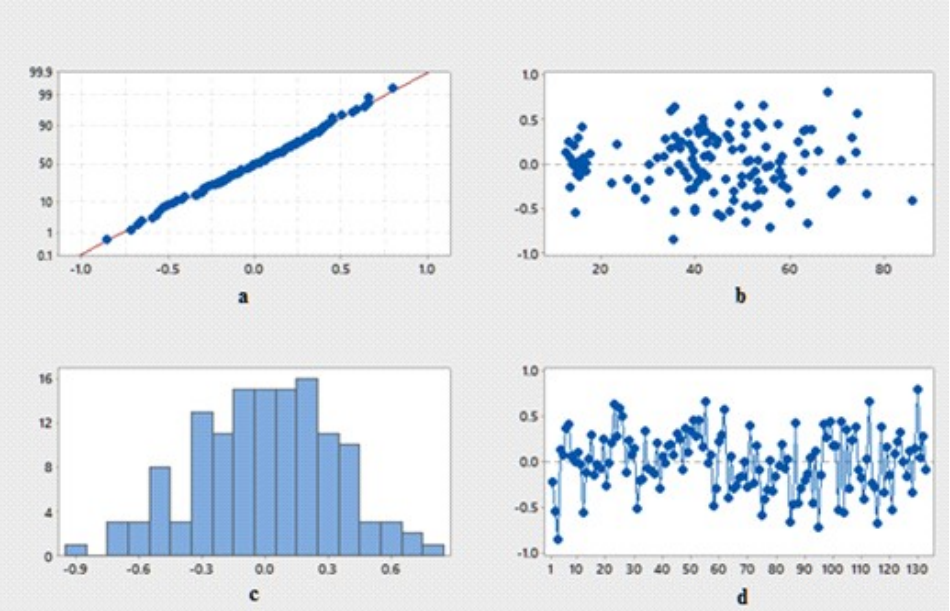
Temel parametre seviyeleri ve ikili etkileşimler göz önüne alındığında, maksimum jonksiyon sıcaklığı denklem 5.4 ile tahmin edilebilir.

$$\begin{aligned} T_{jmaks} = {} & 1{,}866 + 1{,}0139\,T_{ort} + 50{,}853\,P_{led} - 0{,}000237\,K_{govde} + 0{,}1201\,K_{bd} \\ & + 582\,R_{ıam} - 0{,}000173\,T_{ort}^2 - 6{,}494\,P_{led}^2 \\ & - 208831\,R_{ıam}^2 + 0{,}03967\,T_{ort}xP_{led} - 0{,}000001\,T_{ort}xK_{govde} \\ & - 0{,}00062\,T_{ort}xK_{bd} + 3{,}39\,T_{ort}xR_{ıam} - 0{,}011393\,P_{led}xK_{govde} \\ & - 1{,}6234\,P_{led}xK_{bd} + 1779\,P_{led}xR_{ıam} - 0{,}000098\,K_{govde}xK_{bd} \\ & + 0{,}294\,K_{govde}xR_{ıam} - 43{,}0\,K_{bd}xR_{ıam} \end{aligned} \tag{5.4}$$

Modelin regresyon kabullerinin doğrulanması ve detaylı analizi sonraki bölümlerde yapılacaktır.

5.3.2 Regresyon kabullerinin doğrulanması

Bu bölümde regresyon analizi için oluşturulan ANOVA tablolarının geçerlilikleri bölüm 5.2.4'te açıklanan yöntemler ile test edilecektir. Yine Minitab yazılımı tarafından oluşturulan hata terimleri grafiği Şekil 5.13'te verilmiştir.



Şekil 5.13 : Regresyon analizi için hata terimleri grafiği.

Şekil 5.13-a ve b'den görüldüğü gibi hata terimleri normale yakın bir dağılım sergilemiştir. Grafiklerdeki yatay eksenler model sonuçlarının gerçek değerlerle farkını, dikey eksenler ise sırasıyla yüzde olasılık ve frekans değerlerini göstermektedir. Öncül faktör analizinde kullanılan hata terimleri grafikleri ile karşılaştırıldığında, veri sayısının artmasıyla grafikler normal olasılık dağılımı eğrilerine daha benzer bir hale gelmiştir. Şekil 5.13-c'de görülen frekans dağılımlarında hataların sıfır çizgisinin iki tarafına homojen olarak dağıldığı, herhangi bir yöne doğru belirgin bir kayma olmadığı görülmektedir. Yatay eksen model kullanılarak elde edilmiş değerleri, dikey eksen ise gerçek değerlerden sapmaları göstermektedir. Şekil 5.13-d'den görüldüğü gibi deney sırasına göre oluşan hatalar bağımsızdır, herhangi bir deseni takip etmemekte ve sıfır çizgisinin iki tarafında homojen olarak dağılmaktadır. Yatay eksen 1-133 arası sonuçları, dikey eksen ise model hata miktarlarını göstermektedir.

Model uygunluğunu test etmek için kullanılabilecek diğer bir istatistik değerlendirme ise "model uyumsuzluğu değeri"dir. Model uyumsuzluğu için p değeri 0,33 olarak bulunmuştur. Hipotez testi ile hesaplanan 0,33 değeri, model için kabul edilen

anlamlılık seviyesi (α=0,05) değerinden yüksek olduğu için modelin uyumsuzluğunu gösterecek bir bulguya rastlanmamıştır. Bir sonraki bölümde model sonuçları tartışılacaktır.

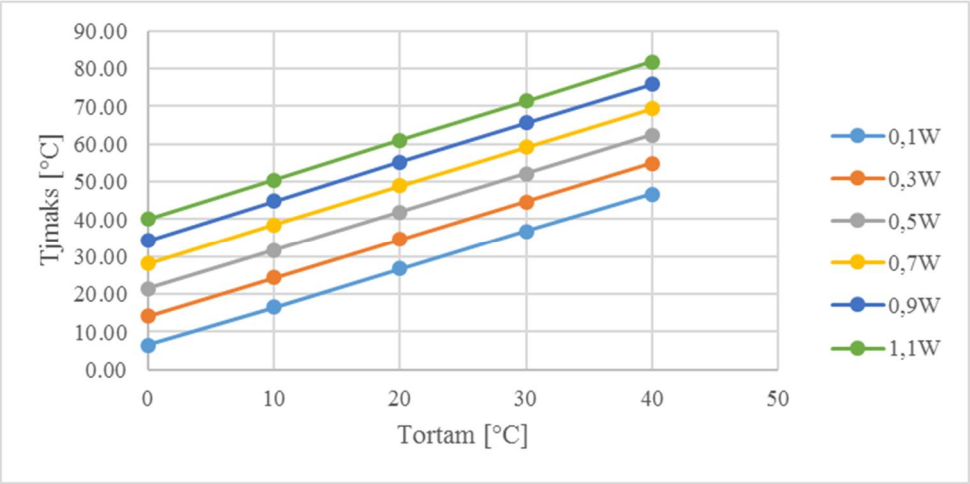
5.3.3 Regresyon model sonuçlarının tartışılması

Tam faktöriyel tasarım ile gerçekleştirilen incelemelerde seçilen faktörler ve seviyeler için analizler gerçekleştirilmiş ve sonuçlar önceki bölümlerde yorumlanmıştır. Kullanılan lineer modelde eğrilik olabileceği varsayımı ile daha yüksek dereceli faktörler de modele eklenmiştir. Daha önce yapılan 133 simülasyon sonucu kullanılarak faktör seviye aralıkları daha geniş bir model kurulmuştur. Çok-değişkenli regresyon analizi yapılarak, kullanılan örnek üç boyutlu model üzerinde temel faktörlerin, bu faktörlerin yüksek seviyelerinin ve ikili etkileşimlerinin sonuçlarının ortaya çıkarılması hedeflenmiştir. Bu bölümde oluşturulan model incelenerek yorumlanacaktır. Daha kolay anlaşılabilir olacağı düşünülerek, modelin etkilerinin grafiksel gösterimi de gerçekleştirilmiştir.

Çizelge 5.7'de verilen ANOVA tablosu incelendiğinde en etkili faktörlerin ortam sıcaklığı ve LED çip ısıl gücü olduğu görülmektedir. Bu iki terimin yanında baskı devre (BD) kartı türü ve ısıl arabirim malzemesi de etkilidir. İkili etkileşimler içinde en etkili olanı LED çip ısıl gücü - BD kartı türü etkileşimidir. Yüksek dereceli terimler içinde ise LED çip ısıl gücünün ikinci kuvveti etkilidir. Aşağıda modelde kullanılan temel faktörler detaylı olarak irdelenmiştir.

5.3.3.1 Ortam sıcaklığı (T_{ortam})

Simülasyon sonuçları ve regresyon modeli incelendiğinde, ortam sıcaklığının jonksiyon sıcaklığı üzerinde etkisi yüksektir. Ayrıca simülasyon sonuçlarından ortam sıcaklığı ile jonksiyon sıcaklığı arasında doğrusala yakın bir ilişki görülmektedir. Alüminyum gövde (k=140 W/mK), yüksek ısı iletim katsayısına sahip bir BD kartı (k=5 W/mK) ve yüksek performanslı bir ısıl arabirim malzemesi (R=0,0001 m^2K/W) ile farklı ortam sıcaklıkları ve LED çip ısıl güçleri için hesaplanan jonksiyon sıcaklıkları Şekil 5.14'te verilmiştir. ANOVA tablosunda görülen ortam sıcaklığı ve LED gücü etkileşimi grafikten de görülebilmektedir. Ortam sıcaklığının yüksek seviyelerinde, artan LED çip ısıl gücü ile maksimum jonksiyon sıcaklığı, düşük sıcaklıklara oranla daha fazla artmaktadır. Ayrıca ortam sıcaklığının ikinci derece etkisi de çizgilerin eğriliğinden görülebilmektedir.



Şekil 5.14 : Ortam sıcaklığına göre farklı LED çip ısıl güçlerinde maksimum jonksiyon sıcaklığının değişimi ($k_{gövde}$=140 W/mK, k_{bd}=5 W/mK, $R_{ıam}$=0,0001 m^2K/W için).

Düşük ve yüksek LED çip ısıl güç değerleri ile yukarıda belirtilen koşullarda hesaplanan jonksiyon sıcaklığı değişimleri ve 10°C'lik ortam sıcaklığı artışında bir önceki ortam sıcaklığı seviyesine göre hesaplanan farklar Çizelge 5.8'de verilmiştir. Çizelgeden de görüleceği üzere ortam sıcaklığı arttıkça, jonksiyon sıcaklığı da benzer şekilde değişmektedir.

Çizelge 5.8 : Ortam sıcaklığının jonksiyon sıcaklığına etkisi.

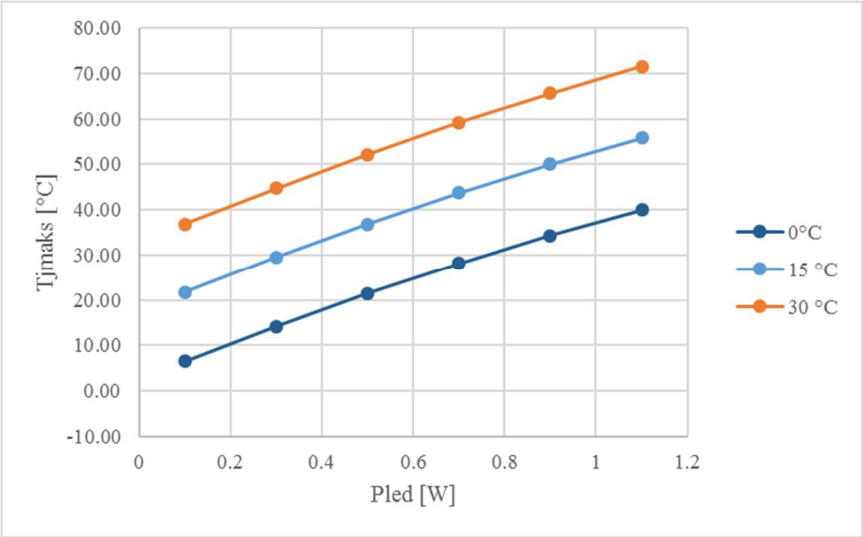
P_{led} = 0,1 W			P_{led} = 1,1 W		
Tortam [ºC]	Tjmaks [ºC]	Fark	Tortam [ºC]	Tjmaks [ºC]	Fark
0	6,47		0	40,00	
10	16,60	10,13	10	50,53	10,53
20	26,70	10,10	20	61,02	10,49
30	36,76	10,06	30	71,48	10,46
40	46,79	10,03	40	81,91	10,43

Temel, yüksek dereceli etkiler ve ikili etkileşimler göz önüne alındığında, ortam sıcaklığının artmasının LED jonksiyon sıcaklığına birebir etki edeceği söylenebilir. Bu nedenle farklı sıcaklıkta çalıştırılacak olan LED armatürlerin ısıl analizleri, çalıştırılacağı ortam sıcaklığı göz önüne alınarak yapılmalı ve kullanılan LED ışık kaynaklarının performansları farklı ortam sıcaklıkları için belirlenmelidir.

5.3.3.2 LED çip ısıl gücü (P_{led})

LED çip ısıl gücü, jonksiyon sıcaklığını etkileyen ikinci önemli faktördür. Hem LED ısıl gücünün hem de LED ısıl gücünün karesinin, maksimum jonksiyon sıcaklığı

üzerinde etkisi olduğu görülmektedir. Farklı LED çip ısıl güçleri için jonksiyon sıcaklığı artışları Şekil 5.15'te verilmiştir. Hesaplamalar alüminyum gövde (k=140 W/mK), yüksek ısı iletim katsayısına sahip bir baskı devre kartı (k=5 W/mK) ve yüksek performanslı bir ısıl arabirim malzemesi (R=0,0001 m^2K/W) kullanılarak farklı ortam sıcaklıkları için gerçekleştirilmiştir.



Şekil 5.15 : Farklı ortam sıcaklıkları için LED çip ısıl gücünün jonksiyon sıcaklığı üzerine etkisi ($k_{gövde}$=140 W/mK, k_{bd}=5 W/mK, $R_{ıam}$ = 0,0001 m^2K/W için).

Modelin ANOVA tablosu, LED çip ısıl gücünün ikinci derecesinin de etkili olduğunu göstermektedir. Şekil 5.15'teki eğrisellik de bunun sonucudur. Çizelge 5.9'da 25 °C ortam sıcaklığında, farklı LED ısıl güçleri için maksimum jonksiyon sıcaklıkları verilmiştir.

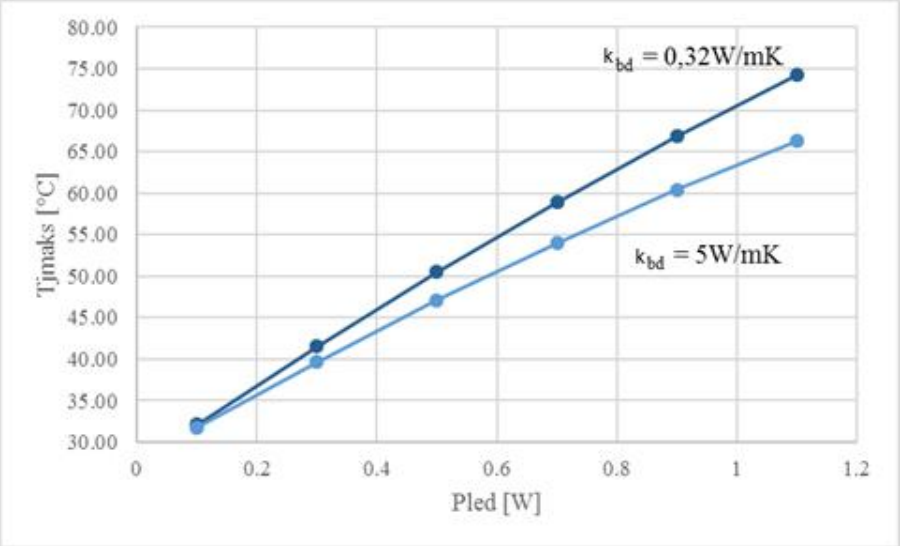
Çizelge 5.9 : Farklı LED ısıl güçleri için maksimum jonksiyon sıcaklıkları (Tort=25°C).

P_{led} [W]	T_{jmaks} [ºC]
0,1	31,74
0,2	35,77
0,3	39,68
0,4	43,46
0,5	47,10
0,6	50,62
0,7	54,01
0,8	57,26
0,9	60,39
1	63,39
1,1	66,25

LED ısıl gücünün artışı jonksiyon sıcaklığını arttırmaktadır. Çizelge 5.9'daki sonuçlardan görülebileceği gibi düşük LED ısıl güçlerinde LED'ler fazla ısınmamaktadır. Özellikle nominal akımlarının üzerinde sürülen LED çiplerin jonksiyon sıcaklıkları artan ısıl güç ile yükselmektedir. Yüksek sıcaklığın armatür verimini ve LED ömrünü etkilediği bilinmektedir. Buna göre LED'li armatür tasarım hedefleri belirlenirken istenilen etkinlik faktörü ve ömür değerleri tanımlanarak maksimum jonksiyon sıcaklıkları bulunmalıdır. Maksimum jonksiyon sıcaklıkları sürme akımının ve armatür mekanik yapısı ile fiziksel özelliklerinin bir fonksiyonu olacaktır. Bu parametreler ısıl analizler ile değerlendirilerek optimum çözümlere ulaşılmalıdır.

5.3.3.3 Baskı devre kartı türü (K_{bd})

ANOVA tablosu incelendiğinde analizlerde kullanılan baskı devre kartı türlerinin maksimum jonksiyon sıcaklığına etkisi olduğu gözükmektedir. Özellikle LED çip ısıl gücü ile baskı devre kartı türü etkileşiminin kareler toplamı, etki sırasına göre üçüncü sırada yer almaktadır. LED ısıl gücünün artmasıyla düşük ısı iletim katsayısına sahip standart baskı devre kartının ısı geçişine direnç gösterdiği söylenebilir. Özellikle faktörün iki seviyesi arasında, LED ısıl gücü arttıkça açılan makas, iki faktör arasındaki etkileşimi doğrulamaktadır. Şekil 5.16'da alüminyum gövde ve yüksek performanslı bir ısıl arabirim malzemesi kullanılarak farklı LED güçleri için 25°C ortam sıcaklığında baskı devre kartının jonksiyon sıcaklığına etkisi gösterilmiştir.



Şekil 5.16 : BD kartı türünün farklı LED çip ısıl güçlerinde maksimum jonksiyon sıcaklığına etkileri ($k_{gövde}$=140 W/mK, $R_{ıam}$=0,0001 m^2K/W, T_{ortam}=25 ºC için).

Şekil 5.16'dan görüleceği gibi LED gücü arttıkça düşük ısı iletim katsayısına sahip BD kartı ısıyı uzaklaştıramamakta ve bunun sonucunda yüksek LED ısıl güçlerinde jonksiyon sıcaklığı daha fazla artmaktadır. Düşük LED ısıl güçlerinde ise BD kartı etkisi çok belirgin değildir. Grafikteki değerler aşağıda Çizelge 5.10'da sayısal olarak verilmektedir.

Çizelge 5.10 : Farklı LED çip ısıl güçleri için BD kartı etkisi.

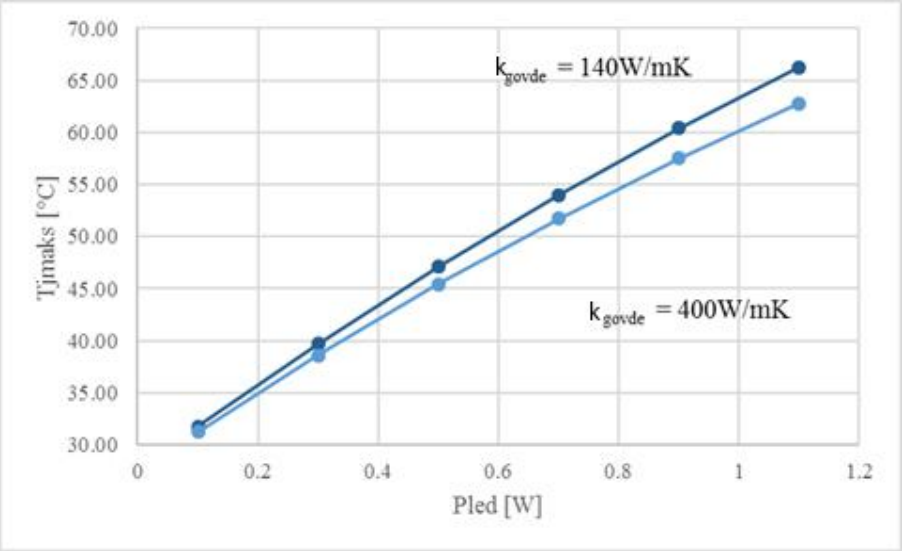
P_{led} [W]	K_{bd}[W/mK]	Tjmaks [°C]	Fark [°C]
0,1	0,32	32,1	
0,1	5,00	31,7	0,35
0,3	0,32	41,6	
0,3	5,00	39,7	1,87
0,5	0,32	50,5	
0,5	5,00	47,1	3,39
0,7	0,32	58,9	
0,7	5,00	54,0	4,91
0,9	0,32	66,8	
0,9	5,00	60,4	6,43
1,1	0,32	74,2	
1,1	5,00	66,3	7,95

Çizelge 5.10'dan görüldüğü gibi düşük güçlerde BD kartı türü'nün etkisi, yüksek güçlerdekine göre daha düşüktür. Bu durum BD kartı türü ile LED ısıl gücü etkileşiminin yüksek olduğunu göstermektedir. Özellikle yüksek akımda sürülen LED'ler için ısıl performansı yüksek BD kartları kullanmak gereklidir. Günümüzde üzerinde en çok çalışılan konulardan biri elektronik elemanlar için yüksek ısıl iletkenliğe sahip dielektrik katman malzemelerinin geliştirilmesidir. BD kartının ısıl direncini düşürüp iletkenliğini arttırmak için yüksek performanslı malzemelere ihtiyaç vardır. Yüksek güçlü LED'li armatürlerde bu malzemelerin kullanılması, armatür performansına olumlu yönde etki edecektir.

5.3.3.4 Gövde malzemesi ($K_{gövde}$)

Modelde ele alınan farklı ısıl iletkenliğe sahip iki gövde malzemesinin değişimi, diğer faktörlerin yanında etkili olarak gözükmemektedir. Kullanılan üç boyutlu model için, gövde malzemesinin değişiminin jonksiyon sıcaklığına etkileri, ancak diğer parametre etkileşimleri ile önemli hale gelmektedir. Özellikle ortam sıcaklığı ve LED ısıl gücünün değişik seviyelerinde gövde malzemesinin etkisi farklı olmaktadır. Şekil 5.17'de farklı LED çip ısıl güçleri ve örnek ortam sıcaklığı için, maksimum jonksiyon

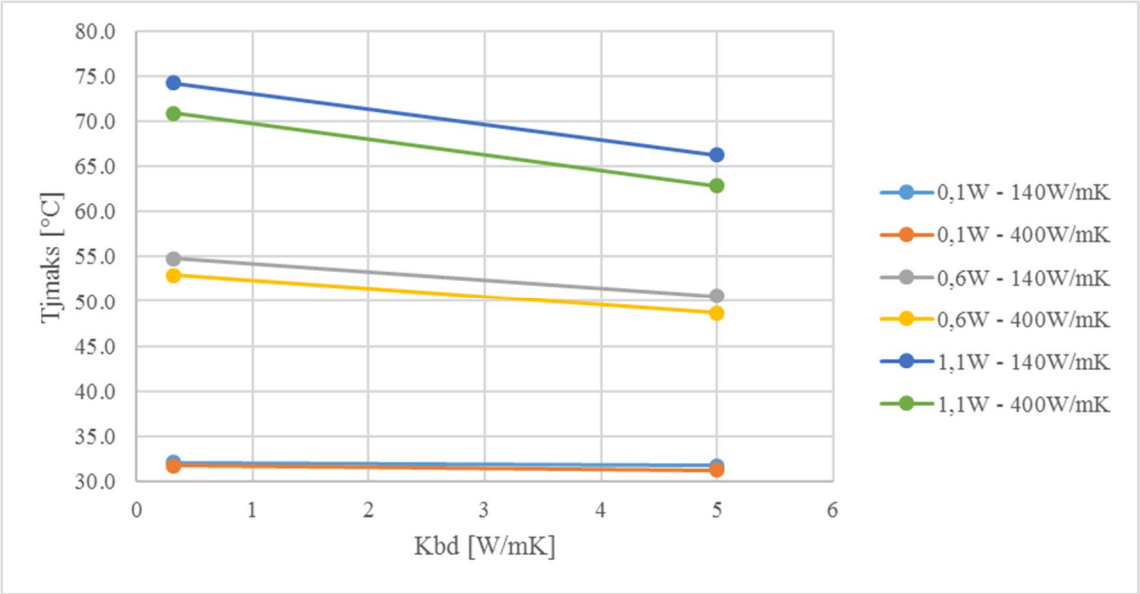
sıcaklıklarının değişim grafikleri verilmiştir. Karşılaştırmalarda 25°C ortam sıcaklığında alüminyum (k=140W/mK) ve bakır (k=400W/Mk) gövdelerde yüksek performanslı bir ısıl arabirim malzemesi (R=0,0001 m^2K/W) ve metal çekirdekli BD kartı (k=5 W/mK) kullanılmıştır.



Şekil 5.17 : Gövde malzemesinin farklı LED çip ısıl güçlerinde maksimum jonksiyon sıcaklığına etkisi (k_{pcb}=5 W/mK, $R_{ıam}$ = 0.0001 m^2K/W, T_{ortam}=25ºC için).

Şekil 5.17'den görüldüğü gibi gövde malzemesinin jonksiyon sıcaklığı üzerindeki etkisi LED gücünün düşük ve yüksek seviyelerinde farklıdır. Yüksek LED güçlerinde gövde malzemesinin ısı iletim katsayısının artması, jonksiyon sıcaklığını daha fazla düşürmektedir. Şekil 5.18'de, 25 °C ortam sıcaklığında, BD kartı türünün, farklı LED çip ısıl güçlerinin ve farklı gövde malzemelerinin maksimum jonksiyon sıcaklığı üzerindeki etkileri gösterilmektedir. Bu karşılaştırmada da yüksek performanslı bir ısıl arabirim malzemesi (R=0,0001 m^2K/W) kullanılmıştır.

Şekil 5.17'den görüleceği gibi LED çip ısıl gücü arttıkça gövde malzemesinin ve BD kartı türünün jonksiyon sıcaklığı üzerindeki etkisi de değişmektedir. ANOVA tablosunda görülen LED ısıl gücü, BD kartı türü ve gövde malzemesi etkileşimleri Şekil 5.16 ve 5.17'den görülebilmektedir. 25 °C ortam sıcaklığı, metal çekirdekli BD kartı (k=5 W/mK) ve ısıl direnci düşük ısıl arabirim malzemesi (R=0,0001 m^2K/W) için, farklı LED çip ısıl güç değerleri ve gövde malzemeleri için maksimum jonksiyon sıcaklığı değerleri Çizelge 5.11'de verilmiştir.



Şekil 5.18 : 25 °C ortam sıcaklığında farklı LED çip ısıl güçleri ve farklı gövde malzemesi için BD kartı türünün maksimum jonksiyon sıcaklığı üzerindeki etkisi ($R_{ıam}$ = 0,0001 m^2K/W için).

Çizelge 5.11 : Farklı LED çip ısıl güçleri için gövde malzemesinin jonksiyon sıcaklığı üzerine etkisi.

P_{led} [W]	$k_{gövde}$ [W/mK]	Fark [°C]
0,1	140	
0,1	400	-0,48
0,6	140	
0,6	400	-1,97
1,1	140	
1,1	400	-3,45

Çizelge 5.11 incelendiğinde, düşük LED ısıl güçlerinde gövde malzemesinin etkisi daha az iken, LED ısıl gücü yükseldikçe bu etki artmaktadır. Dolayısıyla gövde malzemesinin LED ısıl gücü ile etkileşimi vardır. Diğer yandan LED çip ısıl gücünün farklı seviyelerinde gövde malzemesinin etkisinin farklı olacağı da görülmektedir. Özellikle yüksek güçlerde gövde malzemesinin etkisinin yüksek olacağı hem ANOVA tablosundan hem de grafik ve hesaplamalardan anlaşılmaktadır. Armatür ısıl analizlerinde, LED çip ısıl gücüne göre armatür gövdesinin ısıl iletkenliği değeri optimize edilmeli ve bu sonuçlara göre armatür maliyetini arttırabilecek farklı gövde malzemesi kullanımının gerekli olup olmadığına karar verilmelidir.

5.3.3.5 Gövde malzemesi ve geometrisinin incelenmesi

Öncül faktör analizi ve regresyon analizinden, ısıl iletkenlik katsayıları farklı olmasına rağmen bakır ve alüminyum alaşım gövde malzemesinin tek başına jonksiyon sıcaklığı

üzerinde önemli bir etkisi görülmemiştir. Önceki çalışmalarda kullanılan gövde malzemesi faktör seviyelerine ek olarak farklı gövde malzemesinin etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için alüminyum alaşım ve bakırdan daha düşük ısıl iletkenliğe sahip bir malzeme seçilerek simülasyonlar tekrarlanmıştır. Isıl simülasyon programının kütüphanesi kullanılarak ilk seçilen seviyelerden daha düşük ısıl iletkenliğe sahip bir alüminyum/tunç alaşımı kullanılmıştır (ısıl iletkenlik k=56,5 W/mK). Bu alaşım kullanıldığında oluşan maksimum jonksiyon sıcaklığı ile, alüminyum alaşımı (k=140 W/mK) kullanıldığında oluşan maksimum jonksiyon sıcaklığı arasındaki farklar, çizelge 5.13'te verilmiştir. Simülasyonlar için 25 °C ortam sıcaklığı, metal çekirdekli BD kartı (k=5 W/mK), yüksek performanslı ısıl arabirim malzemesi (R=0,0001 m^2K/W) ve farklı LED çip ısıl güçleri (0,1 W-0,6 W-1,1 W) seçilmiştir.

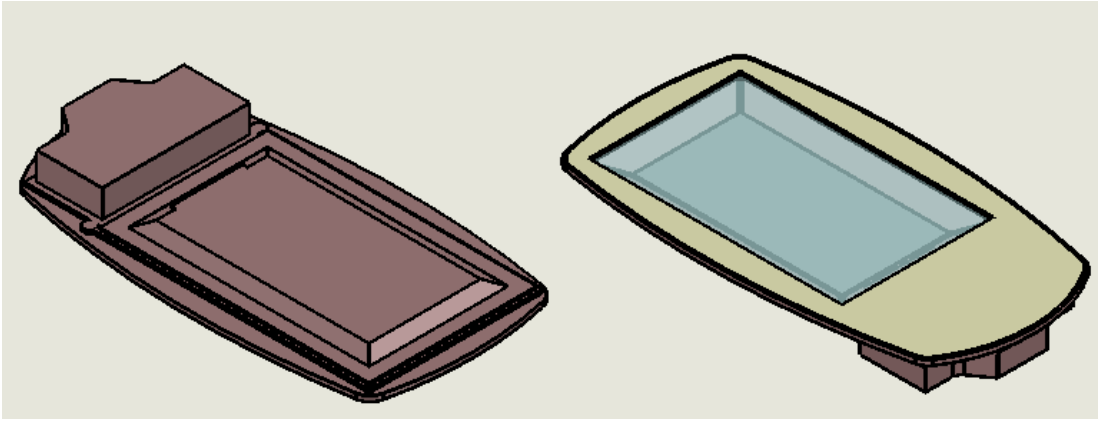
Çizelge 5.12 : Farklı gövde malzemeleri için maksimum jonksiyon sıcaklıkları.

P_{led} [W]	K_{govde} [W/mK]	T_{jmaks} [°C]	Fark [°C]
0,1	140	31,17	
0,1	56,5	31,73	0,6
0,6	140	50,90	
0,6	56,5	53,10	2,2
1,1	140	66,46	
1,1	56,5	70,87	4,4

Çizelge 5.11 ve 5.12 incelendiğinde, daha düşük ısıl iletkenlik katsayılı gövde malzemesi seçildiğinde jonksiyon sıcaklığı farkları özellikle yüksek LED ısıl güçlerinde artmaktadır. Oluşturulan regresyon modeli analizinde de belirtildiği gibi bir çok faktörün LED ısıl gücü ile etkileşimi yüksektir. Gövde malzemesi de buna dahildir. Özellikle yüksek ısıl güçlerde gövde malzemesi optimizasyonu önem kazanmaktadır.

Ayrıca gövde geometrisinin öneminin araştırılması için kanatsız bir gövde oluşturulup, ısıl simülasyonlar tekrarlanmıştır. Bu amaçla oluşturulan gövde Şekil 5.19'da verilmiştir.

Simülasyonlarda alüminyum gövde (k=140 W/mK), 25 °C ortam sıcaklığı, metal çekirdekli BD kartı (k=5 W/mK), yüksek performanslı ısıl arabirim malzemesi (R=0,0001 m^2K/W) ve farklı LED çip ısıl güçleri (0,1 W-0,6 W-1,1 W) kullanılmıştır. Çizelge 5.13'te kanatlı ve kanatsız armatür gövdeleri için farklı LED çip ısıl güçlerindeki maksimum jonksiyon sıcaklıkları ve oluşan farklar verilmiştir.



Şekil 5.19 : Kanatsız gövde geometrisi.

Çizelge 5.13 : Farklı LED çip ısıl güçlerinde kanatlı/kanatsız alüminyum gövde için maksimum jonksiyon sıcaklıkları.

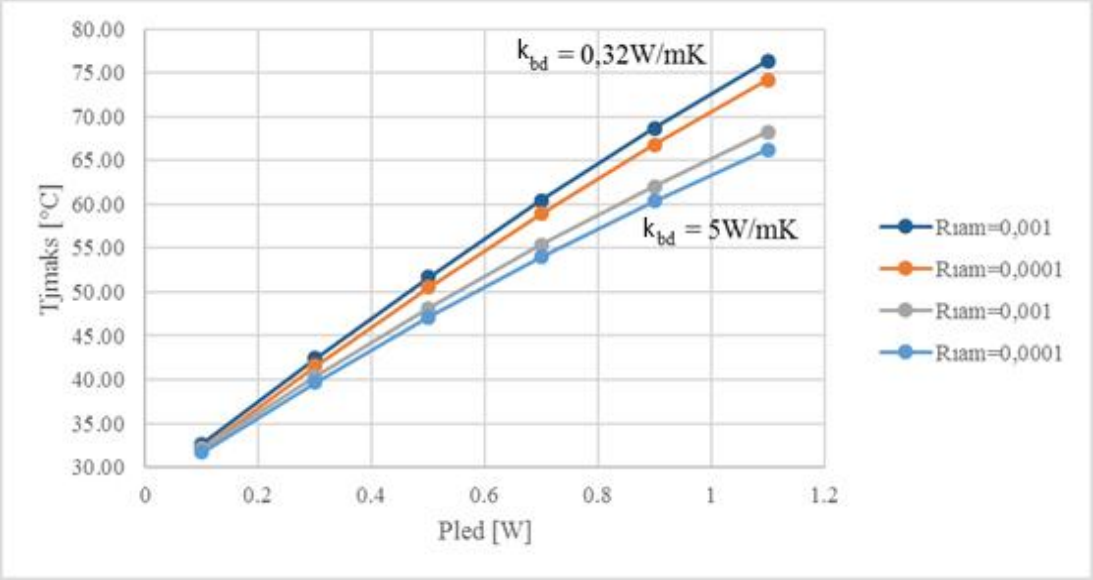
P_{led} [W]	Kanat	T_{jmaks} [°C]	Fark [°C]
0,1	Var	31,17	
0,1	Yok	32,31	1,14
0,6	Var	50,90	
0,6	Yok	56,25	5,35
1,1	Var	66,46	
1,1	Yok	77,10	10,64

Çizelge 5.13'ten görüldüğü gibi düşük ısıl güçlerde gövde geometrisinin yaratacağı sıcaklık farkı da düşük olmaktadır. Düşük LED ısıl güçleri için kanat kullanımı çok büyük fark yaratmaz iken, yüksek güçlerde fark çok daha yüksektir. Özellikle yüksek ısıl güçlü LED'lerin kullanıldığı tasarımlarda ısı transfer alanını arttırmak ve ortam havasına ısıyı daha iyi iletmek için uygun kanat, ya da değişik yapıda soğutucu tasarımları araştırılmalıdır. Uygun soğutucularla entegre yapıda üretilecek gövde, üretim tekniklerine uygun olarak tasarlanmalı ve ısıl analizleri tamamlanmalıdır.

5.3.3.6 Isıl arabirim malzemesi ($R_{ıam}$)

Hem ısıl arabirim malzemesinin hem de karesinin modelde etkisi olmasına rağmen ısıl arabirim malzemesi, etkili temel faktörler arasında tek başına en az etkiye sahip olan faktördür. Diğer yandan LED çip ısıl gücü ile olan etkileşimi ANOVA tablosunda göze çarpmaktadır. BD kartı ve bağlandığı malzeme arasında ısıl ve mekanik olarak bağ oluşturan ısıl arabirim malzemeleri, LED jonksiyon sıcaklıklarını etkilemektedir. Özellikle LED ısıl güçleri yükseldikçe ısıl arabirim malzemelerinin oluşturduğu darboğaz artmakta ve daha performanslı ısıl arabirim malzemelerine ihtiyaç duyulmaktadır [87]. Şekil 5.20'de farklı BD kartı türleri ve LED çip ısıl güçleri için

25 °C ortam sıcaklığındaki jonksiyon sıcaklığı değişim grafiği verilmiştir. Bu incelemede alüminyum gövde (k=140 W/mK) kullanılmıştır.



Şekil 5.20 : 25 °C ortam sıcaklığı için LED çip ısıl gücü, BD kartı türü ve ısıl iletim malzemesinin maksimum jonksiyon sıcaklığı üzerindeki etkisi ($k_{gövde}$=140 W/mK için).

Şekil 5.20'den görüldüğü üzere, LED çip ısıl gücü arttıkça grafikler arasındaki makas açılmakta ve maksimum jonksiyon sıcaklıklıkları arasındaki fark artmaktadır. Isıl arabirim malzemesinin karesinin etkisi de grafiklerin eğri şeklinde olmasıyla kendini göstermektedir. Grafikteki değerler Çizelge 5.14'te sayısal olarak verilmiş ve aralarındaki farklar hesaplanmıştır.

Çizelge 5.14 : Isıl arabirim malzemesinin farklı LED ısıl güçleri için etkisi.

P_{led}	$R_{ıam}$	Fark
0,1	0,0010	
0,1	0,0001	-0,4
0,6	0,0010	
0,6	0,0001	-1,2
1,1	0,0010	
1,1	0,0001	-2,0

Çizelge 5.14'ten görüldüğü gibi, özellikle LED çip ısıl gücü arttıkça ısıl arabirim malzemesinin etkisi de artmaktadır. Yüksek LED ısıl güçlerinde armatürün performansının malzeme bağımlılığı daha da artmaktadır. Jonksiyon sıcaklıklarını istenilen seviyelerde tutmak için özellikle malzeme seçiminde ısının ortama aktarılması amacıyla darboğaz yaratmayacak malzemelerin seçilmesi önemlidir.

Düşük güçlerde malzemeye bağımlılık daha az olurken, LED çip ısıl güçleri yükseldikçe malzemelerin performansının da artması gerekmektedir.

5.4 Faktörlerin Armatür Fotometrik Performansına Etkisi

Bu bölümde kurulan matematiksel model kullanılarak örnek armatür üzerinde, faktörlerin armatür performansı üzerine etkisi, fotometrik büyüklükler kullanılarak değerlendirilmiştir.

5.4.1 Örnek armatürün analizi

LED armatüre etki eden faktörler incelendiğinde, LED çip ısıl gücünün (P_{led}) en etkili faktör olduğu söylenebilir. Özellikle Çizelge 5.7'deki ANOVA tablosundaki ikili etkileşimler incelendiğinde, hemen hemen tüm parametrelerin LED ısıl gücü ile etkileşimde bulunduğu görülmektedir. Farklı armatür gücü senaryoları tasarlayıp faktör etkilerinin, güç senaryolarına göre pratik bir şekilde kullanılabilmesi için örnek oluşturmak amacı ile yol aydınlatması armatürlerinde kullanılabilen CREE firmasının 4000 K renk sıcaklıklı XP G2 kodlu yüksek verimli LED çipi seçilmiştir [88]. LED çipi performans karakteristiklerinin belirlenmesi için İTÜ Enerji Enstitüsü, Enerji Verimliliği ve Aydınlatma Tekniği Laboratuvarında ölçülen ve hesaplanan değerler ile CREE firmasına ait web tabanlı ürün karakterizasyon aracı kullanılmıştır [15]. Farklı faktör seviyeleri için Denklem 5.4'te verilen regresyon modelinden elde edilen maksimum jonksiyon sıcaklığı formülleri, CREE firmasına ait ürün karakterizasyon aracında kullanılarak armatür konfigürasyonları (nominal güç - yüksek güç) oluşturulmuş ve elektriksel-ısıl-optik karakteristik özellikleri hesaplanmıştır. Senaryolar oluşturulurken, LED çip ısıl güç seviyeleri 0,6 W ve 1,1 W olarak seçilmiş, alüminyum gövde ($k_{gövde}$=140 W/mK), metal çekirdekli baskı devre kartı (k_{bd}=5 W/mK), yüksek performanslı ısıl arabirim malzemesi ($R_{ıam}$=0,0001 m^2K/W) kullanılarak senaryolara karşılık gelen maksimum jonksiyon sıcaklıkları, kurulan regresyon modeli ile hesaplanarak Çizelge 5.15'te verilmiştir. Ortam sıcaklığı 25 °C olarak alınmıştır. Armatür toplam gücü belirlenirken, LED sürücü elektriksel verimi %90, armatür optik verimi %80 kabul edilmiştir.

Çizelge 5.15 : LED ısıl güçlerine karşılık gelen elektriksel güçler ve armatür güç konfigürasyonları.

Armatür Gücü Senaryosu	LED çip Sayısı	LED Isıl Gücü – P_{led} [W]	LED Elektriksel Gücü [W]	LED Çip Işık Akısı [lm]	Sürme Akımı [A]	Armatür Toplam Gücü [W]	Armatür Işık Akısı [lm]	Armatür Etkinlik Faktörü [lm/W]
Nominal Güç (NG)	72	0,6	1,08	176,5	0,370	86,4	10166,4	117,7
Yüksek Güç (YG)	72	1,1	1,9	281,1	0,630	152	16191,4	106,5

Öncül konfigürasyonlar oluşturulduktan sonra, bu üç senaryodaki faktör seviyelerinin değişiminin armatür performansına etkisini belirlemek için, farklı güç kademelerindeki faktör seviye değişimlerinin maksimum jonksiyon sıcaklığına etkileri araştırılmıştır. Ortam sıcaklığı standart olarak 25 °C alınmıştır. Önemsiz, az önemli, önemli ve çok önemli olmak üzere dört adet değerlendirme kriteri belirlenmiştir. Jonksiyon sıcaklığındaki 0 °C -1 °C arasındaki değişimler önemsiz, 1 °C -2 °C arası değişimler az önemli, 2 °C -4 °C arası değişimler önemli ve 4 °C'den daha yüksek sıcaklık değişimleri çok önemli olarak değerlendirilmiştir. Yapılan analizlerin sonuçları Çizelge 5.16'da verilmiştir.

Çizelge 5.16 : Farklı güç senaryoları için faktörlerin etkileri (25 °C ortam sıcaklığı için).

Armatür Gücü Senaryosu	K_{govde}	K_{bd}	$R_{ıam}$	Gövde Geometrisi (kanatlı/kanatsız geometri)
Nominal Güç (NG)	Az Önemli	Az Önemli	Az Önemli	Çok Önemli
Yüksek Güç (YG)	Önemli	Önemli	Az Önemli	Çok Önemli

Oluşturulan regresyon modeli ve yapılan ilave simülasyonlar ile yüksek güçlü LED armatür tasarımına etki edebilecek faktörler incelenmiş ve etkileri araştırılmıştır. Buradan LED ışık kaynaklı armatür tasarlanırken, tasarım hedeflerine göre kullanılacak LED çiplerinin sürme akımı seçilmeli ve ısıl güçleri ölçüm yolu ile belirlenerek armatür mekanik yapısını oluşturan diğer elemanlar ile birlikte uygun ısıl özellikteki malzemeler seçilmeli sonucuna ulaşılmıştır.

Bir sonraki bölümde faktörlerin fotometrik performansa olan etkileri incelenecektir.

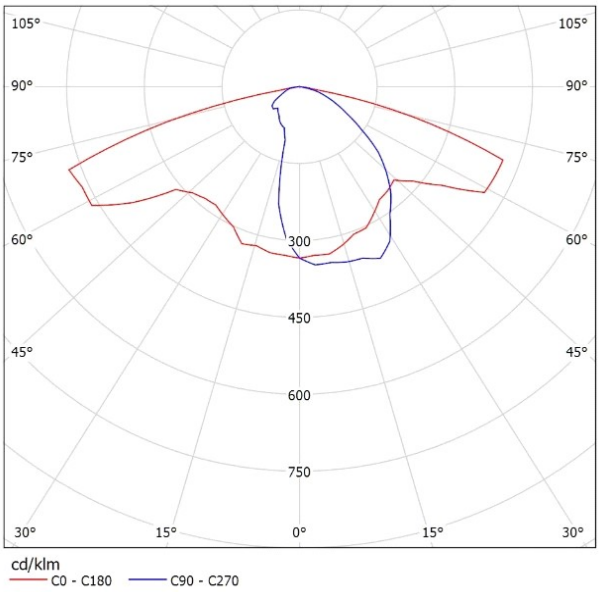
5.4.2 Farklı güç senaryolarında örnek armatürün yol aydınlatması standartlarına uygunluğu

Bu bölümde, bir önceki bölümde oluşturulan üç farklı güç senaryosu için göz önüne alınan faktörlerin değişiminin armatürün fotometrik performansına etkileri incelenmiştir. Aydınlatma tasarımlarını etkileyen en önemli kriter armatür ışık akısı ve armatür etkinlik faktörü olduğu için buradaki değerlendirmelerde bu kriterlerin analizi gerçekleştirilmiştir. Fotometrik hesaplar yapılırken Çizelge 5.15'de verilen nominal güç ve yüksek güç konfigürasyonları için armatür toplam gücü, armatür ışık akısı ve armatür etkinlik faktörü değerleri kullanılmıştır. Bu değerlere göre gerçekleştirilen aydınlatma tasarım hesaplarında bu örnek için seçilen LED çipi ile armatürün NG senaryosunda M3 aydınlatma sınıfı ve YG senaryosunda ise M2 aydınlatma sınıfı bir yol için gerekli aydınlatma kalite büyüklüklerini sağladığı Çizelge 5.18'de gösterilmektedir. Farklı senaryolar için elde edilebilecek yol aydınlatması kalite büyüklükleri TS EN 13201-2 "Yol Aydınlatması - Bölüm 2: Performans Özellikleri" esas alınarak, Dialux aydınlatma tasarımı programı ile hesaplanmıştır [89]. İki şeritli ve 3,5 m şerit genişlikli örnek bir yol için yapılan hesaplamalarda kabul edilen tesisat geometrisi ve armatürün ışık dağılım eğrisi Çizelge 5.17 ve Şekil 5.21'de gösterilmektedir.

Çizelge 5.17 : Farklı güç senaryoları için tesisat geometrisi.

Armatür Gücü Senaryosu	Armatür Işık Akısı [lm]	Aydınlatma Sınıfı	Direkler Arası Açıklık	Direk Yüksekliği	Konsol Boyu	Aydınlatma Düzeneği
Nominal Güç (OG)	10166,4	M3	38 m	9 m	0 m	Soldan tek taraflı
Yüksek Güç (YG)	16191,4	M2	38 m	10 m	0 m	Soldan tek taraflı

Farklı güç senaryoları için hesaplanan aydınlatma kalite büyüklükleri ile standardın istediği değerler Çizelge 5.18'de verilmiştir. Ortalama parıltı, ortalama düzgünlük, boyuna düzgünlük ve çevreleme oranı standartta verilen değerlerden eşit veya yüksek, bağıl eşik artışı değeri ise eşit veya düşük olmalıdır.



Şekil 5.21 : Hesaplamalarda kullanılan armatürün ışık şiddeti dağılım eğrisi.

Çizelge 5.18 : Farklı güç senaryoları için aydınlatma kalite büyüklükleri.

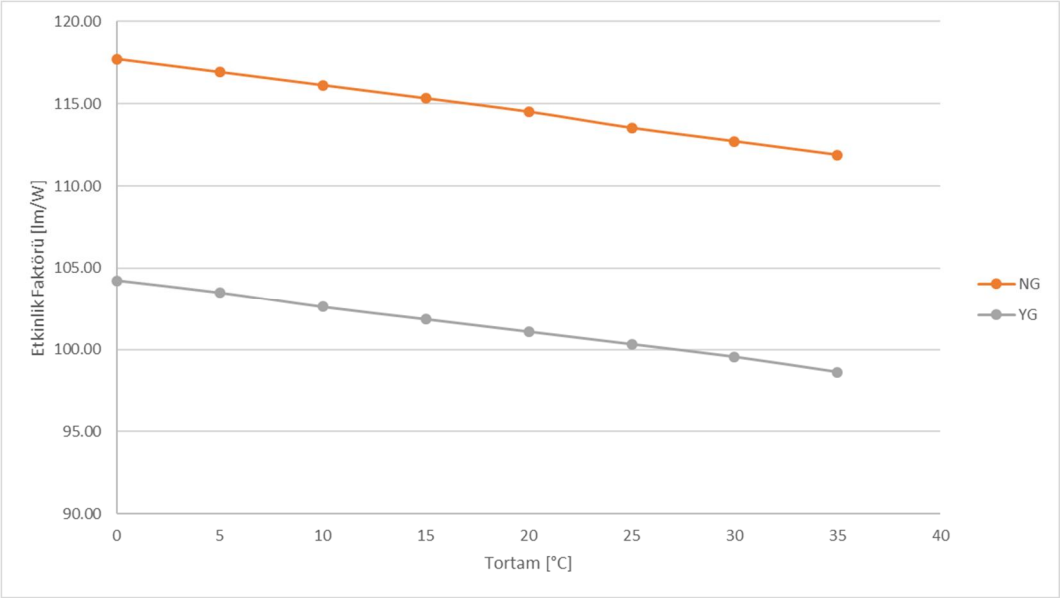
Armatür Gücü Senaryosu	Aydınlatma Sınıfı		Ortalama Parıltı [cd/m^2]	Ortalama Düzgünlük	Boyuna Düzgünlük	Bağıl Eşik Artışı [%]	Çevreleme Oranı
Nominal Güç (OG)	M3	Hesap	1,01	0,43	0,61	13	0,62
		Standart	1,00	0,40	0,50	15	0,50
Yüksek Güç (YG)	M2	Hesap	1,52	0,50	0,73	10	0,66
		Standart	1,50	0,40	0,70	10	0,50

5.4.3 Örnek armatür için faktör analizi

Bu bölümde iki farklı armatür gücü senaryosu (NG-YG) için, farklı faktör seviye kombinasyonları ile armatür ışık akısı ve etkinlik faktörleri hesaplanmıştır.

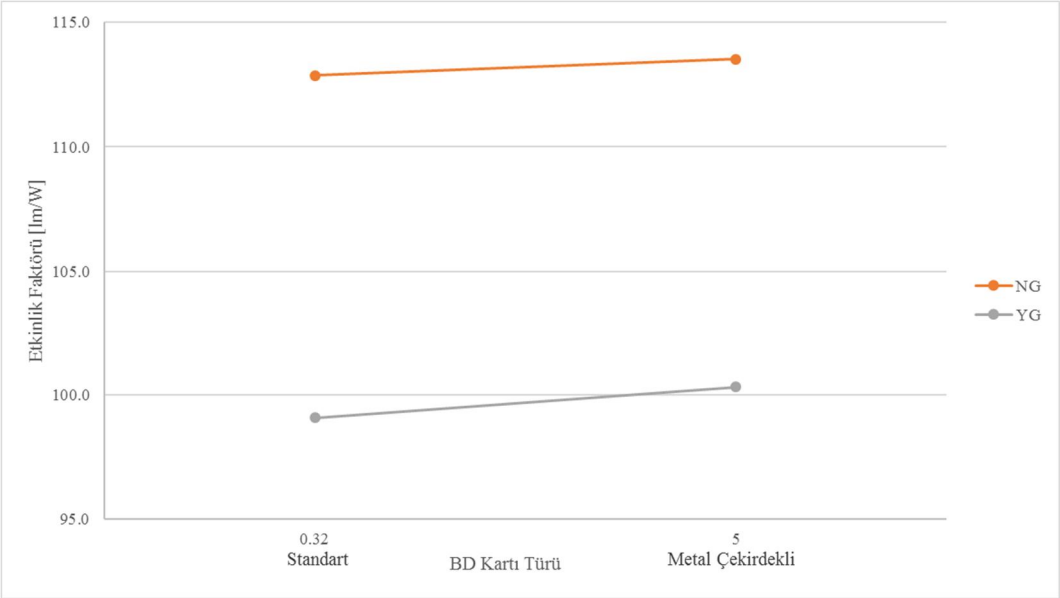
Farklı ortam sıcaklıkları ve LED çip ısıl güç konfigürasyonları için, armatür etkinlik faktörünün değişim grafiği Şekil 5.22'de verilmiştir. Simülasyonlarda armatür gövdesinin alüminyum (k=140 W/mK), BD kartının metal çekirdekli (k=5 W/mK) ve ısıl arabirim malzemesinin düşük ısıl dirence (R=0,0001 m^{2}K/W) sahip olduğu kabul edilmiştir.

Farklı güç senaryolarında LED çip ısıl güçleri değişmektedir. Daha önceki analizlerde de belirtildiği gibi, LED çip ve armatür performansını belirleyen en önemli iki faktör olan LED çip ısıl gücü ve ortam sıcaklığı değiştikçe armatürün etkinlik faktörü değişmektedir. Grafik incelendiğinde, güç senaryolarının hepsinde armatürün etkinlik faktörü değerinin ortam sıcaklığı ile azaldığı görülmektedir.



Şekil 5.22 : Farklı güç senaryolarının ortam sıcaklığına bağlı etkinlik faktörü değişimleri ($k_{gövde}$=140 W/mK, k_{bd}=5 W/mK, $R_{ıam}$ = 0,0001 m^2K/W için).

BD kartı türü etkisinin incelenebilmesi amacıyla, 25 °C ortam sıcaklığında, farklı güç senaryolarındaki etkinlik faktörü değerleri alüminyum gövde (k=140 W/mK) ve yüksek performanslı ısıl arabirim malzemesi (R=0,0001 m^2K/W) için Şekil 5.23'te verilmiştir. Nominal güç senaryosunda BD kartı türünün önemi düşükken, özellikle yüksek güç senaryosunda daha önemli hale gelmektedir.



Şekil 5.23 : Armatür etkinlik faktörünün, farklı güç senaryolarına göre BD kartı türü ile değişimi ($k_{gövde}$=140 W/mK, $R_{ıam}$ = 0,0001 m^2K/W, T_{ort}=25 °C için).

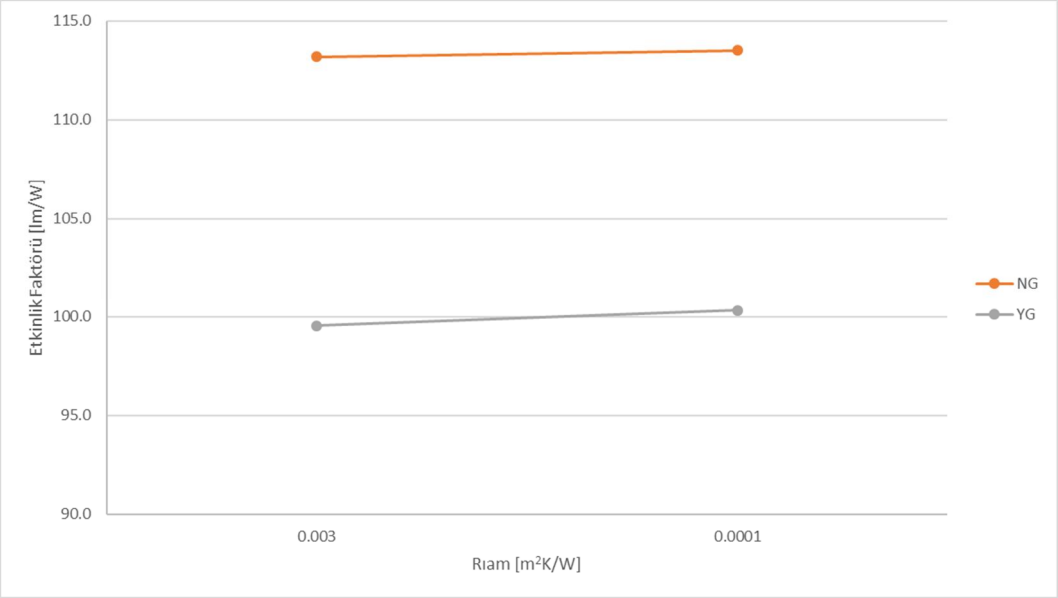
Sonuçlar Çizelge 5.19'da sayısal olarak da gösterilmiştir. Çizelge 5.19'dan BD kartı türünün armatür ışık akısı ve etkinlik faktörü üzerinde nominal LED ısıl güçlerinde

düşük, yüksek LED ısıl güçlerinde ise daha yüksek etkisi olduğu görülmektedir. Diğer yandan Çizelge 5.15'den görüldüğü gibi etkinlik faktörü LED ısıl gücünün artmasıyla, metal çekirdekli BD kartı için 117,7 lm/W seviyelerinden 106,5 lm/W seviyelerine düşmüştür.

Çizelge 5.19 : Farklı LED güç senaryoları için farklı BD kartları kullanılarak hesaplanan fotometrik değerler.

P_{led} [W]	Sürme Akımı [A]	BD Kartı Türü	Armatür Işık Akısı [lm]	Fark [lm]	Armatür Etkinlik Faktörü [lm/W]	Fark [lm/W]
0,6	0,370	Standart	9565,1		112,9	
0,6	0,370	Metal	9645,1	80	113,5	0,6
1,1	0,630	Standart	14626,9		99,1	
1,1	0,630	Metal	14881,5	261,6	100,3	1,2

Isıl arabirim malzemesinin farklı seviyelerinin fotometrik performansa etkilerinin araştırılması amacıyla da, 25 °C ortam sıcaklığında, alüminyum gövde (k=140 W/mK) ve metal çekirdekli BD kartı (k=5 W/mK) kullanılarak iki farklı LED güç senaryosu için etkinlik faktörünün değişimi Şekil 5.24'te verilmiştir. Grafikteki değerler Çizelge 5.20'de sayısal olarak da gösterilmiştir.



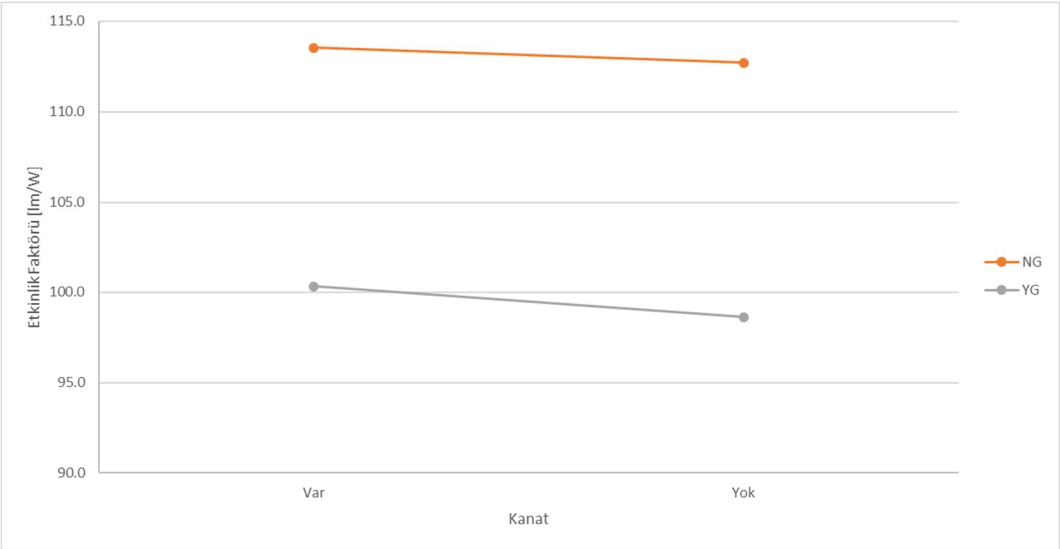
Şekil 5.24 : Armatür etkinlik faktörünün, farklı güç senaryonlarına göre ısıl arabirim malzemesi ile değişimi ($k_{gövde}$=140 W/mK, K_{bd} = 5 W/mK, T_{ort}=25 °C için).

Çizelge 5.20 : Farklı LED güç senaryoları için farklı ısıl arabirim malzemeleri kullanılarak hesaplanan fotometrik değerler.

P_{led} [W]	Sürme Akımı [A]	$R_{ıam}$ [W/m^{2}K]	Armatür Işık Akısı [lm]	Fark [lm]	Armatür Etkinlik Faktörü [lm/W]	Fark [lm/W]
0,6	0,370	0,0030	9605,4		113,2	
0,6	0,370	0,0001	9645,1	39,7	113,5	0,3
1,1	0,630	0,0030	14722,6		99,5	
1,1	0,630	0,0001	14881,5	158,9	100,3	0,8

Isıl arabirim malzemesinin daha yüksek ısıl dirence sahip olması armatür etkinlik faktörü değerlerini bir miktar aşağı düşürmüş olmasına rağmen etki değeri azdır. Yüksek güçlerde bu etki biraz daha belirgin olarak gözlenebilmektedir. Hesaplamalardan BD kartı türü ve ısıl arabirim malzemesi LED ısıl gücünün düşük seviyelerinde daha az etkili iken, gücün artmasıyla etkisinin arttığı görülmektedir. Regresyon hesaplarından elde edilen LED çip ısıl gücü (P_{led}) ile BD kartı (k_{bd}) ve ısıl arabirim malzemesi ($R_{ıam}$) etkileşimleri de bunu doğrulamaktadır.

Regresyon analizine ek olarak yapılan çalışmalarla iki farklı LED ısıl gücü senaryosuna göre aynı boyut ve malzeme yapısındaki düz ve kanatlı gövde durumlarındaki maksimum jonksiyon sıcaklık farkları belirlenmiştir. Kanatların fotometrik performansa etkisini araştırmak amacıyla, 25 °C ortam sıcaklığında, alüminyum gövde (k=140 W/mK), metal çekirdekli BD kartı (k=5 W/mK) ve yüksek performanslı ısıl arabirim malzemesi kullanılarak (R=0,0001 m^{2}K/W) yapılan ek simülasyon sonuçlarına göre de Şekil 5.25'te çizilmiştir.



Şekil 5.25 : Armatür etkinlik faktörünün, kanatlı/kanatsız gövde için farklı güç senaryolarına göre değişimi ($k_{gövde}$=140 W/mK, K_{bd} = 5 W/mK, $R_{ıam}$=0,0001 m^{2}K/W, T_{ort}=25 °C için).

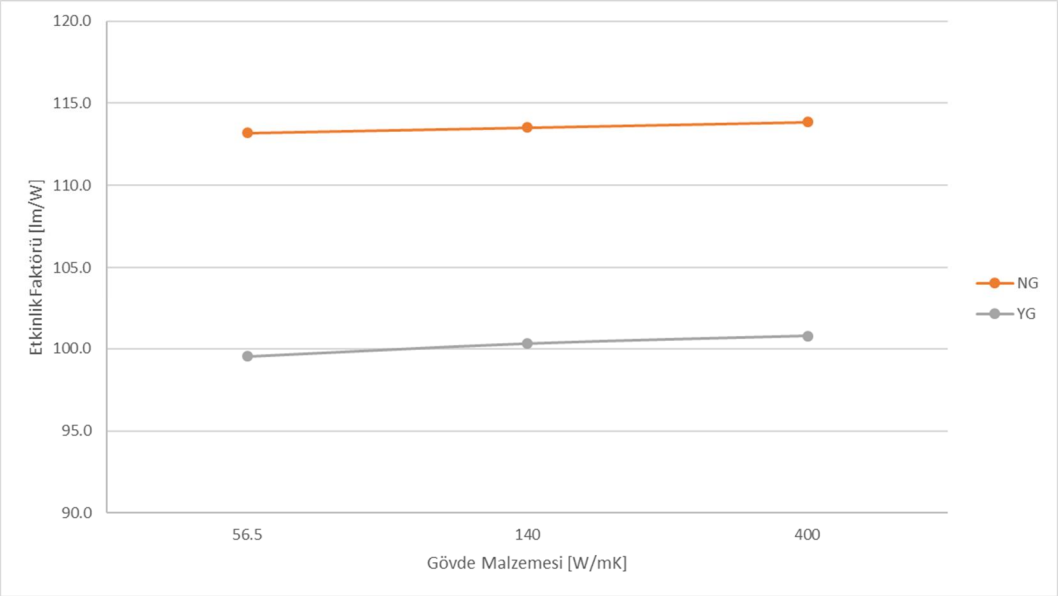
Özellikle yüksek ısıl güçlerde kanatlı gövdenin daha önemli farklar yarattığı görülmektedir. Üç farklı LED gücünde, kanatlı ve kanatsız gövdeler için hesaplanmış fotometrik değerler Çizelge 5.21'de verilmiştir.

Çizelge 5.21 : Farklı LED güç senaryoları için gövde geometrisinin değişimi ile hesaplanan fotometrik değerler.

Pled [W]	Sürme Akımı [A]	Kanat	Armatür Işık Akısı [lm]	Fark [lm]	Armatür Etkinlik Faktörü [lm/W]	Fark [lm/W]
0,6	0,370	Var	9645,1		113,5	
0,6	0,370	Yok	9545,5	99,6	112,7	0,8
1,1	0,630	Var	14881,5		100,3	
1,1	0,630	Yok	14531,3	350,2	98,6	1,7

Farklı güç konfigürasyonları için, 25 °C ortam sıcaklığında, yüksek performanslı ısıl arabirim malzemesi (R=0,0001 m^2K/W) kullanılarak, farklı gövde malzemeleri için elde edilmiş etkinlik faktörü değerleri de Şekil 5.25'te gösterilmiştir. Grafikteki değerler farklar da hesaplanarak Çizelge 5.22'de verilmiştir.

Daha önceki analizlerde de görüldüğü gibi, düşük ısıl güçte gövde malzemesi çok fark oluşturmazken, yüksek ısıl güçte daha etkin olabilmektedir.



Şekil 5.26 : Armatür etkinlik faktörünün, farklı gövde malzemeleri için farklı güç senaryolarına göre değişimi (k_{bd} = 5 W/mK, $R_{ıam}$=0,0001 m^2K/W, T_{ort}=25 °C için).

Çizelge 5.22 : Farklı gövde malzemeleri için armatür ışık akısı ve armatür etkinlik faktörü değerleri.

P_{led} [W]	Sürme Akımı [A]	$K_{gövde}$ [W/mK]	Armatür Işık Akısı [lm]	Fark [lm]	Armatür Etkinlik Faktörü [lm/W]	Fark [lm/W]
0,6	0,370	56,5	9605,4	-	113,2	-
0,6	0,370	140	9645,1	39,7	113,5	0,3
0,6	0,370	400	9685,4	80	113,9	0,7
1,1	0,630	56,5	14722,6	-	99,5	-
1,1	0,630	140	14881,5	158,9	100,3	0,7
1,1	0,630	400	14977,2	254,6	100,8	1,3

Farklı güç senaryoları için verilmiş olan faktör seviyelerinin armatür ışık akısına ve armatür etkinlik faktörüne etkileri sayısal olarak Çizelge 5.23'de tekrar toplu olarak gösterilmiştir.

Çizelge 5.23 : Farklı güç senaryoları için armatür ışık akısı ve etkinlik faktörü üzerine faktör seviyesi etkileri (T_{ort} = 25°C).

Armatür Gücü Senaryosu	K_{govde}	K_{bd}	$R_{ıam}$	Gövde Geometrisi (kanatlı/kanatsız geometri)	Toplam
(NG)	40 lm 0,4 lm/W	80 lm 0,6 lm/W	40 lm 0,3 lm/W	100 lm 0,8 lm/W	260 lm 2,1 lm/W
(YG)	95 lm 0,5 lm/W	262 lm 1,2 lm/W	159 lm 0,8 lm/W	350 lm 1,7 lm/W	866 lm 4,2 lm/W

Faktör etkilerinin en yüksek olduğu YG konfigürasyonunda, bakır gövde, metal çekirdekli BD kartı, yüksek performanslı ısıl arabirim malzemesi ve kanatlı gövde geometrisi kullanıldığında; alüminyum gövde, standart BD kartı, düşük performanslı ısıl arabirim malzemesi ve kanatsız gövde geometrisine göre ışık akısında 866 lümen, etkinlik faktöründe ise 4,2 lm/W artış olduğu Çizelge 5.23'ten görülmektedir. Bir sonraki bölümde analiz sonuçları yorumlanmıştır.

5.5 İstatistiksel Analiz Sonuçlarının Değerlendirilmesi

İlk olarak LED ışık kaynaklı armatür tasarımını etkileyecek ve LED çip jonksiyon sıcaklığını değiştirebilecek beş temel faktör iki seviyeli olarak ve seviyelerin merkez noktaları da eklenerek tam faktöriyel öncül bir deney tasarımı oluşturulmuş, ısıl simülasyonları gerçekleştirilmiş, faktöriyel ve regresyon analizleri yapılarak armatür performansı ışık akısı ve etkinlik faktörü açısından irdelenmiş ve matematiksel model oluşturulmuştur. Yapılan analizlerin sonucunda, gözönüne alınan faktörlerin özellikle

LED çip ısıl güç faktörü ile etkileşimlerinin LED çip maksimum jonksiyon sıcaklığını etkilediği istatistiksel olarak belirli bir hata payı ile gösterilmiştir. Ek bir çalışma olarak gövde geometrisi ve malzemesinin daha ayrıntılı incelenebilmesi için ilave simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.

Öncül faktöriyel analiz incelendiğinde, gerçekleştirilen 33 simülasyon için ele alınan bütün parametrelerin jonksiyon sıcaklığına etkisi olduğu görülmüştür. LED çip ısıl gücü en etkili parametre olarak bulunmuştur. Faktör etkileşimleri incelendiğinde faktör etkilerinin artan LED ısıl gücü ile arttığı belirlenmiştir. Kurulan modelin R^2 ve ayarlanmış R^2 değerleri sırasıyla %99,99 ve %99,97 olarak hesaplanmıştır. Tasarıma bir merkez noktası eklenerek kullanılan faktörlerin yüksek seviyelerinin etkisi araştırılmış ve istatistiksel olarak yüksek seviyeli terimlerin etkisi olduğu görülmüştür. Tez çalışması süresince gerçekleştirilen simülasyon sayılarının çok arttığı da dikkate alınarak, yapılan bütün simülasyon sonuçları ile çok değişkenli regresyon analizi yapılmasına karar verilmiştir. Regresyon modeli oluşturulurken, deney tasarımında kullanılan parametrelerin daha yüksek seviyeli terimleri ve daha geniş aralıklar kullanılarak, öncül deney tasarımında ortaya çıkan eğrilik de hesaba katılmıştır. Öncül analizden farklı olarak denenen bir çok farklı seviye de regresyon analizine eklenmiştir. Öncül faktöriyel simülasyon sonuçlarını da içeren 133 sonuç ele alındığında, ortam sıcaklığının en yüksek kareler toplamına sahip olduğu, dolayısıyla sadece temel etkiler ele alındığında en etkili faktör olarak değerlendirilebileceği Çizelge 5.7'de verilen ANOVA tablosundan görülmektedir. İkinci önemli temel etki LED çip ısıl gücü, daha sonra sırasıyla ısıl arabirim malzemesi türü ve baskı devre kartı türü olarak hesaplanmıştır. Gövde malzemesinin değişiminin temel olarak etkisi gözükmese de, özellikle LED çip ısıl gücü ile ikili etkileşimi, etkili bir faktör olarak bulunmuştur. Yüksek LED güçlerinde gövde malzemesi önem kazanmaktadır. LED armatür sistemi bütünsel olarak incelendiğinde, LED çipten yayılan ısı öncelikle armatür gövdesine, daha sonra da ortam havasına transfer olmaktadır. Isı transferi mekanizmaları göz önüne alındığında, armatür gövdesinden havaya olan ısı transferi, armatür malzemesine bağlı değildir. Ortam havası ile gövde arasındaki sıcaklık farkına ve ısı taşınım katsayısına bağlıdır. Bu sebeple, iletkenliği yüksek armatür malzemesi, ısının armatür içinde hareketinde fayda sağlarken, ortama olan ısı geçişinde çok fazla fark yaratmamaktadır. LED çip ısıl gücü arttıkça açığa çıkan ısı miktarı artacağı için, ısının armatür gövdesi içindeki transfer hızı önem kazanacak ve LED çiplerindeki ısı

birikimini azaltacaktır. Bu yüzden yüksek LED güçlerinde, gövde malzemesinin ısı iletim katsayısı önem kazanmaktadır.

Ortam sıcaklığı, 0-50 °C aralığında farklı derecelerde incelenmiştir. Ortam sıcaklığındaki artışın, maksimum LED çip jonksiyon sıcaklığını lineere yakın bir şekilde değiştirdiği görülmüştür. Buna göre ortam sıcaklığındaki 1°C'lik artışın, maksimum LED çip jonksiyon sıcaklığını da eşit miktarda arttırdığı söylenebilir. Çizelge 5.8'de gösterildiği gibi, LED çip ısıl gücünün farklı seviyelerinde bu fark çok fazla değişmemektedir. LED çip ısıl gücü göz önüne alındığında hem temel hem de ikili etkiler ile, faktörün yüksek seviyelerinin etkisinin yüksek olduğu söylenebilir. Baskı devre kartı türünün etkisi incelendiğinde, 0,1 W LED çip ısıl güç seviyesinde, standart veya yüksek performanslı BD kartı kullanmanın maksimum jonksiyon sıcaklığında 0,35 °C bir fark oluşturduğu, 1,1 W LED çip ısıl güç seviyesinde bu farkın yaklaşık 8 °C olduğu simülasyon sonuçlarından görülmektedir. Şekil 5.16'dan görüldüğü gibi, LED çip ısıl gücü arttıkça, LED'lerde üretilen ısının gövdeye iletimi sırasında BD kartı türü darboğaz yaratmaktadır. Gövde malzemesinin etkisi incelenerek, 0,1 W LED çip ısıl gücü için gövde malzemesi farkının yarım derece, 1,1 W için ise bu farkın 3,5 °C olduğu Çizelge 5.11'te verilmiştir. Şekil 5.18'den de görüldüğü gibi, LED çip ısıl gücü arttıkça, faktör etkileri de artmaktadır. Gövde malzeme etkisinin daha iyi incelenebilmesi için ilave simülasyonlar yapılarak ısı iletim katsayısı 56,5 W/mK olan bir alüminyum/tunç alaşımı kullanılmış ve bunun alüminyum gövde ile farkı araştırılmıştır. Düşük güçte (0,1 W) sıcaklık farkı Çizelge 5.12'de verildiği üzere 0,6 °C, yüksek güçte (1,1 W) ise 4,4 °C olarak hesaplanmıştır. Daha sonra gövde geometrisi değiştirilerek kanatlı ve kanatsız gövde tiplerinin maksimum jonksiyon sıcaklığına etkileri ilave simülasyonlar ile belirlenmiştir. Göz önüne alınan armatür için kanat geometrisi, Çizelge 5.13'ten görüldüğü gibi düşük güçte (0,1 W) 1,14 °C fark yaratırken, yüksek güçte (1,1 W) 10,64 °C fark olmuştur. Bu da özellikle yüksek LED çip ısıl güçlerinde, havaya olan taşınım ile ısı transferini, ısı transfer yüzeyini arttırarak optimize etmek gerektiğini göstermektedir. Isıl arabirim malzemeleri incelendiğinde, faktörün etkisi diğer faktörlerde olduğu gibi yüksek LED çip ısıl güçlerinde artmaktadır. Şekil 5.20 incelendiğinde, düşük LED çip ısıl güçleri için, hem BD kartı türünün hem de ısıl arabirim malzemesinin etkisi birbirine yakın ve yaklaşık yarım derecedir. LED çip ısıl gücü yükseldikçe hem BD kartı türünün hem de ısıl arabirim malzemesi türünün etkisi artmaktadır. Çizelge 5.10 ve Çizelge 5.14

incelendiğinde standart BD ve düşük performanslı ısıl arabirim malzemesi ile alüminyum çekirdekli ve yüksek performanslı ısıl arabirim malzemesi kullanımı arasındaki fark 10 °C'ye yakındır.

Faktörlerin armatür performansına etkisinin belirlenmesi için örnek bir yol aydınlatması armatürü ele alınarak armatür fotometrik performans hesapları gerçekleştirilmiştir. Bu amaçla nominal (0,6 W) ve yüksek (1,1 W) olmak üzere iki farklı LED ısıl güç armatür konfigürasyonu belirlenmiş ve bu konfigürasyonlar için ışık akısı, armatür etkinlik faktörü değerleri hesaplanmıştır. Senaryolar oluşturulurken alüminyum gövde, metal çekirdekli BD kartı ve yüksek performanslı ısıl arabirim malzemesi seçilmiş, ortam sıcaklığı 25 °C olarak kabul edilmiştir. LED çip ısıl güçlerine karşılık gelen sürme akımı değerleri laboratuvar ölçümleri ve CREE ürün karakterizasyon aracı yardımı ile belirlenmiştir. LED sürücü elektriksel verimi %90, armatür optik verimi %80 olarak kabul edilmiştir. Oluşturulan üç konfigürasyon için faktör seviyelerinin ve gövde geometrisi değişiminin armatür performansına etkisi araştırılmış, Çizelge 5.16 oluşturulmuştur. Buna göre gövde malzemesi ve BD kartı türü, NG senaryosunda az önemli, YG senaryosunda ise önemlidir. Isıl arabirim malzemesi az önemlidir. Gövde geometrisinin etkisi ise çok önemlidir. Bunun sebebi, LED çiplerinde üretilen ısının ortam havasına iletiminde darboğaz oluşturması ve daha büyük ısı transfer yüzeylerine ihtiyaç duyulmasıdır.

Optik analizlerin yapılabilmesi için iki farklı konfigürasyonun armatür ışık akısı değerleri hesaplanmış, üretilen prototip armatürün ışık şiddeti dağılım eğrisi laboratuvarda ölçülmüştür. Bu değerler Dialux programında veri olarak kullanılıp farklı yol sınıfları için iki şeritli bir yolda hesaplamalar yapılmış ve Çizelge 5.17 ve 5.18'den görüldüğü gibi NG konfigürasyonunun M3, YG konfigürasyonunun ise M2 aydınlatma sınıfı bir yolda kullanılabileceği gösterilmiştir. Faktör seviyelerinin, farklı armatür konfigürasyonlarının fotometrik performansına etkisinin araştırılabilmesi için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Ortam sıcaklığının etkisi daha önce anlatıldığı gibi doğrusaldır. Şekil 5.22'den görüldüğü gibi ortam sıcaklığı arttıkça armatür performansı düşmektedir. BD kartı türünün etkisi özellikle yüksek LED çip ısıl gücünde ortaya çıkmaktadır. Örneğin NG konfigürasyonunda BD kartı türünün ışık akısına etkisi 80 lümen olarak hesaplanırken, YG konfigürasyonunda bu fark yaklaşık 260 lümendir (Çizelge 5.19). Isıl arabirim malzemesi için aynı hesaplar yapılmış ve NG-YG arası fark yaklaşık 120 lümen olarak hesaplanmıştır (Çizelge 5.20). Farklı

gövde malzemeleri için hesaplanan farklar Çizelge 5.22'den görüldüğü gibi 255 lümene kadar çıkabilmektedir. Kanat yapısının armatür performansına etkisi ise Çizelge 5.21'den görüldüğü gibi 350 lümen olmuştur. Bütün faktör seviyeleri için hesaplanan farklar Çizelge 5.23'te toplu olarak gösterilmiştir.

6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Son yıllarda aydınlatma tesisatlarında yürütülen enerji verimliliği çalışmaları kolay uygulanabilir olmaları ve yatırımın geri dönüş sürelerinin nispeten kısa olması nedeniyle oldukça cazip hale gelmiştir. Bu çalışmalar, büyük enerji tasarruflarının sağlanabileceği iddia edilerek hükümetlerin enerji verimliliği stratejileri içinde de yer almaktadır. LED teknolojisinin kullanıldığı aydınlatma sistemleri, enerji verimliliği çalışmalarında tekil bir çözüm olarak tanıtılmakta ve aydınlatmanın gerçekleştirileceği ortamların koşulları ve LED dışında kullanılabilecek ışık kaynaklarının özellikleri dikkate alınmadan, genel bir ifade ile % 80'lere varan enerji tasarrufu sağlanacağı ileri sürülmektedir. Bu varsayımla, aydınlatma sektöründe büyük çaplı projelerde kullanım olanağı bulacağı düşünülerek LED'li aydınlatma armatürlerinin üretimi konusunda büyük bir artış gözlemlenmektedir. Diğer yandan mevcut şartnamelerin ve standartların yeni LED teknolojisine göre yeniden düzenlenmesi gereklidir. Bu düzenlemeler yapılana kadar, LED'li tesisatlar –diğer konvansiyonel tesisatların olduğu gibi- mevcut standart ve yönetmeliklerdeki koşulları sağlamak zorundadır.

LED ışık kaynakları daha önce keşfedilmiş olmalarına rağmen genel aydınlatmada ancak 1999 yılında beyaz ışığın eldesinde belirli bir verime ulaşıldıktan sonra kullanılmaya başlanmıştır. LED'lerin verim ölçümleri laboratuvar ortamında 25 °C sıcaklık değeri için kontrollü koşullarda yapılmaktadır. Gerçek çalışma koşulları altında ise LED'lerin performansının sıcaklığa bağlı olduğu birçok çalışma ile kanıtlanmıştır. Özellikle yüksek sıcaklıkta çalışan LED'lerin verimleri düşmekte, ışık akıları ve ömürleri azalmakta, renk özellikleri değişebilmektedir.

LED'li armatürlerde sıcaklık yönetimi en önemli tasarım problemidir. Tez kapsamında öncelikle sıcaklığın LED çip ve armatür performansına etkileri araştırılmış, piyasada ticari olarak bulunabilecek birçok LED örneği İTÜ Enerji Enstitüsü, Enerji Planlaması ve Yönetimi Ana Bilim Dalı bünyesinde bulunan Enerji Verimliliği ve Aydınlatma Tekniği laboratuvarındaki 1 metre çaplı Ulbricht Küresi ile ölçülerek, LED'lerin farklı sıcaklıklardaki özelliklerinin değişimi incelenmiştir. Ölçülen LED'lerin elektriksel güç [W], optik güç [W], ısıl güç [W], verim [%], ışık akısı [lm], etkinlik faktörü

[lm/W], renk sıcaklığı [K] ve renksel geriverim gibi özelliklerinin sıcaklıkla değişimleri incelenmiş ve bu kapsamda bir makale yayınlanmıştır [1]. Bu çalışmanın sonucunda özellikle yüksek güçlü LED armatür tasarımlarında, sıcaklık etkilerinin iyi araştırılması gerektiği anlaşılmıştır.

LED ışık kaynaklarının sıcaklık karşısındaki performansı araştırıldıktan sonra, LED çiplerinin bilgisayar simülasyonları kullanılarak ısıl olarak modellenmesi aşamasına geçilmiştir. Ticari bir hesaplamalı akışkanlar dinamiği (HAD) programı olan FloEFD, İTÜ Enerji Enstitüsü Enerji Planlaması ve Yönetimi Ana Bilim Dalı tarafından lisanslı olarak temin edilerek LED çipleri modellenmiştir. LED çiplerinin ısıl yönden doğru olarak modellenmesi için, elektronik elemanların ısıl analizlerinde kullanılan ve JEDEC tarafından geliştirilen 2-Direnç modeli LED çiplerine uyarlanmış, 2 adet örnek ticari armatür öncelikle 3 boyutlu olarak modellenerek geometrik yapıları oluşturulmuştur. Daha sonra bu armatürlerin üzerindeki LED çipler 2-Direnç modeli ile ısıl olarak modellenmiş, simülasyon sonuçları ile laboratuvar sonuçları karşılaştırılmıştır. Kullanılan iki armatürde laboratuvar ölçümleri ile simülasyon sonuçları arasındaki sıcaklık farkları sırasıyla, ortalama %3,25 ve %6,75 olarak hesaplanmıştır. Simülasyon sonucunda ulaşılan sıcaklık değerleri ile armatürlerin vereceği ışık akıları tahmin edilmiştir. Bu sonuçlar laboratuvar ölçümleri ile karşılaştırılmış, hesaplanan ve ölçülen armatür ışık akıları arasında sırasıyla %2 ve %4,2 fark bulunmuştur. Uyarlanan 2-Direnç modelinin tezin ileriki aşamalarında kullanımının uygun olduğuna karar verilmiş ve yapılan çalışmalardan bir uluslararası makale yayınlanmıştır [79].

Tezin son bölümünde LED armatür tasarımı üzerine etki edebilecek faktörlerin incelenmesi, örnek bir yol aydınlatması armatürü kullanılarak, istatistiksel deney tasarımı yöntemleri ile gerçekleştirilmiştir. İstatistiksel analiz için seçilen faktörler literatür araştırması ve daha önceki tecrübeler yardımı ile LED çip ısıl gücü, armatür gövde malzemesi, baskı devre tipi, ısıl arabirim malzemesi ve ortam sıcaklığı olarak seçilmiştir. Bu faktörlerin etkisinin araştırılabilmesi için öncelikle tam faktöriyel deney tasarımı yapılarak deney desenine bir merkez nokta eklenmiş ve öncül sonuçlara ulaşılmıştır. Minitab istatistiksel analiz yazılımı yardımı ile gerçekleştirilen öncül deney tasarımında sonuç değişkeni olarak maksimum LED jonksiyon sıcaklığı kullanılmıştır. İstatistiksel model incelendiğinde, ele alınan bütün parametrelerin jonksiyon sıcaklığına etkisi olduğu görülmüş, faktör etkilerinin LED ısıl gücü ile

arttığı da belirlenmiştir. Kurulan modelin R^2 ve ayarlanmış R^2 değerleri sırasıyla %99,99 ve %99,97 olarak hesaplanmıştır. Tasarıma eklenen merkez nokta yardımıyla faktörlerin yüksek seviyelerinin de etkisi olduğu görülmüştür.

Tez çalışması süresince gerçekleştirilen simülasyonların sayıca arttığı da dikkate alınarak, elde edilen tüm simülasyon sonuçları ile çok değişkenli regresyon analizi yapılmasına karar verilmiştir. Regresyon modeli oluşturulurken, deney tasarımındaki parametrelerin daha yüksek seviyeli terimleri ve daha geniş aralıklar kullanılarak, öncül deney tasarımında ortaya çıkan eğrilik de hesaba katılmıştır. Öncül analizden farklı olarak denenen bir çok seviye de regresyon analizine eklenmiştir. Ortam sıcaklıkları 0 °C - 50 °C arasında seçilmiştir. Ortam sıcaklığının azalması genel olarak LED ışık kaynaklarının jonksiyon sıcaklığını düşürdüğü için performans arttırıcı bir etki oluşturmaktadır. Bu sebeple düşük sıcaklıklar (sıfırın altında) kullanılmamıştır. LED ısıl güçleri, kullanılan örnek LED'lerin nominal ve maksimum sürme akımları ve piyasadaki güncel LED sürücüler dikkate alınarak 0,1 W - 1,1 W aralığında seçilmiştir. Gövde malzemesi alüminyum ve bakır olarak kullanılmıştır. Baskı devre kartı standart veya metal çekirdekli olarak analize dahil edilmiştir. Isıl arabirim malzemesi ısıl direnci de piyasada bulunabilecek malzemeler düşünülerek 0,001 m^2K/W - 0,0007 m^2K/W aralığında değiştirilmiştir. 133 adet simülasyon sonucu kullanılarak çok değişkenli regresyon analizi gerçekleştirilmiştir. Regresyon analizi sonucunda, öncül faktöriyel analiz sonuçlarına benzer olarak, jonksiyon sıcaklığına en çok etki eden temel parametrelerin ortam sıcaklığı ve LED çip ısıl gücü olduğu görülmüştür. Isıl arabirim ve baskı devre kartı türünün de LED jonksiyon sıcaklığı üzerine hem temel hem de LED ısıl gücü ile ikili etkileri olduğu gösterilmiştir. Bu durumda baskı devre kart teknolojisinde olası gelişmeler yüksek güçlü LED armatür tasarımlarına önemli üstünlükler sağlayabilecektir.

Yine sonuçlardan armatür gövdesi için yüksek ısıl iletkenliğe sahip iki farklı malzeme (alüminyum ve bakır) seçiminin, jonksiyon sıcaklığına tek başına etkili olamadığı söylenebilmektedir. Diğer yandan armatür gövdesi malzemesi ikili etkileşimlerde etkili olduğu için, yükselen LED çip ısıl gücü ile dolaylı olarak jonksiyon sıcaklığını etkileyebilecektir. Gövde malzemesinin etkisinin daha iyi anlaşılabilmesi için alüminyum alaşım ve bakırdan daha düşük ısıl iletkenliğe sahip bir malzeme seçilerek simülasyonlar tekrarlanmıştır. Düşük ısıl iletkenliğe sahip bir gövde malzemesinin düşük LED güçlerinde etkisi görülmezken, LED ısıl gücünün artışı ile gövde

malzemesinin etkisinin de arttığı gözlemlenmiştir. Gövde geometrisinin öneminin araştırılması için kanatsız bir gövde oluşturulup, ısıl simülasyonlar tekrarlanmıştır. Düşük güçlerde gövde geometrisinin yarattığı sıcaklık farkı az olurken, yüksek güçlerde fark artmıştır. Bu nedenle özellikle yüksek güçlü LED'lerin kullanıldığı tasarımlarda ısı transfer alanını arttırmak ve ortam havasına ısıyı daha iyi iletmek için uygun soğutucu tasarımları araştırılmalıdır. Diğer yandan armatür gövdesi hem mekanik mukavemet sağlaması hem de soğutmaya katkıda bulunması açısından önemlidir. Bunun için değişik yapıda ve boyutta gövde geometrileri de incelenmelidir. LED armatür tasarımı yapılırken gövde malzemesi mukavemet, maliyet, performans açısından çok iyi analiz edilerek seçilmelidir. Tezdeki sonuçlar, prototipi de üretilen, belirli gövde geometrisine sahip yüksek güçlü bir LED armatür örneği kullanılarak elde edilmiştir. Ayrıca kanatlı/kanatsız gövde tasarımlarının etkileri de incelenmiştir. Farklı soğutucu yapıları, farklı armatür gövde şekil ve boyutlarının bundan sonraki çalışmalarda değerlendirilmesi yararlı olacaktır.

2008 yılında yayınlanan IES LM-79-08 "Katı Hal Aydınlatma Ürünlerinin Elektriksel ve Fotometrik Ölçümü" teknik dokümanında LED armatürlerin ölçüleceği ortam sıcaklığının 25±1 °C seviyesinde olması istenmektedir. 25 °C'de ölçülen LED armatürler, içinde kullanılan LED ışık kaynağı ve armatür mekanik yapısına bağlı olarak farklı sıcaklıklarda farklı performans sergileyeceklerdir. 25 °C'nin altında armatür performansı artarken, sıcaklığın yükselmesi ile armatür performansı düşecektir. Bu nedenle yüksek ortam sıcaklığı şartlarında kullanılması planlanan LED ışık kaynaklı armatürlerin farklı sıcaklıklardaki performans değerlendirilmeleri yapılmak zorundadır. Ortam sıcaklığının yükselmesi LED çipinin verimini düşürecek ve armatürün etkinlik faktörünü etkileyecektir. LED armatür üreticileri, kataloglarında armatürlerinin performanslarını belirli ortam sıcaklıkları için vermeli, ömür ve etkinlik faktörü değerlendirmeleri de ortam sıcaklığına bağlı olarak açıklanmalıdır.

Tezde farklı LED çip ısıl güçleri ile iki değişik konfigürasyonda (nominal-yüksek güç) dikkate alınan faktörlerin armatürün fotometrik performansına etkileri araştırılmış ve nominal güçte faktör etkileri önemsiz ve az önemli olarak bulunmuştur. Yüksek güç senaryosunda ise, faktör etkilerinin çoğunun önemli olduğu, yani armatür fotometrik performansını etkilediği görülmüştür. Özellikle gövde geometrisinin, yüksek LED çip ısıl gücünde önemli olduğu ve başarılı çözümler için armatür soğutucu yapısının iyi irdelenmesi gerektiği açıktır.

Sonuç olarak LED armatür ısıl tasarımı bütün elemanları ile düşünülmeli ve bütünsel bir tasarım anlayışı geliştirilmelidir. Armatürün çalışacağı ortam sıcaklığı iyi belirlenmeli ve ısıl tasarımlar buna göre yapılmalıdır. Armatür üreticileri kataloglarında farklı dış ortam sıcaklıkları için armatür performanslarını açıklamalıdır.

KAYNAKLAR

[1] **Yurtseven, M.B., Mete, S. ve Onaygil, S.** (2016). The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs. *Lighting Research and Technology,* 48 (8), 943-965.

[2] **Petroski, J.** (2006). Thermal Challenges In LED Cooling. Erişim: 15.03.2016, https://www.electronics-cooling.com/2006/11/thermal-challenges-in-led-cooling/

[3] **Ishizaki, S., Kimura, H. ve Sugimoto, M.** (2007). Lifetime Estimation of High Power White LEDs. *Journal of Light & Visual Environment.* 31(1), 11-18.

[4] **Kıyak, I., Oral, B. ve Topuz, V.** (2009). Effects of lighting performance on cooling power LED. *LuxEuropa 2009,* 9-11 Eylül 2009, İstanbul.

[5] **Poppe, A.Lasance, C.J.** (2009). On the standardization of thermal characterization of LEDs. *Semiconductor Thermal Measurement and Management Symposium, 200925th Annual IEEE*, 15-19 Mart 2009, San Jose, CA, ABD.

[6] **Grabner-Meyer** (2007). LED Datasheet Comparison. *Led Professional Review.*

[7] **Enerji Verimliliği ve Aydınlatma Tekniği Laboratuvar**ı, Erişim: 30 Ocak 2016, http://enerji.itu.edu.tr/arastirma/laboratuvarlar/enerji-verimliligi-ve-aydinlatma-teknigi-laboratuvari

[8] **Labsphere,** Erişim: 30 Mayıs 2016, https://www.labsphere.com/

[9] **Rea, M.S.** (2000). *The Iesna Lighting Handbook: Reference & Application*. Illuminating Engineering Society of North America, NewYork, Amerika Birleşik Devletleri.

[10] **Filsinger, D.H.Bourrie, D.B.** (1990). Silica to Silicon: Key Carbothermic Reactions and Kinetics. *Journal of the American Ceramic Society.* 73 (6): 1726-1732.

[11] **Round, H.J.** (1907). A Note on Carborundum. *Electrical World.* 19 (309).

[12] **Loebner, E.E.** (1976). Subhistories of the light emitting diode. *Electron Devices, IEEE Transactions on.* 23 (7), 675-699.

[13] **Edmond, J.A., Kong, H.-S. ve Carter Jr, C.H.** (1993). Blue LEDs, UV photodiodes and high-temperature rectifiers in 6H-SiC. *Physica B: Condensed Matter.* 185 (1–4): 453-460.

[14] **Lumileds**. Erişim: 2014 Mayıs 2014, Adres: http://www.philipslumileds.com.

[15] **CREE**. Erişim: 2014 Mayıs 2014, Adress: http://www.cree.com.

[16] **Mottier, P.** (2010). *LED for Lighting Applications*. Wiley, Londra, İngiltere.

[17] **Liisa Halonen, E.T., Pramod Bhusal** (2010). *Guidebook on Energy Efficient Electric Lighting for Buildings*. Aalto, Finlandiya.

[18] **Strategies Unlimited,** (2013). Erişim 17 Temmuz 2016, http://www.strategies-u.com/articles/2013/02/worldwide-led-component-market-grew-9--to--13-7-billion-with-lig.html

[19] **Luryi, S., Xu, J. ve Zaslavsky, A.** (2002). *Future trends in microelectronics: the nano millennium*. IEEE, Amerika Birleşik Devletleri.

[20] **Department of Energy** (2014). Led Basics. Erişim: 14 Ocak 2015, http://energy.gov/eere/ssl/led-basics

[21] **DiLaura, D.L., Houser, K.W., America, I.E.S.o.N., Mistrick, R.G. ve Steffy, G.R.** (2011). *Illuminating Engineering Society Lighting Handbook: Reference & Application*. Illuminating Engineering Society of North America, New York, Amerika Birleşik Devletleri.

[22] **Philips** (1993). *Lighting Manual, 5th Edition*. Philips Lighting B.V., Hollanda.

[23] **CIE,** (1987). *International lighting vocabulary*. Bureau central de la CIE, Viyana, Avusturya.

[24] **Wikipedia** (2016), Erişim: 15 Mayıs 2016, http://en.wikipedia.org/wiki/Black-body_radiation.

[25] **ANSI** (2015). Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.ansi.org

[26] **CEN** (2015). Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.cen.eu

[27] **CIE** (2015). Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.cie.co.at

[28] **FCC** (2015). Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.fcc.gov/

[29] **IEC** (2015). Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.iec.ch/

[30] **IESNA** (2015). Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.ies.org/

[31] **JEDEC** (2015). Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.jedec.org/

[32] **NEMA** (2015). Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.nema.org

[33] **NFPA** (2015). Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.nfpa.org

[34] **UL** (2015). Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.ul.com

[35] **ZHAGA** (2015). Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.zhagastandard.org

[36] **ASSIST** Assist Programı. Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidState/ASSIST/index.asp

[37] **NIST** (2015). Erişim: 21 Mayıs 2015, http://www.nist.gov/

[38] **IESNA** (2008). *IES LM-79-08 Approved Method: Electrical and Photometric Measurements of Solid State Lighting Products*. ABD.

[39] **Mustafa Berker Yurtseven, G.Ö., Sermin Onaygil** (2012). The Effect of LED Luminaire Orientation on the Photometric Measurements – Thermal Aspects, *Balkan Light 2012*, (s 39-46). Belgrad, Sırbistan. 3-6 Ekim.

[40] **IESNA** (2008). *IES LM-80-08: Approved Method: Lumen Maintenance Testing of LED Light Sources*. ABD

[41] **IESNA** (2011). *IES TM-21-11 Life Estimation Test Method*. ABD.

[42] **IESNA** (2014). *IES LM-84-14 Measuring Luminous Flux and Color Maintenance of LED Lamps, Light Engines and Luminaries.* ABD.

[43] **IESNA** (2014). *IES TM-28-14 Projecting Long-Term Luminous Flux Maintenance of LED Lamps and Luminaires*. ABD.

[44] **IEC** (2008). *IEC 62031:2008 / EN 62031:2008: LED Modules for General Lighting – Safety Specifications.* İsviçre.

[45] **IEC** (2011). *IEC/PAS 62717:2011: LED Modules for General Lighting – Performance Requirements*. İsviçre.

[46] **IEC** (2011). *IEC 62560:2011 / EN 62560 (Taslak): Self-ballasted LED-lamps for general lighting services by voltage > 50 V - Safety specifications*. İsviçre.

[47] **IEC** (2009). *IEC/PAS 62612:2009: Self-ballasted LED-lamps for general lighting services by voltage > 50 V – Performance Requirements*. İsviçre.

[48] **IEC** (2016). *IEC 60061: Lamp caps and holders together with gauges for the control of interchangeability and safety.* İsviçre.

[49] **IEC** (2006). *IEC 60838-2-2:2006 / EN 60838-2-2:2006: Miscellaneous lampholders – Part 2-2: Particular requirements – Connectors for LED-modules.* İsviçre.

[50] **IEC** (2010). *IEC 61231:2010 / EN 61231:2010: International lamp coding system.* İsviçre.

[51] **IEC** (2011). *IEC/PAS 62707-1:2011: LED – Binning – Part 1 : General requirements and white grid*. İsviçre.

[52] **IEC** (2010). *IEC 61347-1:2010-11 / EN 61347-1:2008: Lamp controlgear – Part 1: General and safety requirements.* İsviçre.

[53] **IEC** (2006) *IEC 61347-2-13:2006: Lamp controlgear – Part 2-13: Particular requirements for DC or AC supplied electronic controlgear for LED modules.* İsviçre.

[54] **IEC** (2009). *IEC 62384:2009 / EN 62384:2009: DC or AC supplied electronic control gear for LED modules – Performance requirements*. İsviçre.

[55] **IEC** (2009). *IEC 62386-101:2009 / EN 62386-101:2009: Digital addressable lighting interface – Part 101: General requirements – System*. İsviçre.

[56] **IEC** (2009). *IEC 62386-102:2009 / EN 62386-102:2009: Digital addressable lighting interface – Part 101: General requirements – Control Gear*. İsviçre.

[57] **IEC** (2009). *IEC 62386-207:2009 / EN 62386-207:2009: Digital addressable lighting interface – Part 207: Particular requirements for control gear – LED Modules*. İsviçre.

[58] **IEC** (2014). *IEC 60598 / EN 60598: Luminaire Safety*. İsviçre.

[59] **IEC** (2011). *IEC/PAS 62722-1:2011: Luminaire performance – Part 1 – General Requirements*. İsviçre.

[60] **IEC** (2011) *IEC/PAS 62722-2-1:2011 Luminaire performance – Part 2-1 – Particular requirements for LED luminaires*. İsviçre.

[61] **IEC** (2011) *IEC/TS 62504:2011: Terms and definitions for LEDs and LED modules in general lighting*. İsviçre.

[62] **IEC** (2006) *IEC 62471:2006 / EN 62471:2008: Photobiological safety of lamps and lamp systems*. İsviçre.

[63] **IEC** (2009) *IEC 62471-2:2009: Photobiological safety of lamps and lamp systems – Part 2: Guidance on manufacturing requirements relating to non-laser optical radiation safety*. İsviçre.

[64] **CIE** (2007). *CIE 127:2007 Measurement of LEDs*. Avusturya.

[65] **CEN** (2014)**.** *EN 13032 : Light and Lighting – Measurement and presentation of photometric data of lamps and luminaires.* Avusturya.

[66] **IEC** (2010). *IEC/TR 61341:2010: Method of measurement of centre beam intensity and beam angle(s) of reflector lamps*. İsviçre.

[67] **IEC** (2009) *IEC/EN 61547:2009 Equipment for general lighting purposes – EMC immunity requirements*. İsviçre.

[68] **IEC** (2009). *IEC/EN 61000-3-2, Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 3-2: Limits – Limits for harmonic current emissions*. İsviçre.

[69] **IEC** (2009). *IEC CISPR 15/EN 55015 (2009) Limits and methods of measurement of radio disturbance characteristics of electrical lighting and similar equipment*. İsviçre.

[70] **IEC** (2009). *IEC/EN 62493 (2009) Assessment of lighting equipment related to human exposure to electromagnetic fields*. İsviçre.

[71] **CIBSE** (2009). *The SLL Lighting Handbook*. Chartered Institution of Building Services Engineers (CIBSE).

[72] **IEC** (2004). *ANSI/IEC 60529-2004 Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code).* İsviçre.

[73] **Almeco** (2014). Erişim: 15 Mart 2014, http://www.almecogroup.com

[74] **Ledil** (2014). Erişim: 15 Mart 2014, http://www.ledil.fi

[75] **Lithonia Lighting** (2014). Erişim: 15 Mart 2014, http://www.lithonia.com

[76] **Oms Lighting** (2014). Cold lumens versus hot lumens. Erişim: 15 Mart 2014, http://www.omslighting.com/ledacademy/579/4-leds-controls/41-cold-lumens-versus-hot-lumens

[77] **JEDEC** (2008). *JESD15-4 DELPHI Compact Thermal Model Guideline*. ABD.

[78] **JEDEC** (2008). *JESD15-3 Two Resistor Compact Thermal Model Overview*. ABD.

[79] **Yurtseven, M.B., Onaygil, S. ve Ogus, G.** (2014). Thermal simulation and validation of LED-based luminaires using two-resistor compact thermal model. *Lighting Research and Technology.* 46(5): 576-586.

[80] **Czitrom, V.** (1999). One-factor-at-a-time versus designed experiments. *The American Statistician.* 53(2): 126-131.

[81] **Montgomery, D.C.** (2012). *Design and Analysis of Experiments, 8th Edition*. John Wiley & Sons, Incorporated.

[82] **Field, A.** (2013). *Discovering Statistics Using IBM SPSS Statistics*. SAGE Publications.

[83] **Stamatis, D.H.** (2002). *Six Sigma and Beyond: Design for Six Sigma*. CRC Press.

[84] **IEC** (2004). *IEC 60529 Degrees of Protection Provided by Enclosures (IP Code)*. İsviçre.

[85] **TEDAS** (2010). *TEDAS-ARGEP/2010-057.B LED Işık Kaynaklı Yol Aydınlatma Armatürleri Teknik Şartnamesi*. Türkiye.

[86] **Minitab**. Minitab. Erişim: 16 Haziran 2016 http:\\www.minitab.com

[87] **Yurtseven, M.B., Onaygil, S.** (2015). Investigation of the Effects of Thermal Interface Materials on the Thermal Performance of Luminaires with High-Power LEDs. *Balkanlight 2015*. (s. 211-215). Atina, Yunanistan. 16-19 Eylül.

[88] **CREE**. CREE XP-G2 LED. Erişim: 17 Mayıs 2015 http://www.cree.com/LED-Components-and-Modules/Products/XLamp/Discrete-Directional/XLamp-XPG2

[89] **TSE (2014).** TS EN 13201-2 Yol Aydınlatması - Bölüm 2: Performans Özellikleri. Türkiye.

ÖZGEÇMİŞ



Ad-Soyad : Mustafa Berker Yurtseven

Doğum Tarihi ve Yeri : 25.07.1980 - Libya

E-posta : byurtseven@itu.edu.tr

ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2003, İstanbul Üniversitesi, Mühendislik Fakültesi, Makine Mühendisliği Bölümü
- **Yükseklisans** : 2006, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Bilim ve Teknoloji

MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2009-2013 yılları arasında İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü, Enerji Planlaması ve Yönetimi Anabilim Dalı'nda araştırma görevlisi olarak çalıştı.

DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Yurtseven, M.B.,** Mete, S. ve Onaygil, S. (2016). The effects of temperature and driving current on the key parameters of commercially available, high-power, white LEDs. Lighting Research and Technology, 48 (8), 943-965.
- **Yurtseven M.B.,** Onaygil S., "Katı Hal Aydınlatma Ürünleri Ömür Ölçümü ve Tahmini Standartları", 8. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu, 21-24 Ekim 2015, İzmir.
- **Yurtseven M.B.,** Onaygil S., "Investigation of the Effects of Thermal Interface Materials on the Thermal Performance of Luminaires with High-Power LEDs", BalkanLight 2015, pp. 211-214, 16-19 Eylül 2015, Atina, Yunanistan.

- Mete S., **Yurtseven M.B.,** Onaygil S., “Investigation of the effects of different passive cooling systems on the performance of high power LEDs”, BalkanLight 2015, pp. 205-210, 16-19 September 2015,Atina, Yunanistan.
- **Yurtseven M.B.,** Onaygil S., “LED Standartlarındaki Gelişmeler”, 10. Ulusal Aydınlatma Kongresi, 16-18 Nisan 2015, İstanbul.
- **Yurtseven M.B.,** Mete S., Onaygil S., “Sıcaklık ve Sürüş Akımının LED’lerin Karakteristik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi”, 10. Ulusal Aydınlatma Kongresi, 16-18 Nisan 2015, İstanbul.
- Atılgan L.E., **Yurtseven M.B.,** "LED Işık Kaynağı Kullanan Sistemlerin Isıl Tasarımında İzlenecek Yöntemler", 2015, 10. Ulusal Aydınlatma Kongresi, İstanbul, 16-18 Nisan 2015.
- **Yurtseven M.B.,** Onaygil S., Ogus G. (2014). “Thermal simulation and validation of LED based luminaires using two-resistor compact thermal model”, ”, Lighting Research and Technology, 46 (5), 576-586.
- **Yurtseven M.B.,** Mete S., Onaygil S., “The Effect of Temperature on the Color Characteristics of Light Emitting Diodes”, Bullight 2014, 10-13 Kasım 2014, Bulgaristan.
- **Yurtseven M.B.,** Oğüş G., Onaygil S., “The Effect of LED Luminaire Orientation on the Photometric Measurements – Thermal Aspects”, pp. 39-46,Balkan Light 2012, 3-6 Ekim 2012, Belgrad, Sırbistan.
- **Yurtseven M.B.,** Onaygil S., “Katı Hal Aydınlatma ve LED Standartlarındaki Gelişmeler”, 6. Ulusal Aydınlatma Sempozyumu, pp 116-125, 24-25 Kasım 2011, İzmir.
- Onaygil S., **Yurtseven M.B.,** Erkin E., “Thermal Analysis Methods and Processes in Led Luminaire Design”, CIE 27. Toplantısı, Temmuz 2011, Sun City, Temmuz 2011.
- Onaygil S., **Yurtseven M.B.,** Gündüz N., Erkin E., “Optical and Thermal Design Processes for Efficient LED Luminaire Design”, 8. Ulusal Aydınlatma Kongresi, 14-15 Nisan 2011, İstanbul.