

**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK GÜÇLÜ LED (IŞIK YAYAN DİYOT) IŞIK KAYNAKLI  
ARMATÜRLERİN SOĞUTMA SİSTEMLERİNDE ISI BORULARININ  
KULLANIM ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Seher ATEŞ**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**OCAK 2021**



**İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ LİSANSÜSTÜ EĞİTİM ENSTİTÜSÜ**

**YÜKSEK GÜÇLÜ LED (IŞIK YAYAN DİYOT) IŞIK KAYNAKLI  
ARMATÜRLERİN SOĞUTMA SİSTEMLERİNDE ISI BORULARININ  
KULLANIM ANALİZİ**

**DOKTORA TEZİ**

**Seher ATEŞ  
(301112008)**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Anabilim Dalı**

**Enerji Bilim ve Teknoloji Programı**

**Tez Danışmanı: Prof. Dr. Sermin ONAYGİL**

**OCAK 2021**



İTÜ, Lisansüstü Eğitim Enstitüsü'nün 301112008 numaralı Doktora Öğrencisi Seher ATEŞ, ilgili yönetmeliklerin belirlediği gerekli tüm şartları yerine getirdikten sonra hazırladığı “YÜKSEK GÜÇLÜ LED (IŞIK YAYAN DİYOT) IŞIK KAYNAKLI ARMATÜRLERİN SOĞUTMA SİSTEMLERİNDE ISI BORULARININ KULLANIM 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. Mehmet ARIK** .....

Özyeğin Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi M. Berker YURTSEVEN** .....

İstanbul Teknik Üniversitesi

**Dr. Öğr. Üyesi K. Furkan SÖKMEN** .....

Bursa Teknik Üniversitesi

**Teslim Tarihi** : 10 Aralık 2020  
**Savunma Tarihi** : 25 Ocak 2021





*Aileme,*



## ÖNSÖZ

Tez çalışmasının her aşamasında benden ilgi, destek ve yardımlarını esirgemeyen çok değerli hocam ve danışmanım Prof. Dr. Sermin ONAYGİL'e en derin teşekkürlerimi sunarım.

Tezimin yönlendirilmesinde katkılarını esirgemeyen hocalarım Prof. Dr. Önder GÜLER ve Prof. Dr. Mehmet ARIK'a teşekkür ederim. Değerli çalışma arkadaşlarım Dr. Ebru ACUNER TÜRET, Dr. Öğr. Üyesi Mustafa Berker YURTSEVEN ve Dr. Seyit Ahmet AKDAĞ'a destekleri için çok teşekkür ederim. İTÜ Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne tezimi 39766 numaralı tez projesi kapsamında destekledikleri için teşekkürü bir borç bilirim.

Tüm eğitim hayatım boyunca benden ilgi, sevgi ve desteklerini esirgemeyen canım annem Rabia METE, babam Şükrü METE ve ağabeylerim Erdal ve Serdar METE'ye en derin sevgi ve saygılarımla teşekkür ederim.

Varlıklarıyla bana en büyük gücü ve azmi veren biricik eşim Ali Osman ATEŞ ve canım kızım Ayşe Neva ATEŞ'e bu zorlu süreçteki sabır ve destekleri için sonsuz teşekkürler ederim.

Aralık 2020

Seher Ateş  
(Makine Mühendisi)



## İÇİNDEKİLER

### Sayfa

ÖNSÖZ.....	vii
İÇİNDEKİLER .....	ix
KISALTMALAR .....	xi
SEMBOLLER .....	xiii
ÇİZELGE LİSTESİ.....	xv
ŞEKİL LİSTESİ.....	xvii
ÖZET.....	xix
SUMMARY .....	xxi
<b>1. GİRİŞ.....</b>	<b>1</b>
<b>2. LED TEKNOLOJİSİ VE SOĞUTMA SİSTEMLERİ.....</b>	<b>5</b>
2.1 LED Işık Kaynaklarının Yapısı, Özellikleri ve Gelişimi .....	5
2.2 Sıcaklık Artışının LED Işık Kaynaklarının Özelliklerine Etkisi.....	9
2.2.1 Sıcaklığın değerlendirilen LED'lerin ışık akısına etkisi .....	11
2.2.2 Sıcaklığın değerlendirilen LED'lerin etkinlik faktörüne etkisi.....	14
2.2.3 Sıcaklığın değerlendirilen LED'lerin optik-ısı-elektriksel güçlerine ve verimlerine etkisi.....	17
2.2.4 Sıcaklığın değerlendirilen LED'lerin renk özelliklerine etkisi .....	20
2.2.4.1 Sıcaklığın değerlendirilen LED'lerin renk sıcaklığına (CCT) etkisi .	21
2.2.4.2 Sıcaklığın değerlendirilen LED'lerin renksel geriverim endeksine (Ra) etkisi .....	22
2.2.5 Sıcaklığın LED'lerin ömrüne etkisi .....	24
2.3 Soğutma Sistemleri ve Literatürdeki Çalışmalar.....	25
2.3.1 Pasif soğutma .....	25
2.3.1.1 Pasif soğutma elemanları .....	26
2.3.1.2 Isı boruları .....	27
2.3.2 Aktif soğutma.....	35
2.3.3 Soğutma sistemlerinin değerlendirilmesi.....	36
<b>3. KARŞILAŞTIRMALI ANALİZLERDE KULLANILAN YÜKSEK TAVAN ENDÜSTRİYEL ARMATÜRÜNÜN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE IŞIK KAYNAĞI SEÇİMİ.....</b>	<b>39</b>
3.1 Piyasada bulunan LED Işık Kaynaklı Yüksek Tavan Endüstriyel Armatürlerin İncelenmesi.....	40
3.2 Kullanılacak COB LED'in Ulbricht Küresi ile Özelliklerinin Belirlenmesi ...	42
3.3 Prototipde Kullanılacak COB LED Sayısının Belirlenmesi .....	47
<b>4. ARMATÜR TASARIMI, ISIL SİMÜLASYONLAR VE DENEYSEL ÖLÇÜMLER.....</b>	<b>49</b>
4.1 LED Işık Kaynaklı Bir Armatürün Direnç Şeması .....	49
4.1.1 Jonksiyon noktası ile kasa (case) arasındaki ısı direnç ( $R_{j-c}$ ).....	49
4.1.2 Kasa noktasından ısı arayüzey malzemesinin başlangıcına kadar olan baskı devre kartının (PCB) ısı direnci ( $R_{c-at}$ ).....	50

4.1.3 Isıl arayüzey malzemesinin direnci ( $R_{a1-a2}$ ).....	52
4.2 Sadece Soğutucu Kanatların Kullanıldığı Tasarımın Isıl Simülasyonu, Deneyel Analizi ve Karşılaştırmalı Doğrulmaları.....	54
4.2.1 Isıl simülasyonlar .....	55
4.2.2 Prototip üretim süreci .....	59
4.2.3 Deneyel ölçümler .....	60
4.2.4 Karşılaştırma ve doğrulama .....	63
4.3 Belirsizlik Analizi.....	63
4.4 Isı Boruları ve Kanatların Birlikte Kullanıldığı Tasarımın Isıl Simülasyonu, Deneyel Analiz ve Karşılaştırmalı Doğrulmaları.....	66
4.4.1 Isı borulu-kanatlı sistemin ısı simülasyonları .....	68
4.4.2 Prototip üretim süreci .....	70
4.4.3 Deneyel ölçümler .....	71
4.4.4 Karşılaştırma ve doğrulama .....	73
4.5 Isı Borulu-Kanatlı ve Sadece Kanatlı Soğutma Sistemlerinin Karşılaştırılması .....	75
<b>5. SİMÜLASYON SONUÇLARININ PARAMETRİK İRDELEMESİ VE İSTATİSTİKSEL ANALİZLERİ.....</b>	<b>77</b>
5.1 Tam Faktöriyel Başlangıç Analizleri.....	77
5.2 Detaylı Regresyon Analizleri .....	85
<b>6. SONUÇ VE ÖNERİLER .....</b>	<b>99</b>
<b>KAYNAKLAR.....</b>	<b>103</b>
<b>ÖZGEÇMİŞ.....</b>	<b>107</b>

## KISALTMALAR

<b>ANOVA</b>	: Analysis of variance
<b>BEF</b>	: Bağıl etkinlik faktörü
<b>BIA</b>	: Bağıl ışık akısı
<b>°C</b>	: Celsius-Santigrad derece
<b>CCT</b>	: Correlated color temperature (renk sıcaklığı)
<b>cm</b>	: Santimetre
<b>COB</b>	: Chip on board
<b>IB</b>	: Isı borulu ve kanatlı soğutma sistemi
<b>In</b>	: İnç
<b>InGaN</b>	: İndium galyum nitrit
<b>K</b>	: Kelvin
<b>KNT</b>	: Sadece kanatlı soğutma sistemi
<b>LED</b>	: Light emitting diode (ışık yayan diyot)
<b>lm</b>	: lümen
<b>m</b>	: Metre
<b>mA</b>	: Miliamper
<b>mm</b>	: Milimetre
<b>PCB</b>	: Printed circuit board (baskı devre kartı)
<b>Ra, CRI</b>	: Color rendering index (renksel geriverim endeksi)
<b>W</b>	: Watt



## SEMBOLLER

<b>A<sub>b</sub></b>	: Buharlaştırıcı alanı
<b>d<sub>b</sub></b>	: Buhar alanı çapı
<b>d<sub>dış</sub></b>	: Dış çap
<b>d<sub>i</sub></b>	: İç çap,
<b>k</b>	: Isı iletim katsayısı (ısıl iletkenlik)
<b>k<sub>eff</sub></b>	: Fitolin efektif ısıl iletkenliği
<b>k<sub>p</sub></b>	: Isı borusu duvarının ısıl iletkenliği
<b>L</b>	: Uzunluk
<b>L<sub>b</sub></b>	: Buharlaştırıcı boyu
<b>L<sub>70</sub></b>	: Başlangıç ışık akısının %70'inin korunduğu süre
<b>L<sub>50</sub></b>	: Başlangıç ışık akısının %50'sinin korunduğu süre
<b>P, Q</b>	: Güç
<b>P<sub>elektrik</sub>, P<sub>e</sub></b>	: Elektriksel güç
<b>P<sub>ısıl</sub>, P<sub>ı</sub></b>	: Isıl güç
<b>P<sub>optik</sub>, P<sub>o</sub></b>	: Optik güç
<b>R, R<sub>th</sub></b>	: Isıl direnç
<b>R<sub>b,a</sub></b>	: Adyabatik buhar bölgesi direnci
<b>R<sub>dış,b</sub></b>	: Isı kaynağı ve buharlaştırıcı arasındaki temas direnci
<b>R<sub>dış,y</sub></b>	: Soğutucu ve yoğuşturucu arasındaki temas direnci
<b>R<sub>f,a</sub></b>	: Adyabatik bölgedeki sıvı-fitol birleşimi direnci
<b>R<sub>f,b</sub></b>	: Buharlaştırıcıdaki sıvı-fitol birleşimi direnci
<b>R<sub>f,y</sub></b>	: Yoğuşturucu sıvı-fitol birleşimi direnci
<b>R<sub>i,b</sub></b>	: Buharlaştırıcıdaki sıvı-buhar ara yüzey direnci
<b>R<sub>i,y</sub></b>	: Yoğuşturucudaki sıvı-buhar ara yüzey direnci
<b>R<sub>p,a</sub></b>	: Isı borusu duvarının adyabatik bölgedeki eksenel iletim direnci
<b>R<sub>p,b</sub></b>	: Isı borusu duvarının buharlaştırıcıdaki radyal iletim direnci
<b>R<sub>p,y</sub></b>	: Isı borusu duvarının yoğuşturucu radyal iletim direnci
<b>R<sub>ti</sub></b>	:Empedans
<b>R<sub>tot</sub></b>	: Isı borusu toplam ısıl direnci

<b>T</b>	: Sıcaklık
<b>T<sub>a1</sub></b>	: Isıl arayüzey malzemesinin üst noktasındaki sıcaklık
<b>T<sub>a2</sub></b>	: Isıl arayüzey malzemesinin alt noktasındaki sıcaklık
<b>T<sub>c</sub></b>	: Kasa sıcaklığı
<b>T<sub>ç</sub></b>	: Çevre sıcaklığı
<b>T<sub>j</sub></b>	: Jonksiyon (birleşim) sıcaklığı
<b>T<sub>maks</sub></b>	: Maksimum sıcaklık
<b>T<sub>sıcak</sub></b>	: Isı borusunun sıcak uç sıcaklığı
<b>T<sub>soğuk</sub></b>	: Isı borusunun soğuk uç sıcaklığı
<b>u</b>	: Belirsizlik
<b>δ</b>	: Plaka kalınlığı



## ÇİZELGE LİSTESİ

### Sayfa

<b>Çizelge 2.1</b> : LED örneklerinin nominal sürüş akımları ve tipleri. ....	<b>11</b>
<b>Çizelge 2.2</b> : Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED'lerin sıcaklığa bağlı ışık akıları [lm].....	<b>12</b>
<b>Çizelge 2.3</b> : Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED'lerin sıcaklığa bağlı ışık akıları [lm].....	<b>12</b>
<b>Çizelge 2.4</b> : Farklı nominal sürüş akımlarına sahip LED'lerin sıcaklığa bağlı ışık akıları [lm]. ....	<b>12</b>
<b>Çizelge 2.5</b> : Ölçülen tüm LED'lerin 75°C'deki bağlı ışık akıları. ....	<b>13</b>
<b>Çizelge 2.6</b> : Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED'lerin sıcaklığa bağlı etkinlik faktörleri [lm/W].....	<b>15</b>
<b>Çizelge 2.7</b> : Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED'lerin sıcaklığa bağlı etkinlik faktörleri [lm/W].....	<b>15</b>
<b>Çizelge 2.8</b> : Farklı nominal sürüş akımlarına sahip LED'lerin sıcaklığa bağlı etkinlik faktörleri [lm/W].....	<b>15</b>
<b>Çizelge 2.9</b> : Ölçülen tüm LED'lerin 75°C'deki bağlı etkinlik faktörleri. ....	<b>16</b>
<b>Çizelge 2.10</b> : Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED'lerin minimum-maksimum ölçüm sıcaklıkları için optik (Po), ısıl (P <sub>1</sub> ) ve elektriksel (Pe) güçleri. ....	<b>18</b>
<b>Çizelge 2.11</b> : Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED'lerin minimum-maksimum ölçüm sıcaklıkları için optik (Po), ısıl (P <sub>1</sub> ) ve elektriksel (Pe) güçleri. ....	<b>18</b>
<b>Çizelge 2.12</b> : Farklı nominal sürüş akımlarına sahip üç LED'in minimum-maksimum ölçüm sıcaklıkları için optik (Po), ısıl (P <sub>1</sub> ) ve elektriksel (Pe) güçleri. ....	<b>18</b>
<b>Çizelge 2.13</b> : Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED örneklerinin minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki verimleri ve iki sıcaklık arasındaki yüzdesel değişimleri. ....	<b>19</b>
<b>Çizelge 2.14</b> : Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED örneklerinin minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki verimleri ve iki sıcaklık arasındaki yüzdesel değişimleri. ....	<b>20</b>
<b>Çizelge 2.15</b> : Farklı nominal sürüş akımına sahip üç LED'in minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki verimleri ve iki sıcaklık arasındaki yüzdesel değişimleri. ....	<b>20</b>
<b>Çizelge 2.16</b> : Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED örneklerinin tüm ölçüm sıcaklıklardaki ΔCCT'leri. ....	<b>21</b>
<b>Çizelge 2.17</b> : Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED örneklerinin tüm ölçüm sıcaklıklardaki ΔCCT'leri. ....	<b>22</b>
<b>Çizelge 2.18</b> : Diğerlerinden farklı nominal sürüş akımına sahip olan 3 LED örneğinin tüm ölçüm sıcaklıklardaki ΔCCT'leri. ....	<b>22</b>
<b>Çizelge 2.19</b> : Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED örneklerinin minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki Ra'ları ve Ra'ların bu iki sıcaklık arasındaki yüzdesel değişimleri. ....	<b>23</b>

<b>Çizelge 2.20</b> : Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED örneklerinin minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki Ra'ları ve Ra'ların bu iki sıcaklık arasındaki yüzdesel değişimleri. ....	<b>23</b>
<b>Çizelge 2.21</b> : Farklı nominal sürüş akımına sahip 3 LED örneğinin minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki Ra'ları ve Ra'ların bu iki sıcaklık arasındaki yüzdesel değişimleri. ....	<b>23</b>
<b>Çizelge 2.22</b> : Karşılaştırma amaçlı direnç değerleri (Lee, 2010). ....	<b>32</b>
<b>Çizelge 2.23</b> : Farklı soğutma sistemlerinin üstünlük ve zayıflıkları. ....	<b>38</b>
<b>Çizelge 3.1</b> : Çeşitli LED ışık kaynaklı endüstriyel aydınlatma armatürlerinin ışık akısı, güç ve etkinlik faktörü değerleri. ....	<b>41</b>
<b>Çizelge 3.2</b> : Ölçülen COB LED'lerin karakteristik özellikleri ve bu özelliklerin ortalama değerleri. ....	<b>44</b>
<b>Çizelge 4.1</b> : FR-4 PCB katmanlarının tipik ısı iletkenlik değerleri (Url-9). ....	<b>50</b>
<b>Çizelge 4.2</b> : MCPCB katmanlarının tipik ısı iletkenlik değerleri (Url-9). ....	<b>51</b>
<b>Çizelge 4.3</b> : Isıl arayüzey malzemelerinin üstünlük ve zayıflıkları (Majahan, 2004). ....	<b>53</b>
<b>Çizelge 4.4</b> : Keratherm KP 97 termal macunun özellikleri (Url-10). ....	<b>53</b>
<b>Çizelge 4.5</b> : Isıl simülasyonlarda kullanılan malzeme özellikleri. ....	<b>56</b>
<b>Çizelge 4.6</b> : Isıl direnç değerleri. ....	<b>56</b>
<b>Çizelge 4.7</b> : Ağ duyarlılık analizi. ....	<b>56</b>
<b>Çizelge 4.8</b> : Kanatlı soğutma sisteminin ısı simülasyon ve deneysel ölçümlerinin karşılaştırılması. ....	<b>63</b>
<b>Çizelge 4.9</b> : Termokupl sıcaklık ölçüm sapma değerleri. ....	<b>64</b>
<b>Çizelge 4.10</b> : Belirsizlik değerleri ve toplam genişletilmiş belirsizlik. ....	<b>65</b>
<b>Çizelge 4.11</b> : Farklı ısı boru sistemlerin karşılaştırılması. ....	<b>67</b>
<b>Çizelge 4.12</b> : Isıl simülasyonlarda kullanılan malzeme özellikleri. ....	<b>69</b>
<b>Çizelge 4.13</b> : Isıl direnç değerleri. ....	<b>69</b>
<b>Çizelge 4.14</b> : Ağ duyarlılık analizi. ....	<b>69</b>
<b>Çizelge 4.15</b> : Isı borulu sistemin ısı simülasyon ve deneysel ölçümlerinin karşılaştırılması. ....	<b>74</b>
<b>Çizelge 4.16</b> : 1400 mA sürüş akımında ısı borulu ve ısı borusuz sistemin ışık akıları (lm). ....	<b>76</b>
<b>Çizelge 5.1</b> : Faktörlerin seviyeleri ve maksimum sıcaklıklar. ....	<b>79</b>
<b>Çizelge 5.2</b> : Faktörlerin seviyeleri ve maksimum sıcaklıklar. ....	<b>81</b>
<b>Çizelge 5.3</b> : Parametrik analizlerde kullanılan özellik değeri kademeleri. ....	<b>86</b>
<b>Çizelge 5.4</b> : İlave parametrik analizlerde kullanılan özellik kademeleri ve sıcaklık değerleri. ....	<b>87</b>
<b>Çizelge 5.5</b> : Simülasyon sonuçları. ....	<b>89</b>
<b>Çizelge 5.6</b> : Sadece kanatların kullanıldığı sistemin varyans analizi tablosu. ....	<b>91</b>
<b>Çizelge 5.7</b> : Isı borulu sistemin varyans analizi tablosu. ....	<b>92</b>
<b>Çizelge 5.8</b> : Isı borulu-kanatlı ve sadece kanatlı sistemlerin birlikte değerlendirildiği durumun varyans analizi tablosu. ....	<b>93</b>
<b>Çizelge 5.9</b> : Regresyon denklemleri ile elde edilen sonuçlar. ....	<b>96</b>

## ŞEKİL LİSTESİ

### Sayfa

Şekil 2.1 : Farklı ışık kaynaklarının etkinlik faktörlerinin zamanla gelişimi (Zissis, 2009). .....	6
Şekil 2.2 : Bir LED paketinin yapısı (Petroski, 2006). .....	7
Şekil 2.3 : LED örnekleri: (a) Tekil çipli, (b) Çoğul çipli, (c) COB (Chip on Board). .....	7
Şekil 2.4 : LED Modül (Url-1). .....	8
Şekil 2.5 : LED soğutucu örneği (Url-2). .....	8
Şekil 2.6 : Lens örneği (Url-3). .....	8
Şekil 2.7 : Reflektör örneği (Url-4). .....	9
Şekil 2.8 : LED ışık kaynaklı armatür elemanları (Onaygil, 2013). .....	9
Şekil 2.9 : Çalışmada kullanılan yüksek güçlü LED örnekleri. ....	10
Şekil 2.10 : Sıcaklık kontrollü, 1m çaplı Ulbricht küresi. ....	10
Şekil 2.11 : Sıcaklığı kontrol edilebilen alt plaka üzerine ölçüm için monte edilmiş LED örneği. ....	11
Şekil 2.12 : Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED'lerin bağıl ışık akılarının sıcaklıkla değişimi. ....	14
Şekil 2.13 : Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED'lerin bağıl ışık akılarının sıcaklıkla değişimi. ....	14
Şekil 2.14 : Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED'lerin bağıl etkinlik faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişimi. ....	17
Şekil 2.15 : Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED'lerin bağıl etkinlik faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişimi. ....	17
Şekil 2.16 : Yüksek güçlü beyaz LED'lerin farklı çalışma sıcaklıklarındaki ekonomik ömürleri (Url-7). ....	25
Şekil 2.17 : Plaka tipi kanatlar. ....	26
Şekil 2.18 : İğne tipi kanatlar. ....	27
Şekil 2.19 : Isı borusunun yapısı ve çalışması (Lin ve diğ., 2009). ....	28
Şekil 2.20 : Bir ısı borusunda ısı transfer limitleri (Reay ve diğ., 2014). ....	29
Şekil 2.21 : Isı borusunun ısıl direnç devresi (Lee, 2010). ....	31
Şekil 3.1 : Prototip armatür tasarımı akış şeması. ....	40
Şekil 3.2 : Çizelge 3.1'deki LED ışık kaynaklı armatürlerin ışık dağılım eğrileri. ...	42
Şekil 3.3 : COB LED'in ölçüm hazırlığı. ....	43
Şekil 3.4 : Farklı sürüş akım kademelerinde artan sıcaklığın ışık akısına etkisi. ....	47
Şekil 3.5 : Artan sürüş akımında farklı sıcaklıklar için ışık akısı değişimi. ....	47
Şekil 4.1 : LED ışık kaynaklı bir armatür yapısının basitleştirilmiş ısıl direnç şeması. ....	49
Şekil 4.2 : FR-4 PCB'nin tipik kesit geometrisi (Url-9). ....	50
Şekil 4.3 : MCPCB'nin tipik kesit geometrisi (Url-9). ....	51
Şekil 4.4 : İki malzemenin birleşim bölgesindeki boşlukların ısıl ara yüzey malzemesi ile doldurulması. ....	52
Şekil 4.5 : KP 97 macunun temas basıncına bağlı ısıl direnç ve empedans değeri (Url-10). ....	54

Şekil 4.6 : COB LED modeli. ....	55
Şekil 4.7 : Tasarlanan COB LED’li armatür prototipi. ....	55
Şekil 4.8 : Maksimum sıcaklık-ağ elemanı sayısı.....	57
Şekil 4.9 : Dört numaralı ağın bir kesit resmi. ....	57
Şekil 4.10 : Prototip tasarımındaki sıcaklık dağılımı. ....	58
Şekil 4.11 : Soğutucu üzerinde sıcaklık ölçümü için belirlenen 81 nokta. ....	59
Şekil 4.12 : Alüminyum bloğun işlenmesi.....	59
Şekil 4.13 : Prototip montajı. ....	60
Şekil 4.14 : Deney düzeneği. ....	61
Şekil 4.15 : Ölçüm noktaları. ....	62
Şekil 4.16 : Isı borusuz sistemde yedi noktadan termokupllarla ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimleri. ....	62
Şekil 4.17 : Sıcaklık-ortalama sapma grafiği. ....	64
Şekil 4.18 : Efektif termal iletkenlik-eğim açısı grafiği (Salem ve diğ., 2019). ....	66
Şekil 4.19 : Simülasyonlar ile denenen sistemlere ait şematik görünüşler. ....	68
Şekil 4.20 : Maksimum sıcaklık-ağ elemanı sayısı.....	70
Şekil 4.21 : Isı borulu-kanatlı prototibin simülasyon sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı. ....	70
Şekil 4.22 : Isı borulu prototibin üretim aşamaları. ....	71
Şekil 4.23 : Ölçüm noktaları. ....	72
Şekil 4.24 : Ölçüm düzeneği. ....	73
Şekil 4.25 : Isı borulu-kanatlı sistemde termokupllardan alınan ölçüm sonuçlarının zamana bağlı değişimi.....	73
Şekil 4.26 : Farklı noktalarda ısı borusu ısı iletkenlik değerinin sıcaklığa etkisi. ....	74
Şekil 4.27 : Sıcaklık ortamları alınan 81 adet nokta konumu. ....	75
Şekil 5.1 : Pareto grafiği. ....	79
Şekil 5.2 : Residual (artık) grafikleri. ....	81
Şekil 5.3 : Pareto grafiği. ....	82
Şekil 5.4 : Residual (artık) grafikleri. ....	82
Şekil 5.5 : Pareto grafiği. ....	84
Şekil 5.6 : Residual (artık) grafikleri. ....	84
Şekil 5.7 : Sadece kanatların kullanıldığı sistemin artık grafikleri. ....	91
Şekil 5.8 : Isı borulu sistemin artık grafikleri. ....	92
Şekil 5.9 : Isı borulu ve kanatlı sistemlerin birlikte değerlendirildiği durumun artık grafikleri. ....	94
Şekil 5.10 : Temel etki grafikleri. ....	95
Şekil 5.11 : İkili etkileşim grafikleri. ....	95

# YÜKSEK GÜÇLÜ LED (IŞIK YAYAN DİYOT) IŞIK KAYNAKLI ARMATÜRLERİN SOĞUTMA SİSTEMLERİNDE ISI BORULARININ KULLANIM ANALİZİ

## ÖZET

LED ışık kaynakları günümüzde genel aydınlatma uygulamalarında sıklıkla kullanılmaktadır. Işık akısı, etkinlik faktörü ve ömür gibi kriterler dikkate alındığında LED ışık kaynakları geleneksel ışık kaynaklarının alternatifi olabilecek performanslar ortaya koyabilmektedir. Ancak çalışma sırasında yüksek ısı güçlerinin açığa çıkması sebebiyle LED ışık kaynaklı armatürlerin ısı yönetimleri bir diğer deyişle soğutmaları önemli bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır. Sürekli ve etkili bir soğutma sistemi olmadan LED'lerin beklenen etkinliği sağlamaları mümkün değildir.

Bu tezde öncelikle LED ışık kaynaklarının özelliklerine sıcaklığın etkisinin belirlenebilmesi amacıyla ölçümler gerçekleştirilmiştir. Sonuç olarak LED'lerin özelliklerinin sıcaklıktan farklı oranlarda etkilendiği gözlemlenmiştir. Bununla birlikte ölçülen tüm LED'lerin özellikleri artan sıcaklıktan olumsuz etkilenmiştir.

Literatürde mevcut soğutma sistemleri ile ilgili araştırma gerçekleştirildiğinde, aktif ve pasif pek çok sistemle karşılaşılmıştır. Üstünlük ve zayıflık analizleri yapıldığında ise sadece soğutucu kanatların kullanıldığı sistemler ile soğutucu kanatlar ve ısı borularının birlikte kullanıldığı sistemler ön plana çıkmıştır.

Bu kapsamda noktasal ısı yüklerinin yüksek, dolayısıyla sıcaklık etkileşiminin kritik olduğu COB LED'lerin kullanıldığı bir aydınlatma armatürü prototibinin sadece kanatlı ve ısı borulu kanatlı iki farklı soğutma sistemine sahip versiyonlarının ısı simülasyonları yapılmış, üretimleri gerçekleştirilmiş ve deneysel analizleri yapılmıştır. Deneysel ölçümler ile ısı simülasyon sonuçları doğrulanmış ve iki sistem birbiriyle karşılaştırılmıştır. Belirlenen noktalarda iki sistem arasında ortalama sıcaklık farkının yalnızca 3,3°C olduğu gözlemlenmiştir. Işık akısı olarak 253 lümene karşılık gelen bu değer armatür toplam ışık akısında sadece % 0,6'lık bir farklılığı göstermektedir. Değerlendirilen armatür prototibi için iki soğutma sistemi arasında yüksek sıcaklık ve ışık akısı farkı ortaya çıkmamıştır.

Çalışmada, iki sistem için gerçekleştirilen ek ısı simülasyonların parametrik irdelenmesi istatistiksel olarak analiz edilmiştir. Öncelikle seçilen parametreler için faktöriyel analizler gerçekleştirilmiştir. Faktöriyel analizlerden elde edilen ön bilgiler de göz önüne alınarak daha fazla simülasyon sonucu içeren bir regresyon analizi yapılmıştır. Soğutucu malzemesinin, termal macunun (gres) ısı direncinin ve ısı gücün etkili parametreler olduğu belirlenmiştir. Ayrıca sistemin maksimum sıcaklığına etki eden parametre etkileşimleri de belirlenmiştir. Detaylı regresyon analizleri sonucunda, soğutucu sistem tasarımının yani sadece kanatlı ya da ısı borulu kanatlı sistem ayrımının tek başına etkili olmadığı görülmüştür. Diğer yandan tasarımın diğer parametreler ile ikili ve üçlü etkileşimlerinin olduğu gözlemlendiğinden, soğutucu sistem farklılığının regresyon denklemlerinde bulunması gerektiği sonucuna varılmıştır.

Tez kapsamında yapılan ölçümler ile ortaya çıkan bir diğer önemli sonuç, LED ışık kaynağı özelliklerinin sıcaklık ve sürüş akımından farklı oranlarda etkilenebildiğinin görülmesidir. Bu durum tasarım aşamasına geçilmeden önce LED özelliklerinin ölçüm ile belirlenmesinin gerekliliğini ortaya çıkarmaktadır. LED üreticilerinin kataloglarında LED özelliklerini farklı sıcaklık ve farklı sürüş akımı değerleri için vermesinin armatür üreticilerine tasarımda yol gösterici ve doğru yönlendirici olacağı açıktır.



# **ANALYSIS OF HEAT PIPE USAGE IN COOLING SYSTEMS OF LUMINAIRES WITH HIGH POWER LED (LIGHT EMITTING DIODE) LIGHT SOURCE**

## **SUMMARY**

Nowadays, LED light sources are used frequently in general lighting applications. Considering the criteria such as luminous flux, efficacy factor, and life, LED light sources can exhibit performances that may be a good alternative to conventional light sources. However, due to the high thermal powers being radiated during the operation, the thermal management of LED luminaires is a very crucial issue. In other words it is important to cool luminaires which has LED light sources, by means of appropriate system design. Without a steady and effective cooling system, it is not possible for LEDs to achieve the expected performance.

In this dissertation, firstly, measurements were made to determine the effect of temperature on the properties of a wide range of high power LED light sources. In these measurements a one meter diameter temperature-controlled Ulbricht Sphere was used. Selected high power LED light sources were measured for nominal driving currents stated at datasheets, at six different temperature levels between 25°C - 75°C. As a result, it was observed that the properties of the LEDs were affected at different rates from the temperature. However, the properties of all LEDs measured were negatively affected by the increasing temperature. This situation has indicated that high power LED light source based luminaires must have an efficient cooling system in order to meet the targeted criteria at their design stage.

In the literature, there are many types of active and passive cooling systems encountered. Active systems have an additional power requirement for cooling purposes, whereas passive systems do not. Some examples of active systems are fans, liquid-cooling systems, synthetic jets, piezoelectric fans, etc. As examples of passive cooling systems, various cooling fins and heat pipes can be shown. The properties of active and passive cooling systems were evaluated mutually. It has been observed that passive cooling systems have advantages such as simple structure, ease of production, application flexibility and low cost compared to active systems. Considering the usage areas of luminaires with high luminous flux and hence high powers (road lighting, industrial high-bay lighting, etc), the use of passive cooling systems comes to the forefront in a lot of ways.

In this dissertation, it has been decided to use COB LEDs where regional thermal loads are high and therefore heat transfer is crucial. Firstly, LED-based high-bay luminaires on the market have been examined. Then, the COB LED which has used in the luminaire prototype designed in this study was selected. The properties of the selected COB LED was measured by means of the temperature-controlled Ulbricht Sphere. The number of COB LEDs which must be used in the luminaire prototype was calculated according to aimed luminous flux, by considering these measurement results.

Afterward, thermal simulations, production and experimental analyses of the luminaire prototype for two different cooling systems (only with fins and heat pipe together with fins) were made.

Considering the production conditions, technique and capability, it is decided that the plate dimensions of the prototype, which will be designed for comparison of cooling systems, are 290 mm × 221mm × 14 mm and the height of the fins should be 76 mm. The prototype has 26 numbers, 1 mm thick fins. For both reducing the weight and material usage as much as possible, the fin thickness was selected very thin taking into account the conditions in production. In the choice of the number of fins, in addition to the thermal performance and production possibilities, the equal length of the fins gaps was also considered. The cooling system, in which heat pipes and fins are used together, also includes four 200 mm long heat pipes.

The prototypes were created in order to compare the effects of heat pipe cooling systems in high power and high luminous flux COB LED luminaires will consist of the mechanisms where only heat accumulation and flow paths are formed, not all components of a luminaire. In both prototypes, especially the surfaces on which the LEDs will be mounted (heat transfer surfaces) were cleaned with isopropyl alcohol to remove any residues that may have occurred during the production. In order to improve heat transfer between COB LEDs and heat sink, thermal grease was applied between the contact surfaces of the PCB and the heat sink.

Experimental measurements of luminaire prototypes were made for both cooling systems. During the experimental analysis of both cooling systems, the prototypes were kept in the air by the lanyard mechanism to avoid contact with any surface, as in thermal simulations. Throughout the experimental analyses, ambient temperature and air velocity were continuously controlled with probes. It was observed that the ambient temperature was within tolerances close to 25 ° C.

In both experimental measurements, two constant-current drivers were used to drive COB LEDs. Temperature measurements were carried out using a Keithley 2700 Digital Multimeter device and K type thermocouples connected to the prototype operating at 1400 mA driving current using.

Time-dependent measurements were collected from the points determined on the luminaire prototype until the temperature stabilized. Experimental measurements and thermal simulation results were verified and the two cooling systems were compared with each other.

At the determined points, it was observed that the average temperature difference between the two cooling systems was only 3.3 ° C. This value, which corresponds to 253 lumens as the luminous flux shows only a difference of 0.6%. For the luminaire prototypes evaluated, there was no huge differences between the two cooling systems in terms of temperature and in luminous flux.

Thermal simulations were validated by experimental measurements. By considering the differences between simulations and experimental analyses it was decided that thermal simulation results were reliable. Then parametric examinations were carried out according to additional thermal simulation results. Additional thermal simulations performed for two cooling systems and the results were statistically analyzed.

Firstly, initial factorial analyses were carried out for the variables thermal power, heat sink thermal conductivity, air temperature, thermal grease resistance, and cooling system design. By considering the initial information obtained from factorial analyses, regression analyses involving more simulation results was performed. It is determined that the thermal resistance of grease, thermal power and heat sink thermal conductivity are effective parameters. In addition, parameter interactions that affect the maximum temperature of the system were also determined. As a result of detailed regression analysis, it has been observed that the cooling system design, that is, only the fin or heat pipe-fin system separation is not effective alone. On the other hand, since it was observed that the cooling system design has double and triple interactions with other parameters, it was concluded that the cooling system difference should be found in the regression equations.

It is another important result that comes out with the measurements made in the thesis study that the properties of the LED light source can be affected at different rates from the increasing temperature and driving current. This reveals the necessity of determining the LED properties with measurements before proceeding to the design phase. It is clear that the LED manufacturers should give the LED properties such as luminous flux, efficacy, and efficiency for different temperatures and driving current values in their product catalogs. This systematic approach will be a helpful and correct guide in the design process for the luminaire manufacturers.



## 1. GİRİŞ

19. yüzyılın ortalarına kadar çıra, mum ve bitkisel veya hayvani yağlı kandiller kullanılarak aydınlatma yapılırken, 1859'da petrolün bulunmasıyla gazyağı diğer bir kaynak olmuş, 1879'da Edison tarafından ticarileştirilen akkor telli lambayla aydınlatma tekniğinde yeni bir çığır açılmıştır (Özkaya ve Tüfekçi, 2011). Günümüzde aydınlatma evde, sokakta, fabrikalarda ve hayatın pek çok alanında vazgeçilmez bir ihtiyaç haline gelmiştir.

Dünya genelindeki 30 milyar adet lambanın (ışık noktası) yıllık tükettiği toplam elektrik enerjisi miktarının, toplam elektrik tüketiminin %19'una karşılık geldiği açıklanmaktadır (Zissis, 2009). Elektrik enerjisinin büyük oranda fosil kaynaklı yakıtlardan üretildiği ve bu kaynakların hızla tükendiği göz önüne alındığında verimli aydınlatma teknik ve teknolojilerinin kullanılmasının önemi ortaya çıkmaktadır.

LED ışık kaynakları gerek uzun ömür beklentileri gerekse enerji tasarruf potansiyelleriyle günümüzde diğer ışık kaynaklarının önüne geçmeye başlamıştır. Bununla birlikte teknik açıdan gerekli hesaplama, analiz ve değerlendirmeleri yapılmadan geliştirilen LED ışık kaynaklı armatürlerin beklentileri karşılayabilmeleri de mümkün olamamaktadır. Her yeni gelişen teknolojiye olduğu gibi yüksek güçlü LED'lerin de yerini alacağı ışık kaynaklarına göre üstünlük ve zayıflıkları bulunmaktadır. Özellikle yüksek ışık akısı bir başka deyişle yüksek güç gereksiniminin bulunduğu alanlarda LED ışık kaynaklı armatürlerin ısıl yönetim problemleri ortaya çıkabilmektedir. Çünkü LED'ler sürücüden çektikleri elektriksel gücün bir bölümünü optik güce dönüştürürken önemli bir bölümünü de ısıl güç olarak açığa çıkarmaktadır. Isıl yönetimi düzgün yapılmayan armatürlerde açığa çıkan ısıl güç, armatür içindeki sıcaklıkları LED'lerin çalışması açısından elverişsiz düzeylere yükseltebilmektedir. Bu durum ışık kaynaklarında geri dönüşü olmayan yapısal bozulmalara neden olabilmektedir.

LED ışık kaynaklarının bir türü olan COB (Chip On Board) LED'ler ile çok sayıda tekil LED çipi kullanılarak elde edilebilecek ışık akısı değerleri daha az sayıda ışık

kaynağı kullanılarak elde edilebilmektedir. Tekil LED kullanılması durumunda ışık kaynakları soğutucu üzerine belirli aralıklarla yerleştirilerek sıcaklığın soğutucu yapı üzerinde düzgün bir şekilde dağılması sağlanabilmektedir. Fakat COB LED kullanımında ısı soğutucu üzerine daha dar bir bölgeden yayılmaktadır. Bu durum COB LED ışık kaynaklı armatürlerin ısı tasarım aşamasını daha kritik hale getirmektedir. COB LED ışık kaynaklarının kullanıldığı yüksek güçlü armatürlerdeki soğutma gereksinimi bu tez kapsamındaki çalışmaya temel oluşturmuştur.

Tezin amacı COB LED ışık kaynaklı, yüksek güç gereksinimi olan bir endüstriyel armatür prototibinin ısı yönetimiminin farklı soğutma çözümleriyle gerçekleştirilmesi ve elde edilen performansın değerlendirilmesi özelinde, sıklıkla kullanılan kanatlı soğutma sistemlerine ısı borularının ilavesinin etkisinin araştırılması olarak belirlenmiştir. Yapılan literatür çalışmalarında çeşitli açılardan ön plana çıkan bu iki pasif soğutma yönteminin, tasarlanan bir armatür prototibine uygulanarak karşılaştırmalı değerlendirmesinin yapılması hedeflenmektedir. Armatür ısı yönetimi açısından önemli olduğu düşünülen çeşitli parametrelerin etkisinin de istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmesi amaçlanmaktadır. Bir bütün içindeki farklı parametrelerin ısı yönetime etkilerinin ele alınmasının, sektördeki bileşen seçici ve uygulayıcısı işlevindeki armatür tasarımcıları ve üreticileri için de yararlı bir kaynak oluşturacağı düşünülmektedir.

Tezin ikinci bölümünde LED'lerin yapısı, çalışması ve teknolojik gelişimi ele alınmaktadır. Tezin ortaya çıkmasının sebebi olan LED özelliklerinin sıcaklıktan olumsuz etkilenmesi ile ilgili laboratuvar ölçümlerine dayanan sonuçlara yer verilmektedir. Soğutma sistemleri ile ilgili yapılan literatür çalışması da bu bölümde yer almaktadır. Literatür çalışması sırasında soğutma sistemleri incelenerek üstünlük ve zayıflıkları belirlenmiştir. Değerlendirmeler sonucunda soğutma sistemi olarak ön plana çıkanlar sadece kanatlı ve ısı borulu-kanatlı soğutma sistemleri olmuştur. Bu iki soğutma sistemine sahip armatür prototiplerinin performanslarının karşılaştırılması tezin ana amacını oluşturmaktadır.

Tezin üçüncü bölümünde yüksek güçlü endüstriyel armatür prototibinde kullanılacak olan COB LED'in seçimi yapılmış, laboratuvar ölçümleri ile ışık akısı, etkinlik faktörü, optik gücü gibi aydınlatma tasarımında önemli rol oynayan özellikleri belirlenmiştir. Çalışmaların endüstriyel armatür üzerinden yürütülmesinin nedeni, bu alanda yüksek ışık akısı ve yüksek güç gereksinimi olmasıdır.

Tezin dördüncü bölümünde, sadece kanatlı ve kanatlar ile ısı borularının birlikte kullanıldığı iki armatür prototibinin ısı simülasyonları ve deneysel ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre iki soğutma sistemi karşılaştırılmıştır.

Beşinci bölümde, ısı simülasyonlar ve deneysel ölçümlerle doğrulaması gerçekleştirilen iki farklı soğutma sistemine sahip armatür prototibi çeşitli parametreler açısından istatistiksel yöntemlerle değerlendirilmiştir. Öncelikle tam faktöriyel analizler ile genel bir değerlendirme yapılmış, sonrasında regresyon analizleriyle daha detaylı irdelemeler gerçekleştirilmiştir. Her iki soğutma sistemi için de regresyon denklemleri elde edilmiştir.

Tezin son bölümünde ise tüm bu çalışma boyunca elde edilen sonuçlar ele alınmakta, çalışmanın literatüre yapmış olduğu katkı ortaya konulmakta ve ilerleyen aşamalarda yapılması yararlı olacak çalışmalar özetlenmektedir.



## 2. LED TEKNOLOJİSİ VE SOĞUTMA SİSTEMLERİ

Bu bölümde ilk olarak LED ışık kaynaklarının yapısı ve özellikleri ile ilgili genel bilgilere, ardından sıcaklığın LED özelliklerine etkisinin belirlenebilmesi amacıyla yapılan ölçüm sonuçlarına yer verilmektedir. Ayrıca LED ışık kaynaklı armatürlere uygulanabilecek soğutma yöntemleri ile ilgili literatür çalışması ve değerlendirmesi yapılmaktadır.

### 2.1 LED Işık Kaynaklarının Yapısı, Özellikleri ve Gelişimi

LED'ler elektriğin sadece bir yönde ilerlemesine izin veren elektronik elemanlar olup elektrik akımının üzerlerinden akmasıyla ışık yayarlar. Tıpkı normal diyotlarda olduğu gibi; LED'ler p-n jonksiyonu oluşturan, safsızlıklarla katkılandırılmış yarı iletken malzemeli çipten oluşmaktadır (Zissis, 2009).

LED doğası gereği tek renklidir. İlk ticari LED'ler kırmızı olmakla birlikte, günümüzde LED ışık kaynakları ile hemen hemen tüm renkler elde edilebilmektedir. LED'lerin genel aydınlatma piyasasına önemli ölçüde girebilmeleri, beyaz ışığın yüksek etkinlik faktörleriyle üretimi sayesinde mümkün olmuştur (Zissis, 2009).

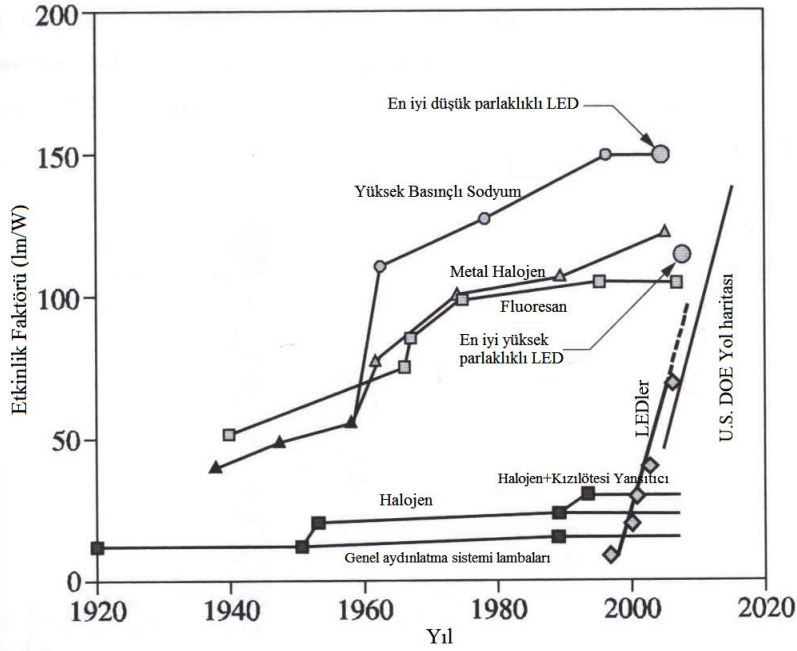
LED'lerde beyaz ışığın eldesinde kullanılan yöntemler şu şekildedir (Zissis, 2009):

Yöntem 1. Kısa dalga boylarında ışıma yapan bir diyotun, kısa dalga boylarındaki ışınları absorbe edip bunları uzun dalga boylarına dönüştüren fosfor ile kaplanması: Bu yöntem günümüzde beyaz ışık eldesinde yaygın bir şekilde kullanılmaktadır.

Yöntem 2. Mor ötesi bölgede ışıma yapan bir diyot ile bir veya daha fazla fosfor tabakasının birleştirilmesi: Bu yöntemle mor ötesi ışık görünür bölge olarak adlandırılan 380 nm – 780 nm arasındaki radyasyonlara dönüştürülür .

Yöntem 3. Farklı görünür dalga boylarında ışıma yapan en az üç adet diyotun birleştirilmesi: Genelde kırmızı, yeşil ve mavi renklerdeki radyasyonların kullanıldığı bu yöntem RGB tekniği olarak da adlandırılmaktadır.

Bir ışık kaynağının etkinlik faktörü, kaynaktan çıkan toplam ışık akısının kaynağın harcadığı toplam gücüne oranı olup lümen/Watt (lm/W) birimiyle ifade edilir (Özkaya ve Tüfekçi, 2011). Şekil 2.1’de çeşitli ışık kaynaklarının etkinlik faktörlerinin zamanla gelişimi görülmektedir (Zissis, 2009). Şekil 2.1’den de görüldüğü gibi 1990’lı yıllardan itibaren genel aydınlatma amaçlı kullanımda olan LED’lerin (ışık yayan diyot) etkinlik faktörleri zaman içinde hızlı bir artış göstermiştir. 2014 yılının Mart ayında LED üreticisi bir firma olan Cree, beyaz, yüksek güçlü bir LED’in etkinlik faktörünü 350 mA sürüş akımı ve 5150 K renk sıcaklığında laboratuvar koşullarında 303 lm/W olarak açıklamıştır (Cree, 2014). Erişilen bu değer günümüzde halen güncelliğini korumaktadır.

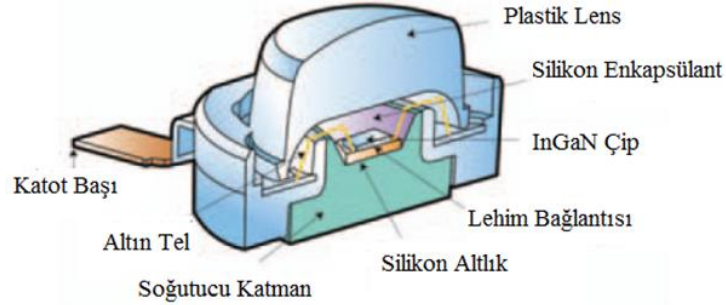


**Şekil 2.1** : Farklı ışık kaynaklarının etkinlik faktörlerinin zamanla gelişimi (Zissis, 2009).

LED’lerin aydınlatma sistemlerinde kullanılabilmesi için, çeşitli yardımcı elemanlarla desteklenerek farklı aydınlatma alanlarında kullanıma uygun armatürler haline getirilmeleri gerekmektedir.

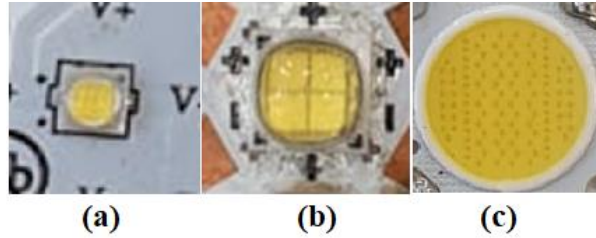
Işık yayan diyot (LED); elektrik akımı uygulandığında optik ışınım yayan p-n bağlantılı bir yarı iletken aygıtı içeren ışık kaynağı olarak tanımlanmaktadır. Yapısında bu LED’lerden bir veya daha fazlasını içeren düzenek ise LED paketini ifade etmektedir (Elektrik Lambaları ve Aydınlatma Armatürlerinin Enerji Etiketlemesine Dair Tebliğ (SGM-2015/9), 2015).

Bir LED paketinin yapısında P-N yarıiletken jonksiyon (birleşim) bölgesi, elektriksel bağlantı elemanları, ışığın istenilen şekilde yayılmasına olanak veren lens (yayıcı yüzey) ve yapıda oluşan ısının uzaklaştırılabilmesi amacıyla kullanılan soğutucu katman bulunur. Şekil 2.2’de örnek bir LED paketinin yapısı görülmektedir.



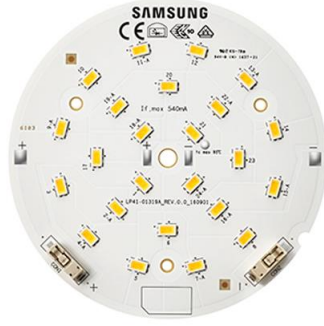
**Şekil 2.2 :** Bir LED paketinin yapısı (Petroski, 2006).

LED ışık kaynakları Şekil 2.3(a)’da görüldüğü gibi tekil çipli olabildiği gibi Şekil 2.3(b)’deki gibi çoğul çipli olarak da üretilebilmektedir. Ayrıca temelde çoğul çiplerden oluşan fakat üretici tarafından tek bir modül oluşturmak üzere doğrudan bir altlığa bağlanan COB LED’ler de bulunmaktadır (Miron,2016). Bir COB’de, çipler daha az yer kaplayacak şekilde monte edilerek LED çiplerinin en yüksek potansiyeli elde edilebilir (Miron,2016). Şekil 2.3(c)’de bir COB LED örneği görülmektedir.



**Şekil 2.3 :** LED örnekleri: (a)Tekil çipli, (b) Çoğul çipli, (c) COB (Chip on Board)

Bir veya daha fazla LED paketini bir baskı devre kartı (PCB) üzerinde içeren düzeneğe LED modül adı verilir ve bu düzenek elektriksel, optik mekanik ve ısı bileşenler, arayüzler ve kumanda düzeneği içerebilir (Elektrik Lambaları ve Aydınlatma Armatürlerinin Enerji Etiketlemesine Dair Tebliğ (SGM-2015/9), 2015). Şekil 2.4’te bir LED modül görülmektedir.



**Şekil 2.4 :** LED Modül (Url-1).

LED’lerde çalışma esnasında sıcaklıklar yükselmektedir. En yüksek sıcaklığın olduğu yer ise jonksiyon (birleşim) bölgesidir. Jonksiyon bölgesi, akım uygulandığında p-n yarı iletkenlerinin arasında elektron geçişinin olduğu ve fotonların açığa çıktığı bölge olarak tanımlanabilir.

Yüksek güçlü LED’lerde çalışma esnasında açığa çıkan ısının düzgün ve sürekli bir şekilde yapıdan uzaklaştırılabilmesi için ısıl yönetim sistemine gerek duyulmaktadır. Şekil 2.5’te LED soğutmasında kullanılabilecek kanatlı tip bir soğutucu örneği görülmektedir.



**Şekil 2.5 :** LED soğutucu örneği (Url-2).

LED ışık kaynaklı aydınlatma armatürlerinde farklı fotometrik ışık dağılımları reflektörler ya da lensler ile sağlanmaktadır. Şekil 2.6 ve Şekil 2.7’de sırasıyla lens ve reflektör örnekleri görülmektedir.

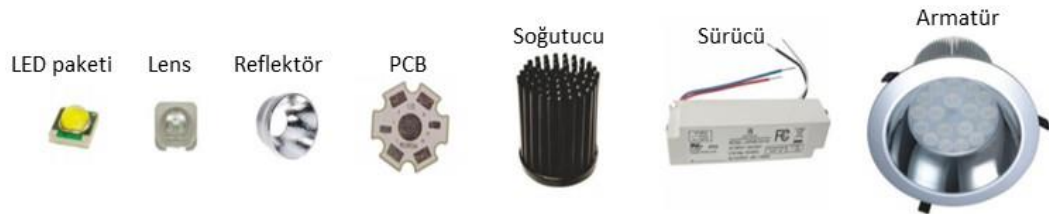


**Şekil 2.6 :** Lens örneği (Url-3).



Şekil 2.7 : Reflektör örneği (Url-4).

LED ışık kaynaklı armatürlerin elektrik şebeke bağlantılarında sürücülere ihtiyaç vardır. LED ışık kaynaklı aydınlatma armatürleri bu elemanların birleştirilmesiyle meydana gelmektedir. Şekil 2.8’de bu süreç ve LED’li armatür elemanları görülmektedir.



Şekil 2.8 : LED ışık kaynaklı armatür elemanları (Onaygil, 2013).

## 2.2 Sıcaklık Artışının LED Işık Kaynaklarının Özelliklerine Etkisi

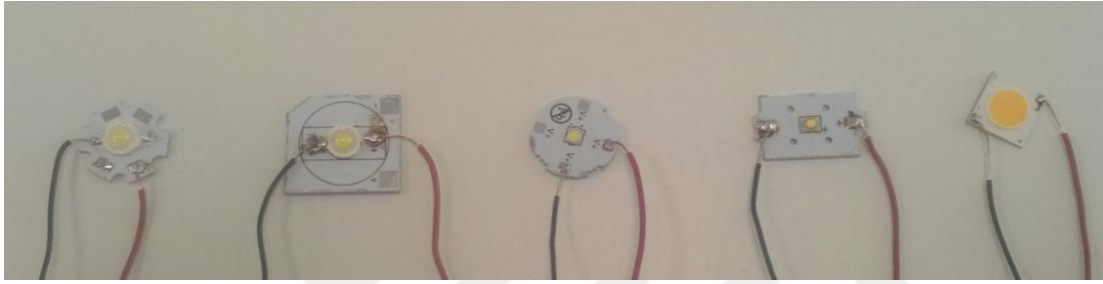
Teknolojik gelişmelerle birlikte LED ışık kaynaklarının verimleri ve etkinlik faktörlerinde meydana gelen hızlı artışlar, bu ışık kaynağının tüm genel aydınlatma sistemlerinde kullanımına yönelik isteği arttırmaktadır. Diğer yandan önemli bir olumsuzluk olarak, LED ışık kaynakları şebekeden çektikleri elektriksel gücün bir bölümünü optik güce dönüştürürken geriye kalan büyük bir bölümü de ısı gücü olarak yayılmaktadır (Denklem 2.1). Oluşan bu ısı LED ışık kaynağının ilgili katmanlarından düzgün ve sürekli bir şekilde uzaklaştırılmadığında, ortamdaki sıcaklık sürekli artış göstermektedir.

$$P_{\text{elektrik}} = P_{\text{optik}} + P_{\text{ısı}} \quad (2.1)$$

Günümüzde kullanılan yüksek güçlü LED’lerin teknik ve fotometrik özelliklerinin sıcaklıkla değişimlerinin doğru olarak belirlenmesi, yapılacak tasarımların güvenilir olması açısından çok önemlidir. Sıcaklığın LED’lerin ışık akısı, etkinlik faktörü,

elektriksel güç, optik ve ısı güçler, verim, renk (CCT, Ra) gibi özelliklerine olan etkilerinin değerlendirilmesi amacıyla İTÜ, Enerji Enstitüsü, Enerji Planlaması ve Yönetimi Anabilim Dalı, Fotometri ve Radyometri Laboratuvarı'ndaki mevcut cihazlarla yüksek güçlü LED örneklerinin karakteristik değerleri incelenmiştir (Url-5). Gerçekleştirilen ölçümlerden elde edilen veriler kullanılarak hazırlanan makale "Lighting Research and Technology" dergisinde yayımlanmıştır (Yurtseven ve diğ, 2016).

Çalışmada, piyasadan satın alınan farklı üreticilere ait ve çeşitli PCB'ler üzerine monte edilmiş 24 adet LED örneği kullanılmıştır (Şekil 2.9).

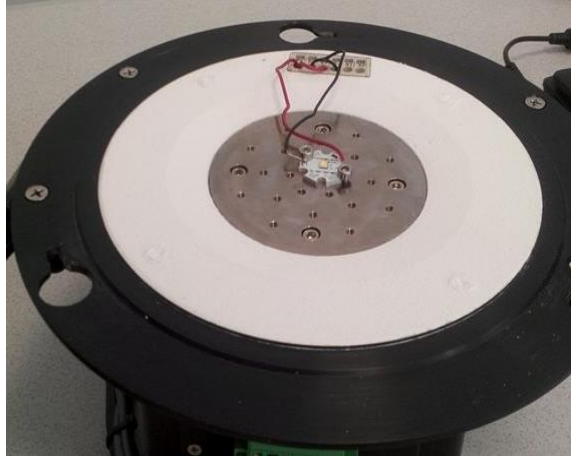


**Şekil 2.9 :** Çalışmada kullanılan yüksek güçlü LED örnekleri.

Ölçümler için laboratuvarında bulunan bir metre çaplı, sıcaklık kontrollü Ulbricht küresi kullanılmıştır (Şekil 2.10). PCB üzerine monte edilmiş LED'ler bir kontrolör ile sıcaklığın değiştirilebildiği alt plaka üzerine Şekil 2.11'deki gibi yerleştirilmiştir.



**Şekil 2.10 :** Sıcaklık kontrollü, 1m çaplı Ulbricht küresi.



**Şekil 2.11** : Sıcaklığı kontrol edilebilen alt plaka üzerine ölçüm için monte edilmiş LED örneği.

LED'lerin ışık akısı, etkinlik faktörü, çektikleri elektriksel güç, yaydıkları optik ve ısı güçleri, verim ve renk özellikleri nominal sürüş akımında altı sıcaklık kademesi (25°C - 35°C - 45°C - 55°C - 65°C - 75°C) için ölçülmüştür. Piyasadan satın alınan ve muhtelif PCB'ler üzerine monte edilen LED'lerin jonksiyon sıcaklıklarının hesaplanması için gerekli bilgilerin (ısı direnç değerleri) temini mümkün olmadığından, LED'lerin monte edildiği Ulbricht Küresi'nin sıcaklık kontrollü alt plakasının sıcaklığı yukarıda belirtilen aralıklarla değiştirilerek istenilen sıcaklık farkları oluşturulmuştur. Tüm LED'lerin özellikleri 10 °C'lık sıcaklık farklarıyla ölçüleceğinden ve çalışmanın amacının da sıcaklık farkının LED karakteristik özellikleri üzerinde etkisinin incelenmesi olduğu dikkate alınarak, bu yaklaşımın karşılaştırma açısından uygun olduğuna karar verilmiştir. Çalışmada kullanılan 24 adet LED örneğinin nominal sürüş akımları ve tipleri Çizelge 2.1'de verilmektedir.

**Çizelge 2.1** : LED örneklerinin nominal sürüş akımları ve tipleri.

Numara	Nominal Sürüş Akımı (mA)	Tip
1-11	350	Tekil Çip
12-20	700	Tekil Çip
21	700	Çoğul Çip
22	200	Çoğul Çip
23	270	COB
24	400	COB

### 2.2.1 Sıcaklığın değerlendirilen LED'lerin ışık akısına etkisi

Bu bölümde sıcaklığın LED'lerin ışık akısı üzerine etkisi incelenmektedir. Çizelge 2.2, Çizelge 2.3 ve Çizelge 2.4'te nominal sürüş akımları sırasıyla 350 mA, 700 mA ve bunlardan farklı nominal sürüş akımına sahip olan LED'lerin ışık akılarının, altı

sıcaklık kademesindeki değerleri verilmektedir. Tüm LED'lerin ışık akıları artan sıcaklıkla azalma göstermiştir. Bu azalma değişik LED'ler için farklı oranlarda gerçekleşmiştir.

**Çizelge 2.2 :** Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED'lerin sıcaklığa bağlı ışık akıları [lm].

Numara	Işık akısı [lm] - 350 mA					
	25°C	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C
1	161,6	159,5	157,2	154,6	151,8	148,8
2	105,4	103,6	101,6	99,6	97,6	95,5
3	130,6	128,1	125,5	122,9	120,2	117,5
4	135,1	132,6	129,9	127,2	124,3	121,3
5	131,8	129,3	126,8	124,0	121,3	118,4
6	107,7	107,1	106,2	104,9	103,1	100,9
7	112,5	110,3	107,9	105,5	103,0	100,3
8	90,3	88,6	86,8	84,9	83,0	81,0
9	102,0	100,0	97,8	95,5	93,1	90,5
10	95,8	93,7	91,5	89,2	86,8	84,3
11	110,6	108,4	106,1	103,7	101,2	98,5

**Çizelge 2.3 :** Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED'lerin sıcaklığa bağlı ışık akıları [lm].

Numara	Işık akısı [lm] - 700 mA					
	25°C	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C
12	279,1	274,4	269,4	264,5	259,6	254,6
13	196,8	191,8	186,6	181,2	175,4	169,5
14	195,4	191,6	187,7	182,2	176,2	170,6
15	220,0	215,3	210,1	204,4	198,4	192,0
16	256,7	255,1	252,8	249,8	246,2	242,0
17	235,9	231,6	226,9	221,7	216,0	210,0
18	194,7	190,7	186,4	182,0	177,4	172,6
19	181,4	177,4	173,2	168,9	164,4	160,0
20	244,5	241,8	238,5	234,5	229,8	224,5
21	976,3	962,2	945,0	925,1	903,1	879,4

**Çizelge 2.4 :** Farklı nominal sürüş akımlarına sahip LED'lerin sıcaklığa bağlı ışık akıları [lm].

Numara	Işık akısı [lm] - 200 mA					
	25°C	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C
22	338,7	331,8	324,7	317,6	310,3	302,7
Numara	Işık akısı [lm] - 270 mA					
	25°C	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C
23	1152,0	1131,0	1110,0	1087,0	1061,0	1035,0
Numara	Işık akısı [lm] - 400 mA					
	25°C	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C
24	380,5	376,5	371,2	365,9	359,3	351,9

Karşılaştırma yapılabilmesi için, ışık akılarının reel değerlerinin verildiği bu tablolara ek olarak bağıl ışık akısı tanımlaması da yapılmıştır. Bu tanıma göre 25 °C'deki ışık akısı değerleri %100 yani referans değer olarak kabul edilmiş ve diğer sıcaklık kademelerindeki bağıl ışık akıları (BIA) denklem (2.2) yardımıyla hesaplanmıştır.

$$BIA = \frac{\text{Belli sıcaklık kademesindeki ışık akısı [lm]}}{25\text{ °C'deki ışık akısı [lm]}} \times 100 \quad (2.2)$$

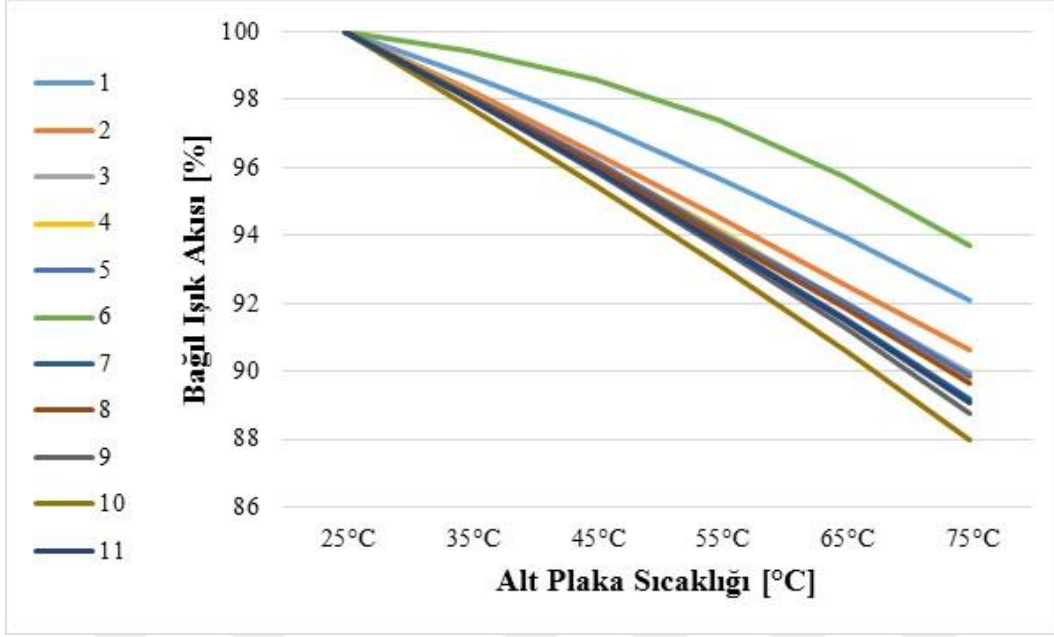
Bir örnek olarak 25 °C'den farklı bir sıcaklıkta, 75 °C'deki bağıl ışık akısı değerleri Çizelge 2.5'te görülmektedir. Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED'lerden bağıl ışık akısı 75°C'de en az ve en fazla düşüş gösterenler sırasıyla 6 ve 10 numaralı örnekler olurken, nominal sürüş akımı 700 mA'de sırasıyla 16 ve 13 numaralı LED örnekleri olmuştur. Şekil 2.12 ve Şekil 2.13'te nominal sürüş akımı sırasıyla 350 mA ve 700 mA olan LED örneklerinin sıcaklığa bağlı bağıl ışık akısı değişimleri görülmektedir.

Bu şekillerden de anlaşılabilceği gibi, nominal sürüş akımları aynı olan LED'lerin ışık akıları sıcaklık artışından çok farklı oranlarda etkilenmektedir. Minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki (25°C - 75°C) ışık akısı azalma oranı %14'ü bulabilmektedir.

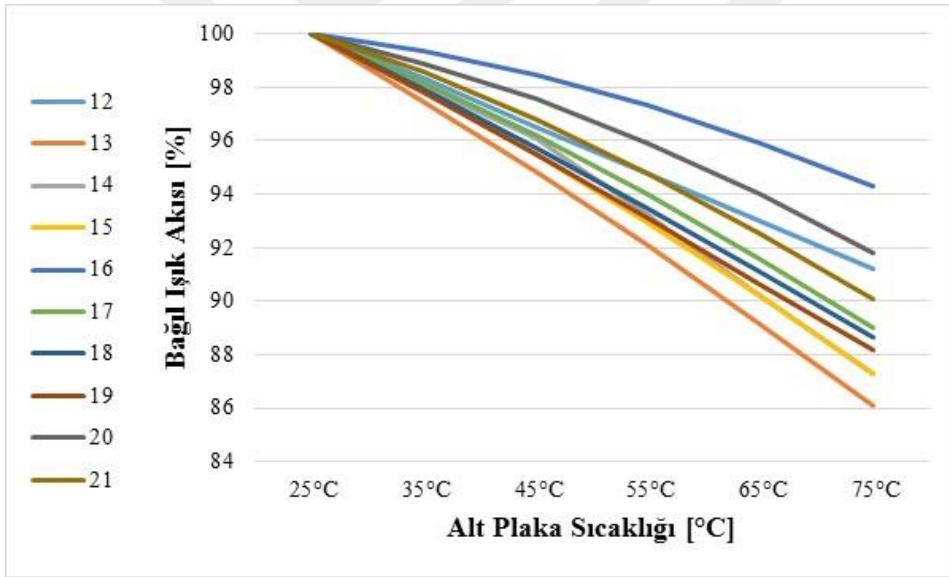
LED ışık kaynaklı armatürler tasarlanırken çalışma sıcaklığı dikkate alınarak kullanılacak yüksek güçlü LED'in bu sıcaklıktan etkilenme karakteristiğinin iyi bilinmesi, tasarım aşamasında hedeflenen ışık akısı değerlerine uygulamada da ulaşılabilmesini sağlayacaktır.

**Çizelge 2.5 : Ölçülen tüm LED'lerin 75°C'deki bağıl ışık akıları.**

Bağıl Işık Akısı [%]					
Numara	350 mA 75°C	Numara	700 mA 75°C	Numara	200 mA 75°C
1	92,1	12	91,2	22	89,4
2	90,6	13	86,1	No	270 mA
3	90,0	14	87,3		75°C
4	89,8	15	87,3	23	89,8
5	89,8	16	94,3	No	400 mA
6	93,7	17	89,0		75°C
7	89,2	18	88,6	24	92,5
8	89,7	19	88,2		
9	88,8	20	91,8		
10	88,0	21	90,1		
11	89,1				



Şekil 2.12 : Nominal sürüş akımını 350 mA olan LED’lerin bağıl ışık akılarının sıcaklıkla değişimi.



Şekil 2.13 : Nominal sürüş akımını 700 mA olan LED’lerin bağıl ışık akılarının sıcaklıkla değişimi.

### 2.2.2 Sıcaklığın değerlendirilen LED’lerin etkinlik faktörüne etkisi

Etkinlik faktörü, kaynaktan çıkan ışık akısının kaynağın çektiği toplam elektriksel güce oranıdır (Denklem 2.3).

$$\text{Etkinlik Faktörü} = \frac{\text{Işık akısı [lm]}}{\text{Toplam elektriksel güç [W]}} \quad (2.3)$$

Çizelge 2.6, Çizelge 2.7 ve Çizelge 2.8’de nominal sürüş akımları 350 mA, 700 mA ve bunlardan farklı nominal sürüş akımına sahip olan LED örneklerinin, altı sıcaklık basamağı için Ulbricht küresi ile ölçülen etkinlik faktörü değerleri verilmektedir. Bu çizelgelerdeki verilerden, artan sıcaklıkla etkinlik faktörünün azaldığı görülmektedir.

**Çizelge 2.6 :** Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED’lerin sıcaklığa bağlı etkinlik faktörleri [lm/W].

Numara	Etkinlik faktörü [lm/W] – 350 mA					
	25°C	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C
1	159,3	158,7	157,7	156,3	154,5	152,4
2	100,5	99,7	98,6	97,4	96,1	94,7
3	123,5	122,5	121,1	119,6	118,0	116,3
4	125,8	125,1	124,2	122,8	121,2	119,3
5	122,2	121,5	120,5	119,2	117,6	115,9
6	95,7	95,7	95,4	94,7	93,5	92,0
7	104,2	102,7	101,0	99,1	97,1	94,9
8	79,9	79,0	77,9	76,6	75,3	73,9
9	89,5	88,3	86,8	85,2	83,4	81,4
10	84,5	83,0	81,4	79,8	78,0	76,0
11	99,0	97,7	96,2	94,5	92,8	90,8

**Çizelge 2.7 :** Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED’lerin sıcaklığa bağlı etkinlik faktörleri [lm/W].

Numara	Etkinlik faktörü [lm/W] – 700 mA					
	25°C	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C
12	136,7	135,4	133,8	132,2	130,6	128,7
13	80,4	78,8	77,0	75,2	73,1	71,0
14	77,8	76,8	75,6	73,9	71,8	69,8
15	111,8	110,0	108,0	105,6	103,0	100,3
16	127,9	127,8	127,4	126,6	125,4	123,9
17	111,1	110,2	108,9	107,3	105,4	103,3
18	93,3	92,1	90,8	89,3	87,5	85,8
19	79,3	78,0	76,5	74,9	73,1	71,3
20	116,0	115,2	114,2	112,8	111,0	108,9
21	122,1	121,2	119,9	118,2	116,1	113,8

**Çizelge 2.8 :** Farklı nominal sürüş akımlarına sahip LED’lerin sıcaklığa bağlı etkinlik faktörleri [lm/W].

Numara	Etkinlik faktörü [lm/W] – 200 mA					
	25°C	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C
22	84,0	82,7	81,3	79,9	78,4	76,8
Numara	Etkinlik faktörü [lm/W] – 270 mA					
	25°C	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C
23	100,0	99,5	98,6	97,5	96,1	94,6
Numara	Etkinlik faktörü [lm/W] – 400 mA					
	25°C	35°C	45°C	55°C	65°C	75°C
24	95,1	95,2	94,7	93,5	92,0	90,4

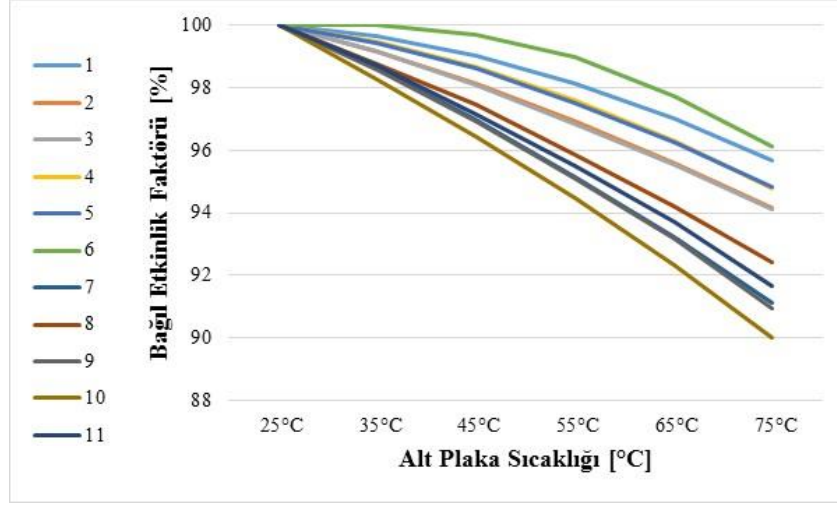
Ölçülen LED örneklerinin etkinlik faktörlerine sıcaklığın etkisinin değerlendirilebilmesi için bağıl etkinlik faktörü değeri hesaplanmıştır. Bu tanıma göre 25 °C'deki etkinlik faktörü değerleri %100 yani referans değer olarak kabul edilmiş ve diğer sıcaklık kademelerindeki bağıl etkinlik faktörleri (BEF) denklem 2.4 yardımıyla hesaplanmıştır.

$$BEF = \frac{\text{Belli sıcaklık kademesindeki etkinlik faktörü [lm/W]}}{25 \text{ °C'deki etkinlik faktörü [lm/W]}} \times 100 \quad (2.4)$$

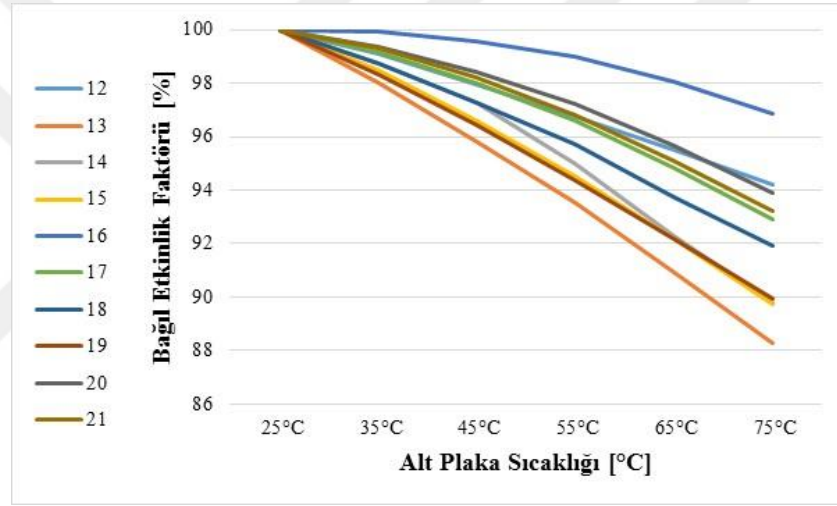
Çizelge 2.9'da LED örneklerinin bu çalışmadaki en yüksek sıcaklık seviyesi olan 75 °C'deki bağıl etkinlik faktörü değerleri görülmektedir. Bağıl etkinlik faktörleri artan sıcaklıkla farklı oranlarda azalma göstermiştir. Şekil 2.14 ve Şekil 2.15'te sırasıyla nominal sürüş akımı 350 mA ve 700 mA olan LED'lerin bağıl etkinlik faktörlerinin sıcaklığa bağlı değişimi verilmektedir. Tüm LED'lerin bağıl etkinlik faktörleri sıcaklık artışından olumsuz etkilenmiştir. Minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıkları (25°C-75°C) arasındaki etkinlik faktörü azalması %12'ye ulaşabilmektedir.

**Çizelge 2.9 :** Ölçülen tüm LED'lerin 75°C'deki bağıl etkinlik faktörleri.

<b>Bağıl Etkinlik Faktörü [%]</b>					
<b>Numara</b>	<b>350 mA</b>	<b>Numara</b>	<b>700 mA</b>	<b>Numara</b>	<b>200 mA</b>
	<b>75°C</b>		<b>75°C</b>		<b>75°C</b>
<b>1</b>	95,7	<b>12</b>	94,2	<b>22</b>	91,4
<b>2</b>	94,2	<b>13</b>	88,3	<b>No</b>	<b>270 mA</b>
<b>3</b>	94,1	<b>14</b>	89,8		<b>75°C</b>
<b>4</b>	94,8	<b>15</b>	89,7	<b>23</b>	94,5
<b>5</b>	94,8	<b>16</b>	96,9	<b>No</b>	<b>400 mA</b>
<b>6</b>	96,1	<b>17</b>	92,9		<b>75°C</b>
<b>7</b>	91,1	<b>18</b>	91,9	<b>24</b>	95,0
<b>8</b>	92,4	<b>19</b>	89,9		
<b>9</b>	90,9	<b>20</b>	93,9		
<b>10</b>	90,0	<b>21</b>	93,2		
<b>11</b>	91,7				



Şekil 2.14 : Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED'lerin bağıl etkinlik faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişimi.



Şekil 2.15 : Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED'lerin bağıl etkinlik faktörü değerlerinin sıcaklıkla değişimi.

### 2.2.3 Sıcaklığın değerlendirilen LED'lerin optik-ısı-elektriksel güçlerine ve verimlerine etkisi

LED'lerin çektiği elektriksel gücün bir bölümü optik güce dönüşürken geriye kalan bölümü ısı olarak yayılmaktadır. Çizelge 2.10, Çizelge 2.11 ve Çizelge 2.12'de nominal sürüş akımları sırasıyla 350 mA, 700 mA ve bunlardan farklı nominal sürüş akımlarına sahip olan LED örneklerinin, altı farklı sıcaklık kademesindeki optik-ısı-elektriksel güçlerinin minimum ve maksimum ölçüm sıcaklığı olan 25°C ve 75°C'deki değerleri görülmektedir. Bu tablolardan görülebileceği gibi, artan sıcaklıkla çekilen elektriksel güç azalmaktadır. Bunun yanı sıra, LED'lerin optik güçleri de artan sıcaklıkla azalma göstermiştir. Isıya dönüşen güç ise sıcaklık artışından optik ve elektriksel güçler kadar etkilenmemiştir.

**Çizelge 2.10** : Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED'lerin minimum-maksimum ölçüm sıcaklıkları için optik (Po), ısıl (P<sub>1</sub>) ve elektriksel (Pe) güçleri.

Numara	Güçler [W] - 350 mA					
	25 °C			75 °C		
	Po	P <sub>1</sub>	Pe	Po	P <sub>1</sub>	Pe
1	0,46	0,55	1,01	0,43	0,55	0,98
2	0,33	0,72	1,05	0,30	0,71	1,01
3	0,41	0,65	1,06	0,37	0,64	1,01
4	0,43	0,65	1,07	0,39	0,63	1,02
5	0,40	0,68	1,08	0,36	0,66	1,02
6	0,33	0,80	1,13	0,31	0,79	1,10
7	0,34	0,74	1,08	0,31	0,74	1,06
8	0,28	0,85	1,13	0,25	0,84	1,10
9	0,27	0,87	1,14	0,24	0,87	1,11
10	0,28	0,86	1,13	0,25	0,86	1,11
11	0,36	0,76	1,12	0,33	0,76	1,09

**Çizelge 2.11** : Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED'lerin minimum-maksimum ölçüm sıcaklıkları için optik (Po), ısıl (P<sub>1</sub>) ve elektriksel (Pe) güçleri.

Numara	Güçler [W] - 700 mA					
	25 °C			75 °C		
	Po	P <sub>1</sub>	Pe	Po	P <sub>1</sub>	Pe
12	0,85	1,20	2,04	0,77	1,20	1,98
13	0,65	1,80	2,45	0,58	1,81	2,39
14	0,54	1,97	2,51	0,48	1,97	2,44
15	0,64	1,33	1,97	0,56	1,36	1,92
16	0,74	1,27	2,01	0,69	1,26	1,95
17	0,69	1,43	2,12	0,62	1,41	2,03
18	0,61	1,47	2,09	0,56	1,45	2,01
19	0,57	1,71	2,29	0,52	1,72	2,24
20	0,73	1,38	2,11	0,66	1,40	2,06
21	2,86	5,14	8,00	2,57	5,16	7,73

**Çizelge 2.12** : Farklı nominal sürüş akımlarına sahip üç LED'in minimum-maksimum ölçüm sıcaklıkları için optik (Po), ısıl (P<sub>1</sub>) ve elektriksel (Pe) güçleri.

Numara	Güçler [W] - 200 mA					
	25 °C			75 °C		
	Po	P <sub>1</sub>	Pe	Po	P <sub>1</sub>	Pe
22	1,11	2,92	4,03	0,99	2,95	3,94
23	Güçler [W] - 270 mA					
	25 °C			75 °C		
	Po	P <sub>1</sub>	Pe	Po	P <sub>1</sub>	Pe
23	3,45	8,07	11,52	3,19	7,75	10,94
24	Güçler [W] - 400 mA					
	25 °C			75 °C		
	Po	P <sub>1</sub>	Pe	Po	P <sub>1</sub>	Pe
24	1,19	2,81	4,00	1,10	2,79	3,89

Bu tablolardaki değerlerden LED örneklerinin optik, ısı ve elektriksel güçlerinin sıcaklık ile değişimleri görülmektedir. Elektriksel gücün, optik güce dönüşüm oranı da ışık kaynağının verimini belirlemektedir (Denklem 2.5).

$$\text{Verim [\%]} = \frac{P_{\text{optik}} [\text{W}]}{P_{\text{elektrik}} [\text{W}]} \times 100 \quad (2.5)$$

Ölçüm sonuçlarından optik ve elektriksel gücün artan sıcaklıkla azaldığı, ısı gücü değişimindeki farklılığın ise daha az olduğu ortaya çıkmaktadır. Bu durum, verimin artan sıcaklıkla azaldığını göstermektedir. 350 mA, 700 mA ve bunlardan farklı nominal sürüş akımlarında çalıştırılan LED örneklerinin Ulbricht küresi ile ölçüm sonucunda elde edilen verim değerleri sırasıyla Çizelge 2.13, Çizelge 2.14 ve Çizelge 2.15'te minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıkları olan 25°C ve 75°C için verilmektedir. Çizelgeler 50°C'lik sıcaklık farkında verimde meydana gelen yüzdesel değişimi de göstermektedir.

Ölçüm sonuçları incelendiğinde, %40 değerine yakın ve bu değeri aşan verim değerlerine sahip LED'lerin piyasada bulunduğu görülmektedir. Bu sonuç, LED ışık kaynaklı armatür üretiminde kullanılacak LED'in seçiminin önemini açıkça ortaya koymaktadır. Yüksek verim değerlerine sahip LED'ler ile tasarlanacak armatürlerde ısıya dönüşecek enerji daha az olacağından, bu durum soğutma sistemlerinin tasarımını da doğrudan etkileyecektir. Tasarıma başlamadan önce kullanılacak olan LED'lerin karakteristik özelliklerinin ölçümlerle belirlenmesinin önemli olduğu görülmektedir.

**Çizelge 2.13 :** Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED örneklerinin minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki verimleri ve iki sıcaklık arasındaki yüzdesel değişimleri.

Numara	Verim [%] - 350 mA		
	25 °C	75 °C	Değişim [%]
1	45,8	44,1	-3,6
2	31,6	29,9	-5,5
3	38,3	36,5	-4,7
4	39,7	38,4	-3,4
5	36,9	35,2	-4,4
6	29,2	28,4	-2,8
7	31,8	29,6	-6,9
8	24,5	22,9	-6,5
9	23,9	21,9	-8,5
10	24,6	22,5	-8,2
11	32,1	30,3	-5,6

**Çizelge 2.14 :** Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED örneklerinin minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki verimleri ve iki sıcaklık arasındaki yüzdesel değişimleri.

Numara	Verim [%] - 700 mA		Değişim [%]
	25 °C	75 °C	
12	41,4	39,2	-5,5
13	26,4	24,3	-7,7
14	21,4	19,5	-9,0
15	32,3	29,1	-9,9
16	36,7	35,3	-3,7
17	32,5	30,7	-5,8
18	29,5	27,7	-6,0
19	25,1	23,1	-7,9
20	34,5	32,1	-6,9
21	35,8	33,2	-7,0

**Çizelge 2.15 :** Farklı nominal sürüş akımına sahip üç LED'in minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki verimleri ve iki sıcaklık arasındaki yüzdesel değişimleri.

Numara	Verim [%] - 200 mA		Değişim [%]
	25 °C	75 °C	
22	27,4	25,2	-8,3
	Verim [%] - 270 mA		Değişim [%]
	25 °C	75 °C	
23	30,0	29,2	-2,7
	Verim [%] - 400 mA		Değişim [%]
	25 °C	75 °C	
24	29,7	28,3	-4,8

#### 2.2.4 Sıcaklığın değerlendirilen LED'lerin renk özelliklerine etkisi

Işık kaynaklarının seçiminde, kaynağın renk özellikleri de göz önünde bulundurulması gereken kriterlerdir. Aydınlatma sisteminin kullanım ömrü boyunca ışık kaynaklarının renk özelliklerinin değişmemesi istenir. LED'lerin renk özelliklerinin çalışma sırasında meydana gelen sıcaklık artışından ne şekilde etkileneceğinin irdelenebilmesi için LED örneklerinin “renk sıcaklığı” (Correlated Color Temperature -CCT) ve “renksel geriverim endeksi” (Color Rendering Index -CRI, Ra) değerleri altı sıcaklık kademesi için ölçülmüştür.

#### 2.2.4.1 Sıcaklığın değerlendirilen LED'lerin renk sıcaklığına (CCT) etkisi

İncelenen 24 adet LED örneğinin 25 °C alt tabaka sıcaklığındaki CCT değerleri referans alınarak, tüm ölçüm sıcaklıklarındaki CCT değerlerinin referans değerden farkları ( $\Delta$ CCT) hesaplanmıştır (Denklem 2.6).

$$\Delta\text{CCT [K]} = \text{CCT (Tüm sıcaklık basamaklarında) [K]} - \text{CCT (25 °C) [K]} \quad (2.6)$$

Çizelge 2.16, Çizelge 2.17 ve Çizelge 2.18'de sırasıyla 350 mA, 700 mA ve bunlardan farklı nominal sürüş akımlarında çalıştırılan LED örneklerinin 25°C'deki referans CCT değerleri ile tüm ölçüm sıcaklıklardaki  $\Delta$ CCT fark değerleri verilmektedir. Bu çizelgelerden görüldüğü gibi, sıcaklıktaki değişiklikler LED örneklerinin CCT'lerine farklı oranlarda etki etmiştir. Örnek 1 ve Örnek 8'in CCT değerleri sıcaklık değişiminden neredeyse hiç etkilenmezken, Örnek 13'ün CCT değeri 1000 K'i aşan bir değişiklik göstermiştir. Bu bulgular, LED bazlı armatür tasarlanırken sıcaklık değişiminin kullanılacak LED'in renk sıcaklığına olan etkisinin irdelenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

**Çizelge 2.16 :** Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED örneklerinin tüm ölçüm sıcaklıklardaki  $\Delta$ CCT'leri.

Numara	Ref. [K]	$\Delta$ CCT [K] - 350 mA					
	25 °C	25 °C	35 °C	45 °C	55 °C	65 °C	75 °C
1	3986	0	-5	-8	-8	-10	-7
2	3176	0	5	6	10	13	20
3	5401	0	2	-5	8	11	24
4	6737	0	20	42	66	90	130
5	4721	0	-12	-18	-23	-22	-22
6	4848	0	33	65	107	159	215
7	5765	0	28	66	106	154	206
8	2794	0	0	2	2	4	8
9	3211	0	25	53	83	115	143
10	4452	0	43	83	127	177	231
11	7286	0	105	222	341	470	632

**Çizelge 2.17 :** Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED örneklerinin tüm ölçüm sıcaklıklardaki  $\Delta$ CCT'leri.

Numara	Ref. [K]	$\Delta$ CCT [K] - 700 mA					
	25 °C	25 °C	35 °C	45 °C	55 °C	65 °C	75 °C
12	4097	0	-8	-10	-12	-11	-14
13	7148	0	201	498	756	932	1093
14	3273	0	43	94	148	186	225
15	4012	0	24	49	79	117	161
16	3791	0	10	21	34	50	66
17	3983	0	8	19	32	50	71
18	3747	0	-2	-3	-3	-4	2
19	3004	0	-5	-11	-16	-18	-22
20	3855	0	9	22	37	57	80
21	3952	0	17	40	63	92	123

**Çizelge 2.18 :** Diğerlerinden farklı nominal sürüş akımına sahip olan 3 LED örneğinin tüm ölçüm sıcaklıklardaki  $\Delta$ CCT'leri.

Numara	Ref. [K]	$\Delta$ CCT [K] - 200 mA					
	25 °C	25 °C	35 °C	45 °C	55 °C	65 °C	75 °C
22	2653	0	-1	0	3	8	16
	Ref. [K]	$\Delta$ CCT [K] - 270 mA					
	25 °C	25 °C	35 °C	45 °C	55 °C	65 °C	75 °C
23	5033	0	31	60	92	128	168
	Ref. [K]	$\Delta$ CCT [K] - 400 mA					
	25 °C	25 °C	35 °C	45 °C	55 °C	65 °C	75 °C
24	2857	0	2	4	6	8	10

#### 2.2.4.2 Sıcaklığın değerlendirilen LED'lerin renksel geriverim endeksine ( $R_a$ ) etkisi

Çizelge 2.19, Çizelge 2.20 ve Çizelge 2.21'de sırasıyla 350 mA, 700 mA ve bunlardan farklı nominal sürüş akımlarında çalıştırılan LED örneklerinin minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıkları olan 25°C ve 75°C'deki renksel geriverim endeksleri ve bu iki sıcaklık arasında renksel geriverim endeksinin yüzdesel değişimi verilmiştir. Bu tablolardan anlaşılacağı gibi, sıcaklık artışının LED örneklerinin renksel geriverim endeksleri üzerine değişen oranlarda artış ve azalış şeklinde etkileri olmuştur. Işık akısında olduğu gibi, etki eğilimi aynı yönde gerçekleşmemiştir. Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED'lerin renksel geriverim endeksi 50°C'lik sıcaklık farkında maksimum %4 civarında değişim gösterirken, nominal akımı 700 mA olan LED'lerin renksel geriverim endeksindeki maksimum değişim %5 civarında olmuştur.

**Çizelge 2.19 :** Nominal sürüş akımı 350 mA olan LED örneklerinin minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki Ra'ları ve Ra'ların bu iki sıcaklık arasındaki yüzdesel değişimleri.

Numara	Ra - 350 mA		
	25 °C	75 °C	Değişim [%]
1	72,8	73,2	0,51
2	84,3	84,1	-0,26
3	74,2	75,6	1,79
4	70,3	72,0	2,43
5	71,7	72,4	0,96
6	71,1	72,4	1,96
7	73,0	75,1	3,00
8	75,1	75,2	0,13
9	62,8	63,2	0,69
10	71,1	72,4	1,79
11	73,4	76,3	3,97

**Çizelge 2.20 :** Nominal sürüş akımı 700 mA olan LED örneklerinin minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki Ra'ları ve Ra'ların bu iki sıcaklık arasındaki yüzdesel değişimleri.

Numara	Ra - 700 mA		
	25 °C	75 °C	Değişim [%]
12	79,6	80,0	0,44
13	72,1	75,5	4,76
14	62,6	63,8	1,97
15	73,1	73,7	0,77
16	71,4	71,4	-0,08
17	74,6	75,7	1,50
18	85,7	86,8	1,37
19	84,1	84,6	0,62
20	72,7	72,6	-0,07
21	76,3	76,6	0,41

**Çizelge 2.21 :** Farklı nominal sürüş akımına sahip 3 LED örneğinin minimum ve maksimum ölçüm sıcaklıklarındaki Ra'ları ve Ra'ların bu iki sıcaklık arasındaki yüzdesel değişimleri.

Numara	Ra - 200 mA		
	25 °C	75 °C	Değişim [%]
22	80,1	79,5	-0,74
	Ra - 270 mA		
	25 °C	75 °C	Değişim [%]
23	76,5	78,4	2,56
	Ra - 400 mA		
	25 °C	75 °C	Değişim [%]
24	81,7	81,3	-0,40

Bu bölümde elde edilen ölçüm sonuçlarından, LED'lerin ışık akısı, etkinlik faktörü ve verimlerinin sıcaklık artışından olumsuz etkilendikleri belirlenmiştir. Diğer yandan, LED örneklerinin sıcaklıktan etkilenme karakteristikleri birbirinden farklı olmuştur.

Sıcaklık artışının bazı LED örneklerinin renk özelliklerinde, özellikle renk sıcaklıklarında dikkate değer değişiklikler meydana getirdiği de gözlemlenmiştir.

### 2.2.5 Sıcaklığın LED'lerin ömrüne etkisi

Jonksiyon (birleşim) sıcaklığının etki ettiği parametrelerden bir diğeri de ömürdür. Sıcaklığın LED ömrüne olan etkisinin incelenmesine başlanmadan önce ömür tanımının yapılması gerekmektedir.

ASSIST'e göre (Alliance for Solid-State Illumination Systems and Technologies) bir LED komponentin ya da LED'li sistemin ömrü komponentin ya da sistemin iki performans kriterine ulaştığı ( $L_{70}$ ,  $L_{50}$ ) çalışma süresidir (Url-6). Bu süreler ilgili dökümanlarda belirtilen koşullar altında ölçülmektedir.

$L_{70}$  (saat): Başlangıç ışık akısının %70'inin korunduğu süredir (Url-6).

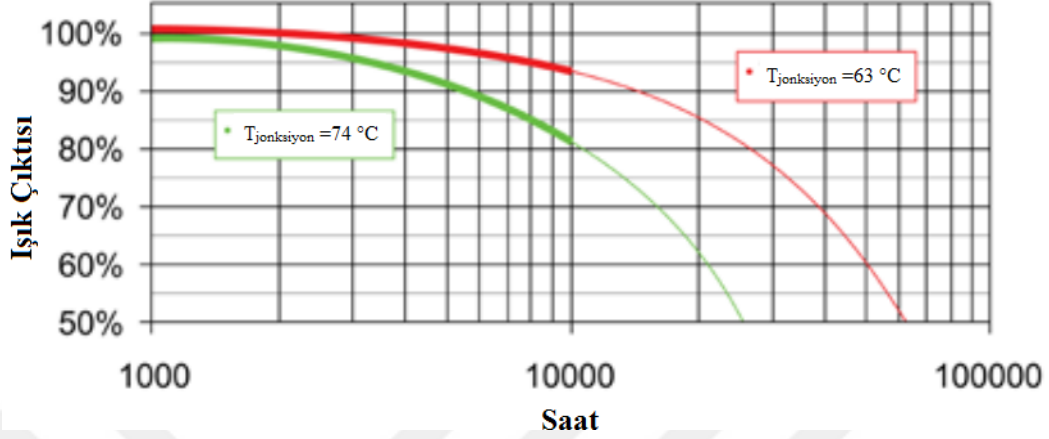
$L_{50}$  (saat): Başlangıç ışık akısının %50'sinin korunduğu süredir (Url-6).

Genel aydınlatma uygulamalarında başlangıç ışık akısının %30 azalması durumunu gösteren %70 ışık akısı koruma değeri kabul edilebilir bir eşik değer olup, "ekonomik ömür" olarak tanımlanmaktadır. Ekonomik ömür tanımı "istatistiksel bakımdan değerlendirmeye yetecek sayıda lambadan oluşan bir aydınlatma tesisinde, 100 saat kullanmadan sonraki toplam ışık akısının lambaların kullanılmaz hale gelmeleri ve ışık akılarının azalmalarından dolayı yaklaşık %30 değer kaybetmesi için geçen süre" olarak yapılmaktadır (Onaygil, 2016).

İnorganik LED paketleri, dizileri ve modüllerinin ışık akısı koruma ölçümlerinin yapılması ile ilgili 2008 yılında yayımlanmış IES LM-80-08 standardı mevcuttur (LM-80-08, 2008). Bu standartta belirtilen koşullara göre, ilk 1000 saat kullanımdan sonra 1000 saat aralıklarla yapılan ölçümlerle LED'lerin ışık akılarının zamana göre değişimleri bulunabilmektedir. Elde edilen ölçüm sonuçları kullanılarak IES TM-21-11 standardında tanımlanan ekstrapolasyon yöntemleri ile LED ışık kaynaklarının ömürleri tahmin edilmektedir (IES TM-21-11,2011).

Yüksek sıcaklıklarda uzun süre çalışması LED'lerin ışık akısı (lümen) değerlerinin düşüş hızını arttırarak ekonomik ömürlerinin azalmasına yol açmaktadır. Şekil 2.16'da birbirine eş ve aynı akımlarda sürülen iki LED'in zamana bağlı ışık akısı değerleri değişimi (10000 saate kadar deneysel verilerden, sonrası ekstrapolasyon ile) görülmektedir. Değerlendirmedeki tek değişken 11 °C farklı jonksiyon sıcaklıklarıdır.

Bu fark; ışık akısının başlangıç değerinin %70'ine düşmesi için geçen sürenin 37000 saatten 16000 saate düşmesine bir başka deyişle %57 azalmasına sebep olmuştur (Url-7).



**Şekil 2.16 :** Yüksek güçlü beyaz LED'lerin farklı çalışma sıcaklıklarındaki ekonomik ömürleri (Url-7).

Isıl yönetim sorunlarının, yüksek güçlü LED'li aydınlatma sistemlerinin diğer ışık kaynaklarına göre üstünlük sağlayan özelliklerini olumsuz olarak etkilediği görülmektedir. Bu sebeple armatür yapısında oluşan ısının, uygun soğutma sistemleriyle verimli bir şekilde uzaklaştırılması gerekmektedir.

### 2.3 Soğutma Sistemleri ve Literatürdeki Çalışmalar

Bir önceki bölümde gerçekleştirilen ölçümlerden yüksek sıcaklıkların, LED'lerin özelliklerini etkilediği görülmektedir. LED yapısında oluşan ısı, tasarlanacak sistemlerle verimli bir şekilde uzaklaştırılmalıdır. Literatürde LED'lerde oluşan ısının sistemden atılmasına yönelik aktif ve pasif yöntemlerin kullanıldığı çalışmalar mevcuttur. Aktif soğutma yöntemlerinde soğutma amaçlı güç gereksinimine ihtiyaç varken, pasif soğutma yöntemlerinde böyle bir gereklilik söz konusu değildir. Tezin ana konusu olan soğutma sistemlerinin literatür özetinin yapılacağı bu bölümde her iki sistem ile ilgili yapılan araştırma ve uygulamalar değerlendirilecektir.

#### 2.3.1 Pasif soğutma

Pasif soğutma, değişik tasarımlardaki kanatlar ile yapılabileceği gibi ısı borusu ve kanatların birlikte kullanıldığı sistemler ile de gerçekleştirilebilmektedir.

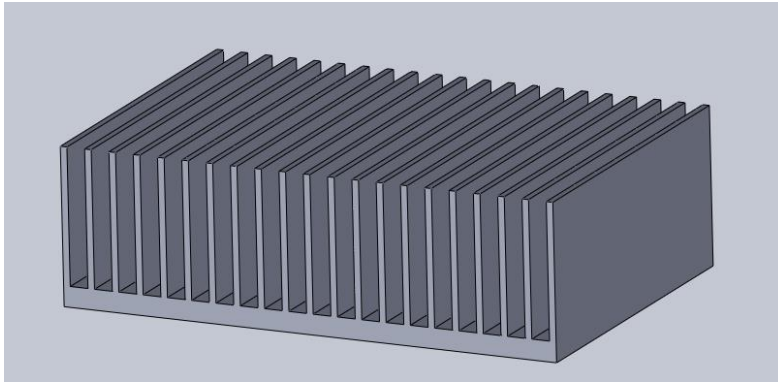
Pasif ısı yönetim sistemlerinin aktif sistemlere göre üstünlükleri; basit yapıları, kolay üretilibilmeleri, uygulama esneklikleri ve düşük maliyetleridir (Huaiyu ve diğ., 2011).

Bu bölümde pasif soğutma sistemleri ve bu sistemler ile ilgili literatürde bulunan çalışmalar; pasif soğutma elemanları ve ısı borularının kullanıldığı faz dönüşümlü sistemler olmak üzere iki grupta incelenecektir.

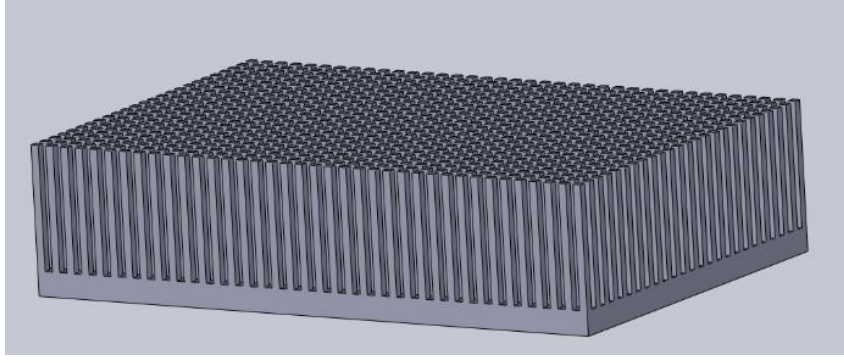
### 2.3.1.1 Pasif soğutma elemanları

Çok çeşitli kanatlı tip soğutucular bulunmakla beraber, günümüzde en sık kullanılanlar Şekil 2.17'deki plaka tipi ve Şekil 2.18'deki iğne tipi kanatlı soğutuculardır.

Bu tip soğutma sistemlerinde performans, doğal taşınım ve ışınım ile ilgili pek çok faktöre bağlıdır. Optimizasyon parametreleri arasında; kanat boyu, kalınlığı ve sayısı, taban kalınlığı ve malzeme gösterilebilir (Huaiyu ve diğ., 2011). Yi-bing (2012), tarafından gerçekleştirilen çalışmada 60 W gücünde bir LED'li aydınlatma sisteminin modellenmesi, ısı analizleri yapılmış ve sistem optimize edilmiştir. Boyutları belli bir plakanın üzerine yerleştirilen 20 adet LED çipi için hesaplamalar gerçekleştirilmiştir. Soğutma sisteminde kanatlar ve alt katman alüminyumdur. Çalışmada amaç fonksiyonu olarak jonksiyon sıcaklığı alınmış, soğutma kanatlarının yapısal parametreleri ise tasarım değişkenleri olarak belirlenmiştir. Sonuç olarak soğutma sisteminin kanat yüksekliğinin, maksimum jonksiyon sıcaklığı ile yaklaşık lineer bir ilişkisi olduğu görülmüştür. Kanat kalınlığı arttığında ise maksimum jonksiyon sıcaklığı parabolik olarak artmaktadır. Bunun sebebi kanat boşluğunun azalması olarak açıklanmaktadır. Sistemde kanat sayısı da optimize edilmiştir. En yüksek jonksiyon sıcaklığının 60°C'yi aşmayacağı optimum durum için kanat yüksekliği 62,5 mm, kanat kalınlığı 1 mm, kanat sayısı 20 olarak belirlenmiştir.



Şekil 2.17 : Plaka tipi kanatlar.



**Şekil 2.18 :** İğne tipi kanatlar.

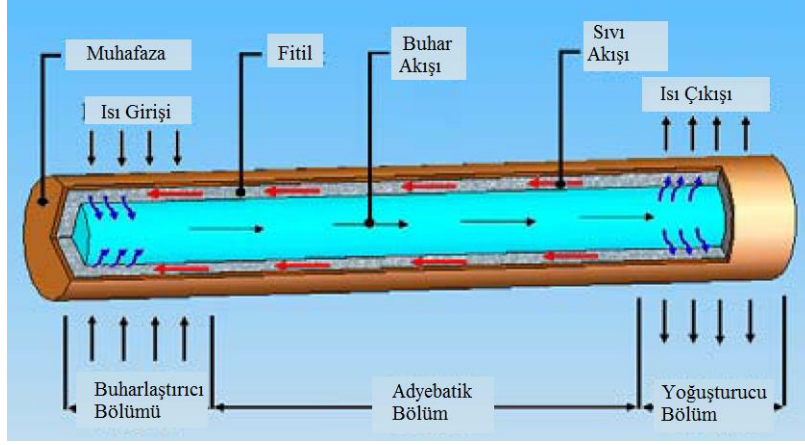
Bu doktora tezi kapsamında yayımlanan bir makalede de, kanatlı tip soğutucunun kullanıldığı LED ışık kaynaklı bir armatürün ısıl analizleri ve bu analizlere göre üretilen bir prototip ile deneysel ölçümler gerçekleştirilmiştir (Ateş ve diğ.,2019). Analiz sonuçları, deneysel verilerle doğrulanmıştır. Aynı analizler ve ölçümler tez kapsamında kanatlar ve ısı borularının birlikte kullanıldığı soğutma sistemi için de yapılmıştır.

### **2.3.1.2 Isı boruları**

Isı borusu fikri ilk kez 1942 yılında Gaugler tarafından önerilmiştir (Reay ve diğ., 2014). Fakat uygulamaya geçilmesi daha sonraki dönemlerde gerçekleşmiştir.

Isı boruları faz değişimli sistemler için bir örnek uygulamadır. Bu sistemler, LED aydınlatma çözümlerinde ısı kaynağı ve kanatlar arasında bir bağlantı görevi gören pasif ısıl çözümler olarak düşünülmektedir. Isı borusunun boyutları, yapısı ve konumlandırılması verim üzerinde doğrudan etkili olmaktadır. Çalışma sıvısının seçimi ise ısı geçiş kapasitesini belirlemesi açısından, bir diğer önemli parametredir (Huaiyu ve diğ., 2011).

Isı borusu; bir dış muhafaza, çalışma sıvısı ve fitilden oluşmaktadır. Buharlaştırıcı, adyabatik (yapıdan dışarı ya da içeri ısı geçişinin olmadığı bölüm) ve yoğuşturucu kısımları bulunmaktadır. Buharlaştırıcı kısmında sıvı fazdan buhar fazına dönüşüm gerçekleşir. Isı borusunun yapısı ve çalışması Şekil 2.19'da görülmektedir (Lin ve diğ., 2009).



Şekil 2.19 : Isı borusunun yapısı ve çalışması (Lin ve diğ., 2009).

Isı boruları büyük miktarlarda ısıyı herhangi bir güç girişi gereksinimi olmadan uzak mesafelere taşıyabildikleri ve hareketli parçalar içermedikleri için basit aletler olarak tanımlanmaktadır. Isı borusunun iç yüzeyi fitil yapısıyla kaplanmıştır ve ısı borusu az miktarda doymuş halde sıvı içeren ince, uzun ve sızdırmaz bir tüp şeklindedir (Lee, 2010).

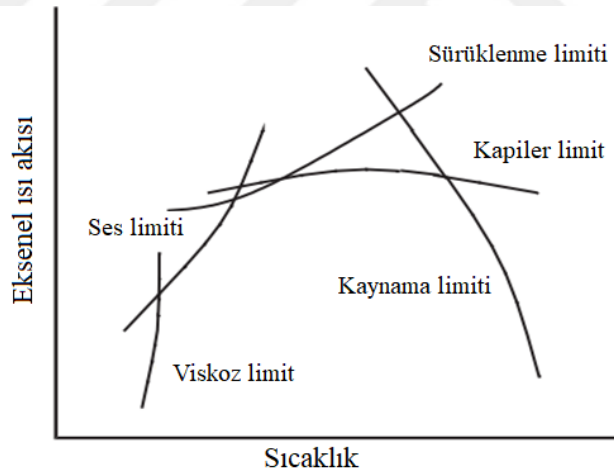
Isı borusunun buharlaştırıcı (evaporatör) bölümü sıcak bir yüzey ile temas ettiğinde ya da sıcak bir çevreye yerleştirildiğinde ısı borusuna ısı akışı gerçekleşmektedir. Isı geçişinin bir sonucu olarak ısı borusunun buharlaştırıcı ucundaki doymuş haldeki su buharlaşmakta ve buradaki buhar basıncı artmaktadır. Bu basınç farkı buharı ısı borusu boyunca buharlaştırıcı bölümünden yoğuşturucu (kondenser) bölümüne doğru yönlendirmektedir. Isı borusunun yoğuşturucu ucu daha serin bir çevrede bulunduğundan nispeten daha soğuktur. Daha soğuk olan bu yüzeyler ile temas eden buhar yoğuşmakta ve açığa çıkan ısı çevreye atılmaktadır. Yoğuşan sıvı, fitildeki kapiler (kılcallık sebebiyle oluşan moleküller arası çekim) hareketin sonucu olarak ısı borusunun buharlaştırıcı bölümüne geri dönmekte ve çevrim tamamlanmaktadır (Lee, 2010).

Çalışma sıvısı seçiminde, çalışılacak sıcaklık aralığında birden fazla olasılık olabileceğinden, seçimde dikkate alınması gereken özellikler belirlenmelidir. Bunlar çalışma sıvısının fitil ve duvar malzemesiyle uyumluluğu, iyi ısı stabilite, çalışma sıvısının fitil ve duvarı iyi ıslatabilmesi, buhar basıncının çalışma sıcaklığı aralığı boyunca çok yüksek ya da düşük olmaması, yüksek gizli ısı, yüksek ısı iletkenlik, düşük buhar ve sıvı viskozitesi (akış direnci), yüksek yüzey gerilimi ve kabul edilebilir donma ve akma noktası olarak sıralanmaktadır. Isı borusu için fitil seçimi, çoğunluğu çalışma sıvısının özellikleri ile ilgili birçok faktöre bağlıdır. Fitilin ilk görevi çalışma

sıvısının yoğuşturucudan buharlaştırıcıya taşınmasını sağlayacak kapiler basıncı oluşturmaktır. Aynı zamanda sıvıyı buharlaştırıcı etrafında, ısı borusunun ısıyı çekebileceği tüm alanlara dağıtmalıdır (Reay ve diğ., 2014). Isı borusunun performansını optimize etmek için pek çok fitil yapısı geliştirilmiştir. Bunlar homojen ve kompozit fitiller olarak iki gruba ayrılabilir (Faghri, 2014).

Isı borusunun toplam ısı direnci Denklem (2.7) ile tanımlanır. Sistemin verimliliği açısından bu değerin düşük olması gerekmektedir. Denklemde R, ısı direnci;  $T_{sıcak}$ , ısı borusunun sıcak uç sıcaklığını;  $T_{soğuk}$ , ısı borusunun soğuk uç sıcaklığını; Q ise iletilen ısı gücü ifade etmektedir. Isı borusunun işlevini doğru yapabilmesi birinci önceliktir. Fitilli bir ısı borusunun çalışma limitleri Şekil 2.20’de görülmektedir (Reay ve diğ., 2014).

$$R_{tot} = \frac{T_{sıcak} - T_{soğuk}}{\dot{Q}} \quad (2.7)$$



**Şekil 2.20 :** Bir ısı borusunda ısı transfer limitleri (Reay ve diğ., 2014).

Isı borularındaki ısı transferi; iş-akışkanın, fitil yapısı, ısı borusunun boyutları ve çalışma sıcaklığına bağlı olarak çeşitli limitlerle sınırlanabilir (Lee, 2010).

**Kapiler Limit:** Isı borusunun çalışabilmesi için maksimum kapiler (kılcallık sebebiyle oluşan moleküller arası çekim) pompalama basıncı, ısı borusundaki toplam basınç düşüşünden daha fazla olmalıdır. Bu koşul sağlanamazsa buharlaştırıcı bölümündeki fitil kuruyacak ve ısı borusu çalışamayacaktır (Reay ve diğ., 2014).

**Viskoz Limit (Buhar Basıncı Limiti):** Düşük çalışma sıcaklıklarında viskoz kuvvetler ısı borusundaki buhar akışı üzerinde baskı yaratabilirler. Bir ısı borusu normal çalışma

aralığının altında sıcaklıklarda çalışırken (soğuk halden ilk çalışmaya geçişte) viskoz limit sorun olabilir (Faghri, 1995).

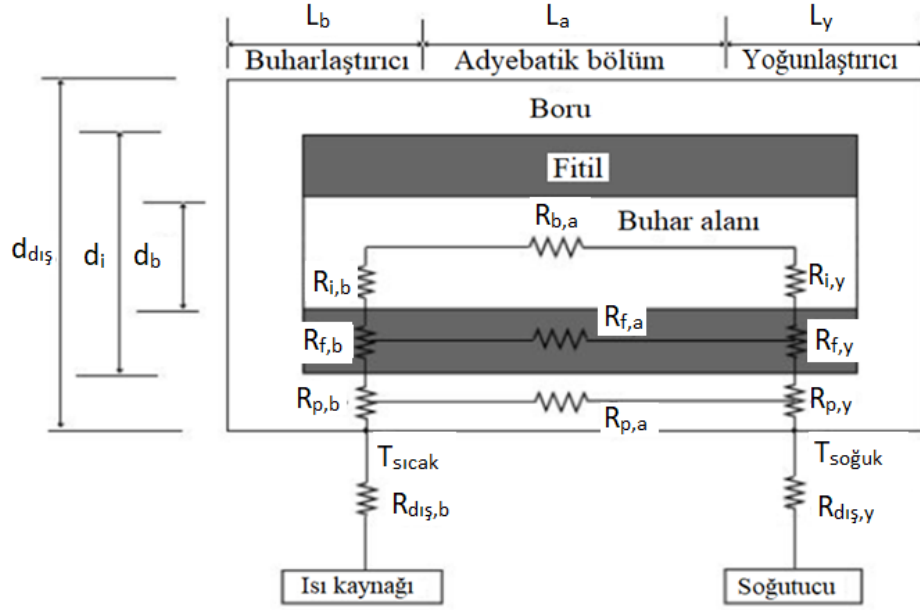
**Sonik (ses) Limit:** Isı borularında sonik (ses) limit ilk başlangıç durumunda düşük sıcaklıklarda meydana gelir. Düşük sıcaklık buhar merkezindeki ses hızını düşürür. Yeteri kadar yüksek bir kütleli debi de sonik akış şartlarına sebep olup, boğulmuş akışa neden olan bir şok dalgası üretebilir ve borunun yoğuşturucuya ısı taşıma yeteneğini sınırlandırabilir (Lee, 2010).

**Sürüklenme Limiti:** Sıvı-buhar ara yüzeyinde buhar ve sıvı farklı yönlerde hareket ettiğinden bir kayma kuvveti mevcuttur. Yüksek bağıl hızlarda sıvı damlacıkları fitil yüzeyinden kopup yoğuşturucuya doğru akan buhara katılabilir. Bu sürüklenme çok fazla olursa buharlaştırıcı kuruyabilir. Bu durumun olduğu ısı transfer oranına sürüklenme limiti adı verilir (Faghri, 2014).

**Kaynama Limiti:** Buharlaştırıcı bölümündeki radyal ısı akısı çok yükseldiğinde buharlaştırıcı fitilindeki sıvı kaynar ve duvar sıcaklığı aşırı artış gösterebilir. Fitilde oluşan buhar baloncukları sıvının boru duvarını ıslatmasını engeller ve bu durum sıcak noktaların oluşmasına sebep olur. Kaynama arttığında buharlaştırıcı fitili kurur, bu durum kaynama limiti olarak tanımlanır (Faghri, 2014).

Isı borusu tasarımı ya da seçimi aşamalarında yukarıda belirtilen limitler, ısı borulu soğutma sistemlerinin düzgün çalışması ve hedeflenen soğutmayı sağlayabilmesi için dikkate alınmalıdır.

Elektronik ekipmanların sıcaklık kontrolünün ısı borularıyla sağlandığı sistemlerde, ısı borusunun buharlaştırıcı ve yoğuşturucu arasındaki sıcaklık farkı tasarımcı için özel bir araştırma konusudur. Şekil 2.21’de tipik bir ısı borusunun direnç devresi gösterilmektedir (Lee, 2010).



Şekil 2.21 : Isı borusunun ısı direnç devresi (Lee, 2010).

$R_{p,b}$ : Isı borusu duvarının buharlaştırıcıdaki radyal iletim direnci

$R_{p,y}$ : Isı borusu duvarının yoğuşturucu radyal iletim direnci

$R_{f,b}$ : Buharlaştırıcıdaki sıvı-fıtil birleşimi direnci

$R_{f,y}$ : Yoğuşturucudaki sıvı-fıtil birleşimi direnci

$R_{i,b}$ : Buharlaştırıcıdaki sıvı-buhar ara yüzey direnci

$R_{i,y}$ : Yoğuşturucudaki sıvı-buhar ara yüzey direnci

$R_{b,a}$ : Adyabatik buhar bölgesi direnci

$R_{f,a}$ : Adyabatik bölgedeki sıvı-fıtil birleşimi direnci

$R_{p,a}$ : Isı borusu duvarının adyabatik bölgedeki aksel iletim direnci

$R_{dış,b}$ : Isı kaynağı ve buharlaştırıcı arasındaki temas direnci

$R_{dış,y}$ : Soğutucu ve yoğuşturucu arasındaki temas direnci

Karşılaştırma amaçlı Şekil 2.21’de gösterilen direnç değerlerinin büyüklükleri Çizelge 2.22’de verilmektedir.

**Çizelge 2.22 :** Karşılaştırma amaçlı direnç değerleri (Lee, 2010).

Dirençler	°C/W
$R_{p,b}$ ve $R_{p,y}$	$10^{-1}$
$R_{f,b}$ ve $R_{f,y}$	$10^{+1}$
$R_{i,b}$ ve $R_{i,y}$	$10^{-5}$
$R_{b,a}$	$10^{-8}$
$R_{p,a}$	$10^{+2}$
$R_{f,a}$	$10^{+4}$

Çizelge 2.22'deki değerler karşılaştırıldığında, yüksek değerli  $R_{p,a}$  ve  $R_{f,a}$  dirençleri ihmal edilerek paralel devre basitleştirilebilmektedir. Küçük değerli  $R_{i,b}$ ,  $R_{i,y}$  ve  $R_{b,a}$  dirençleri kısa devre yapılarak seri devre de basitleştirilebilir. Bu durumda toplam ısıl direnç denklem (2.8) ile ifade edilebilir (Lee, 2010).

$$R_{tot} = R_{p,b} + R_{f,b} + R_{f,y} + R_{p,y} \quad (2.8)$$

$\delta$ : Plaka kalınlığı,  $A_b$ : Buharlaştırıcı alanı,  $L_b$ : Buharlaştırıcı boyu,  $k_{eff}$ : Fitolin efektif ısıl iletkenliği,  $k_p$ : ısı borusu duvarının ısıl iletkenliği,  $d_{dış}$ : dış çap,  $d_i$ : iç çap,  $d_b$ : buhar alanı çapı olmak üzere; denklem (2.8)'deki dirençler, denklem (2.9) ve (2.10) yardımıyla hesaplanabilir (Lee, 2010).

$$R_{p,b} = \frac{\delta}{k_p A_b} = \frac{\ln\left(\frac{d_{dış}}{d_i}\right)}{2\pi L_b k_p} \quad (2.9)$$

$$R_{f,b} = \frac{\ln\left(\frac{d_i}{d_b}\right)}{2\pi L_b k_{eff}} \quad (2.10)$$

Buharlaştırıcı ve yoğuşturucu kısımları fiziksel olarak özdeş olduğundan toplam direnç denklem (2.11) ile ifade edilebilir (Lee, 2010).

$$R_{tot} = 2(R_{p,b} + R_{f,b}) \quad (2.11)$$

Isı borularının yapısı ve çalışma prensibi incelendiğinde, bu elemanların yüksek güçlü LED'lerin soğutma sistemlerinde etkin bir şekilde kullanılabilmesi için tasarım yapılırken çeşitli parametrelerin göz önüne alınmasının gerektiği anlaşılmaktadır. Sistemin çalışacağı sıcaklık aralığı, beklenen soğutma kapasitesi, ısı borularının

konumlandırılma yer ve şekilleri gibi parametreler ısı borusu tasarımında dikkate alınmalı ve ısı borusu elemanlarının malzemeleri de bunlara uygun seçilmelidir. Ayrıca ısı borusu elemanlarının birbirleriyle uyumlulukları da önemlidir. Isı borusunun çalışma limitleri de belirlenerek güvenli bir şekilde çalışması garanti edilmelidir.

Farklı türlerde ısı boruları bulunmaktadır (Faghri, 2014). Bu tez kapsamında literatürde mevcut LED'li aydınlatma sistemleri ile ilgili ısı borulu çalışmalar incelenmiştir. Aşağıda özetlenen bu çalışmalarda geleneksel ısı borularının yanısıra farklı ısı borusu çeşitleri de araştırma konusu olmuştur.

Kim ve diğ. (2007), çalışmalarında ısı borulu ve ısı borusuz LED dizilerinin farklı zorlanmış taşınım ve çevre sıcaklığı koşullarında karşılaştırmasını yapmışlardır. Çalışmada ısı borularının LED dizilerinin toplam ısıl direncini azaltmada etkili olduğu sonucuna varılmış ve ısı borularının yüksek güçlü LED'lerin jonksiyon sıcaklığı kontrolünde iyi bir çözüm olabileceği vurgulanmıştır.

Lu ve diğ.(2011), çalışmalarında yüksek güçlü LED'ler için yeni bir düz ısı borusu geliştirmişler ve ısıl karakteristiklerini (start-up performansı, sıcaklık düzgünlüğü, ısıl direnç) deneysel olarak irdelemişlerdir. Çalışmada jonksiyon sıcaklığı ve LED sisteminin toplam ısıl direnci belirlenmiştir. Ayrıca LED'lerin soğutulmasında böyle bir sistemin kullanılması durumunda, ısı borusunun değişik dolun oranlarının ve eğim açılarının da değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır.

Liu ve diğ. (2010)'nin çalışmalarında kanatlı tip pasif soğutucu ile kanatlı-ısı borulu iki farklı soğutma sistemi analiz edilip karşılaştırılmıştır. Çalışmada sıcaklık dağılımını simule etmek için hesaplamalı akışkanlar dinamiği programı kullanılarak yüksek güçlü LED modülü oluşturulmuştur. Kanatlı-ısı borulu sistemin soğutma kapasitesinin, sadece kanatlı soğutma yapan sisteme göre daha fazla olduğu sonucuna varılmıştır.

Li ve diğ. (2013), çalışmalarında paralel yoğuşturucu çevrimli ısı borulu bir sistemi LED soğutması için önermiş ve bu sistemi deneysel verilerle değerlendirmişlerdir. Deneysel sonuçlar sistemin ısıl performansının iyi olduğunu göstermiştir. Çalışmada aynı jonksiyon sıcaklığı kontrol kademesinde çevrimli ısı borulu sistemin, aynı amaçla kullanılacak geleneksel pasif soğutma çözümlerine göre ağırlık açısından daha hafif olacağı da vurgulanmıştır.

Ye ve diğ. (2014), çalışmalarında 80 W gücünde ve çektiği gücün %75'ini ısıya dönüştüren bir LED panelin çalışma sıcaklığını 70 °C'nin altında tutmayı hedefleyen kanatlı-ısı borulu bir soğutma sistemi tasarlamışlardır. Çalışmada ampirik korelasyonlar ile kanat boşlukları hesaplanmış ve karar verilen kanat sayısı ile boşluklarına göre simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Ayrıca üç adet prototip üretilmiş ve optimum kanat boşluğu belirlenmiştir.

Tang ve diğ. (2014a), çalışmalarında yüksek güçlü çoğul çipli LED'in soğutulması için yeni bir sütun biçimli ısı borusu geliştirmişlerdir. Karşılaştırma için de ısı borusu yerine bakır gövdeli bir sistem kullanılmıştır. Karşılaştırılacak iki sistem de alüminyum radyal kanatların içine gömülmüştür. Sonuçta ısı borulu sistemin ısıl direncinin ve ortalama jonksiyon sıcaklığının bakır gövde kullanılan sisteme göre daha düşük olduğu bulunmuştur. Çalışmada, soğutma sistemlerinin LED'lerin etkinlik faktörü ve renk özellikleri üzerine etkileri de ele alınmıştır. Bu açıdan da ısı borulu sistemin performansının daha iyi olduğu sonucuna varılmıştır.

Wang ve diğ. (2014), çalışmalarında kısa hüzmeli LED ışık kaynaklı araba far ünitesi için soğutma sistemleri tasarlamış ve bu sistemlerin performanslarını hem deneysel hem de bilgisayar programı kullanarak analiz etmişlerdir. Sonuç olarak, ısı borularıyla kombine edilmiş kanatlı soğutma sisteminin ısı atma performansını iyileştirdiği belirlenmiştir. Çalışmada ısı borusu boyutlarının, yapıdaki konumlandırılmasının ve dolum oranlarının etkisi de simülasyonlar ve deneyler ile değerlendirilmiştir.

Tang ve diğ. (2014b), çalışmalarında ısı borulu bir sokak aydınlatması modülünün ısıl performansını sadece metal kanatlar ile soğutulan bir sistem ile karşılaştırmalı olarak değerlendirmişlerdir. Çalışmada ısı borularının, modülün ısıl direncini verimli bir şekilde düşürdüğü gözlemlenmiştir. Ölçümlerin yanı sıra ANSYS programı ile yapılan analizlerin de ölçümleri doğrular nitelikte olduğu, ısı borulu sistemin belirlenen noktalarda sıcaklığı ısı borusuz sisteme göre daha düşük tuttuğu belirlenmiştir.

Tez süresince gerçekleştirilen literatür taraması sonucunda, LED ışık kaynaklı armatür tasarımlarında kullanılmak amaçlı farklı türlerde ısı boruları üzerinde araştırmaların devam ettiği gözlemlenmiştir.

### 2.3.2 Aktif soğutma

Literatürde yüksek güçlü LED'lerin aktif yöntemlerle soğutulmasıyla ilgili de çalışmalar mevcuttur. Bu bölümde aktif soğutma sistemleri ile ilgili yapılmış başlıca yayınlar ve kullanılan sistemler incelenecektir.

Deng ve Liu (2010), çalışmalarında soğutucu akışkan olarak sıvı metalin kullanıldığı bir LED soğutma sistemi önermiş ve bunun bir prototipini de yapmışlardır. Düşük ergime sıcaklığı, alev almaz yapısı, ısı iletkenliği gibi üstünlüklere sahip olduğundan çalışmada galyum ve alaşımları olan GaIn20 (%80 Ga, %20 In) kullanılmıştır. LED'ler 100 W'lık ısı 100 W'lık gücü olan bir kaynak ile simule edilmiştir. Sistemin elemanları; soğuk plaka, fan soğutmalı radyatör ve tahrik pompasından oluşmaktadır. Soğutucu akışkan olarak sıvı metalin veya sadece suyun kullanıldığı durumlar karşılaştırılmıştır. Aynı ısı yük altında LED alt tabakasındaki sıcaklık sıvı metalin kullanıldığı sistemde daha az artış göstermiştir. Sıvı metalli sistemin ısı direncinin, su kullanılan sisteme göre %59 daha düşük olduğu bulunmuştur. Çalışmanın sonuçları sıvı metal soğutmalı sistemin soğutma kapasitesinin, su kullanılan sisteme göre daha fazla olabileceğini işaret etmekte, sistemin yüksek güçlü LED'lerde soğutma sistemi olarak kullanılmasının uygun ve faydalı olabileceğini göstermektedir.

Li ve diğ. (2011)'nin çalışmalarında termoelektrik soğutucuların (TEC) yüksek güçlü LED'lerin ısı yönetiminde kullanılması incelenmiştir. Çalışmada termoelektrik soğutuculu sistem ile termoelektrik soğutuculu olmayan sistem karşılaştırılmıştır. Termoelektrik soğutmanın LED alt tabakası sıcaklığını düşürmede başarılı olduğu görülmüştür. Değişen TEC giriş güçleri için alt tabaka sıcaklıkları birbirinden farklı değerler almıştır. Ancak belli bir değerden sonra giriş gücü alt tabaka sıcaklığını arttırmıştır. Çalışmada bu durumun sebebi olarak Joule ısıtması gösterilmiştir. Çalışmanın sonuçlarında TEC sisteminin yüksek güçlü LED'lerin soğutulmasında iyi sonuç verdiği belirtilmektedir.

Ye ve diğ. (2013), çalışmalarında yüksek güçlü LED'lerin iki fazlı sistemler ile soğutulmasını önermişlerdir. İki fazlı sistemde, hacim ve kütle bakımından küçük boyutlarda kompakt bir ısı yönetim sağlanabileceği düşünülmüştür. İki fazlı soğutma üç aşamadan meydana gelmektedir. İlk aşamada soğutucu akışkan sıvı fazında ısı absorbe etmekte ve sıcaklığı yükselmektedir. İkinci aşamada, alınan ısıya bağlı olarak soğutucu akışkanın sıvı fazının yüzdesi değişmeye başlamaktadır. Bu aşamada paket

sıcaklığı sabit kalmaktadır. Üçüncü aşamada ise paket sıcaklığı hızla yükselmeye başlamaktadır ve bu aşamada soğutma verimsizleşmektedir. Çalışmada soğutucu akışkan debisinin optimize edilmesi gerekliliği vurgulanmıştır. Sistemde soğutucu akışkan olarak farklı seçenekler olmasına rağmen çalışmada, yüksek güçlü LED'lerin 80 °C -120 °C arasında çalışması gerektiği belirtilerek sadece su, yüksek buharlaşma gizli ısı ile düşük akışkan debilerini mümkün kılması yönüyle uygun bir seçenek olarak tanımlanmıştır. Çalışmada deneysel irdeleme ve sayısal simülasyon yapılmıştır. Farklı debi ve LED güçleri için analizler gerçekleştirilmiş, değişik güçler için optimum debiler belirlenmiştir. Önerilen sistemin entegre su bazlı soğutma sistemleri açısından umut verici olduğu ve LED'lerde faydalı olabileceği sonucuna varılmıştır.

Arık ve Setlur (2010), çalışmalarında LED'lerin soğutulmasında kullanılan ve araştırma aşamasında olan teknolojileri değerlendirmişlerdir. Soğutucu plaka, küçük rotatif fan, termoelektrik modül, piezo fan ve sentetik jet teknolojilerinin LED'lere uygulanabilirliği ele alınmıştır. LED soğutma sistemlerinin, LED'lerin verimlilik, kompaktlık ve güvenilirlikleri ile uyumlu olmasının gerektiği vurgulanmıştır. Piezoelektrik fan ve sentetik jetlerin soğutma performanslarının geleneksel soğutma sistemlerine göre oldukça iyi olabileceği ve tasarlanacak gelişmiş LED aydınlatma sistemlerinde bu çözümlerin değerlendirilmesinin gerektiği belirtilmiştir.

Diğer yandan literatürde piezoelektrik fanlar ve sentetik jetlerin de LED'li aydınlatma sistemlerinin ısı yönetim sorunlarının çözümünde aday teknolojiler arasında olduğu ve bu sistemlerin geliştirilmesi için çalışmalar yapıldığı görülmektedir.

Petroski ve diğ. (2010), çalışmalarında son yıllarda elektronik ekipmanların soğutulması amacıyla çeşitli araştırmalar yapılan piezoelektrik salınımlı fanların kullanıldığı bir sistemi ele almışlardır.

Sentetik jetler de elektronik ekipmanların soğutulmasında aday teknolojiler arasında gösterilmektedir. Arık ve Utturkar (2008), hesaplamalı akışkanlar dinamiği temelli çalışmalarında bu teknolojiyi incelemişlerdir.

### **2.3.3 Soğutma sistemlerinin değerlendirilmesi**

Yapılan literatür araştırmasında, LED'li aydınlatma sistemlerinin ısı yönetim sorunlarının çözümüne katkı sağlayabilecek çeşitli teknolojiler üzerine yapılan teorik ve deneysel çalışmalar irdelenmiştir. Bu çalışmalarda birbirinden farklı yaklaşımlar dikkat çekmektedir. Örneğin LED'lerin verimli çalışması ve ömür gibi çeşitli

özelliklerinin olumsuz etkilenmemesi için paket, alt tabaka ya da jonksiyon sıcaklıklarının belirli değerlerin altında tutulmasının gerektiği tüm yayınlarda vurgulanırken, önerilen sıcaklık değerleri farklılık göstermektedir. Bu durum aktif ve pasif soğutma teknikleri ele alınırken performans, ömür, yatırım maliyeti açısından optimizasyon yapılması gereğini ortaya çıkarmaktadır. Jonksiyon sıcaklığının düşürülmesi performans açısından olumlu katkı sağlamaktadır. Fakat jonksiyon sıcaklığının ne kadar düşürülebileceği; soğutma sistemine yapılacak olan yatırımın, performans artışıyla karşılanıp karşılanamayacağına bağlıdır. Tasarlanan soğutma sistemlerinin endüstride uygulama alanı bulabilmeleri için aynı amaçla kullanılan diğer ürünlerle hem performans hem de maliyet açısından rekabet edebilmeleri gereklidir.

Literatürde dikkat çeken bir diğer ayrıntı da LED'lerde çekilen gücün elektriğe ve ısıya dönüşme oranları ile ilgili ölçümlere dayanmayan, farklı kabullerin yapılmasıdır. Bu dönüşüm oranının farklı LED çipleri için değişik değerler alması normal olmakla birlikte, çalışmaların daha doğru yönlendirilebilmesi için farklı sıcaklık değerlerinde ölçüm yöntemi sağlıklı olacaktır. Bu tez kapsamında İTÜ Enerji Enstitüsü, Enerji Planlaması ve Yönetimi Anabilim Dalı laboratuvarlarında bulunan sıcaklık kontrollü Ulbricht küresi gibi donanımlar kullanılarak, kabuller için temel oluşturacak bilgiler oluşturulmasına katkı sağlanmıştır.

Tez kapsamında irdelenen kaynaklardan elde edilen bilgilere göre, pasif ve aktif çeşitli soğutma sistemlerinin üstünlük ve zayıflıkları Çizelge 2.23'te özet olarak verilmektedir.

Bu tez kapsamında incelenen literatürdeki çalışmalar da dikkate alındığında yüksek güç gereksinimi bulunan aydınlatma armatürlerinde pasif kanatlı tip soğutma elemanlarına alternatif olabilecek soğutma çözümünün ısı borulu sistemler olabileceği gözlemlenmiştir.

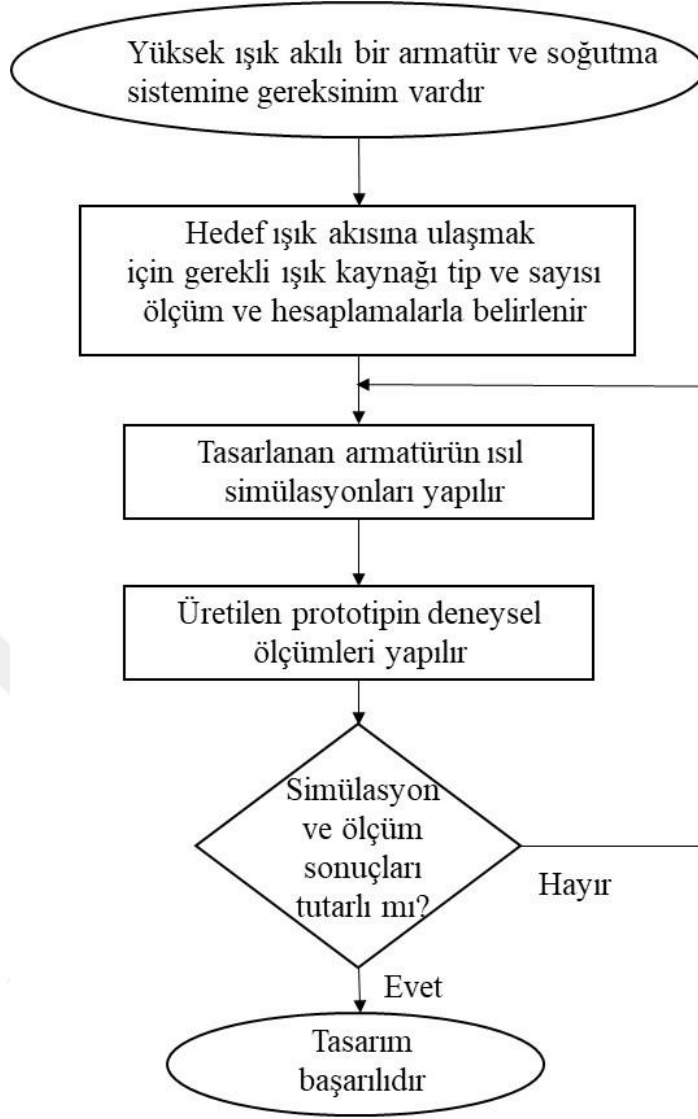
**Çizelge 2.23 : Farklı soğutma sistemlerinin üstünlük ve zayıflıkları.**

<b>Sistem</b>	<b>Üstünlük</b>	<b>Zayıflık</b>
<b>Kanatlı Tip Soğutma</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basit yapı</li> <li>• Üretim kolaylığı</li> <li>• Güvenilirlik</li> <li>• Hareketli parça olmaması</li> <li>• Düşük maliyet</li> <li>• Uygulama kolaylığı</li> <li>• Bakım, tamir gerektirmeme</li> <li>• Yaygın uygulama geçmişi</li> <li>• Güç gereksiniminin olmaması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Ağır armatür yapısı</li> <li>• Sağlam direk yapısı gerekliliği</li> <li>• Dış ortamda kanatlarda yabancı cisim. birikmesi ile ısı transferinin olumsuz etkilenmesi</li> <li>• Aktif sistemlere göre düşük soğutma kapasitesi</li> </ul>
<b>Isı Boruları</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Basit yapı</li> <li>• Hareketli parça içermemesi</li> <li>• Sadece kanatlı tip soğutucular kullanılan sistemlere göre daha iyi soğutma kapasitesi ve yapıda sıcaklık dağılımının düzgünlüğü</li> <li>• Çeşitlilik</li> <li>• Güç gereksiniminin olmaması</li> <li>• Aktif sistemlere göre yüksek güvenilirlik</li> <li>• Aktif sistemlere göre düşük maliyet</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kullanılan ara yüzey malzemelerinin ısı direnci yükseltebilme olasılığı</li> <li>• Isının çevreye atılması için ilave kanat vs. gibi soğutma elemanlarına gereksinim olması</li> </ul>
<b>Aktif Sistemler</b>  (Fanlar, termoelektrik soğutucular, sentetik jetler, piezoelektrik fanlar, sıvı soğutmalı sistemler vs.)	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kompakt yapı</li> <li>• Hafif armatürler elde edilebilme olasılığı</li> <li>• Hacim ve alan gereksiniminin azalması</li> <li>• Yüksek sıcaklıklarda LED karakteristik özelliklerinin bozulmasının kontrol edilebilmesi</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek maliyet</li> <li>• Güvenilirlik problemleri</li> <li>• Uygulama zorlukları</li> <li>• Karmaşık yapıları</li> <li>• Hareketli parçaların ömür problemleri</li> <li>• Bakım onarım gereksinimi</li> <li>• Güç gereksinimi nedeniyle toplam verimde azalma</li> <li>• Pratikteki uygulama zorlukları sebebiyle ticarileşememiş olmaları</li> <li>• Gürültü ve titreşim sorunları</li> <li>• Soğutma sisteminde meydana gelebilecek arızanın ışık kaynağının yapısını bozma olasılığı</li> </ul>

### **3. KARŞILAŞTIRMALI ANALİZLERDE KULLANILAN YÜKSEK TAVAN ENDÜSTRİYEL ARMATÜRÜNÜN ÖZELLİKLERİNİN BELİRLENMESİ VE IŞIK KAYNAĞI SEÇİMİ**

Tez kapsamında yüksek güçlü LED ışık kaynaklı armatürlerin soğutmasında ısı borularının kullanımının analiz edilmesi amaçlanmıştır. Yapılan araştırmalar ve analizlerle, ısı tasarım zorluklarının özellikle yol aydınlatması armatürleri, endüstriyel yüksek tavan aydınlatması armatürleri gibi yüksek ışık akılarının dolayısıyla yüksek güçlerin gerektiği uygulamalarda ortaya çıkabileceği gözlemlenmiştir. Bu bakış açısıyla yola çıkılarak endüstriyel tesislerin aydınlatmasında kullanılan armatürler incelenmiştir. Endüstriyel tesislerin üretim hollerinin aydınlatma tesisatlarındaki yüksek tavan armatürlerinde, konvansiyonel ışık kaynaklarının yerine LED’li ışık kaynakları da kullanılabilir. Piyasada bulunan LED’li endüstriyel aydınlatma armatür örnekleri incelendiğinde genellikle tasarımların tekil LED çipleriyle gerçekleştirildiği görülmektedir. Tekil çiplerle yüksek ışık akılarına ulaşabilmek için çok sayıda LED ışık kaynağı kullanılması gerekmekte, bu da armatür tasarım maliyetini, mekanik tasarım zorluğunu ve LED’lerin devre dışı kalma oranını arttırmaktadır. Uygun ısı tasarımlar ile daha küçük boyutlarda armatür üretimine ve daha az LED ışık kaynağı kullanımına olanak sağlayan COB (Chip on Board) LED çözümleri, verimlerinin de teknolojik gelişmelerle birlikte artmasıyla uygulamada kendine yer bulmaktadır. Diğer yandan tekil LED çipli armatürlerde LED’lerin yerleşimlerine bağlı olarak ısı, soğutucuya dengeli bir şekilde dağıtılabilmektedir. COB LED’lerin kullanıldığı armatürlerde ise ısı, LED’lerin bulunduğu bölgelerde yoğunlaşmaktadır. Bu nedenle, özellikle yüksek ışık akısı gereğinden çok sayıda COB LED’in kullanılacağı armatürlerde soğutucu tasarımlarının açığa çıkan bu ısıyı etkin bir biçimde uzaklaştırabilecek şekilde yapılması kritik önem kazanmaktadır.

Tez kapsamında değerlendirilmesi planlanan soğutma sistemi tasarımlarının uygulanacağı prototibin tasarım süreci adımlar halinde gerçekleştirilmiştir. Prototip tasarım adımları Şekil 3.1’de gösterilmektedir.



Şekil 3.1 : Prototip armatür tasarımı akış şeması.

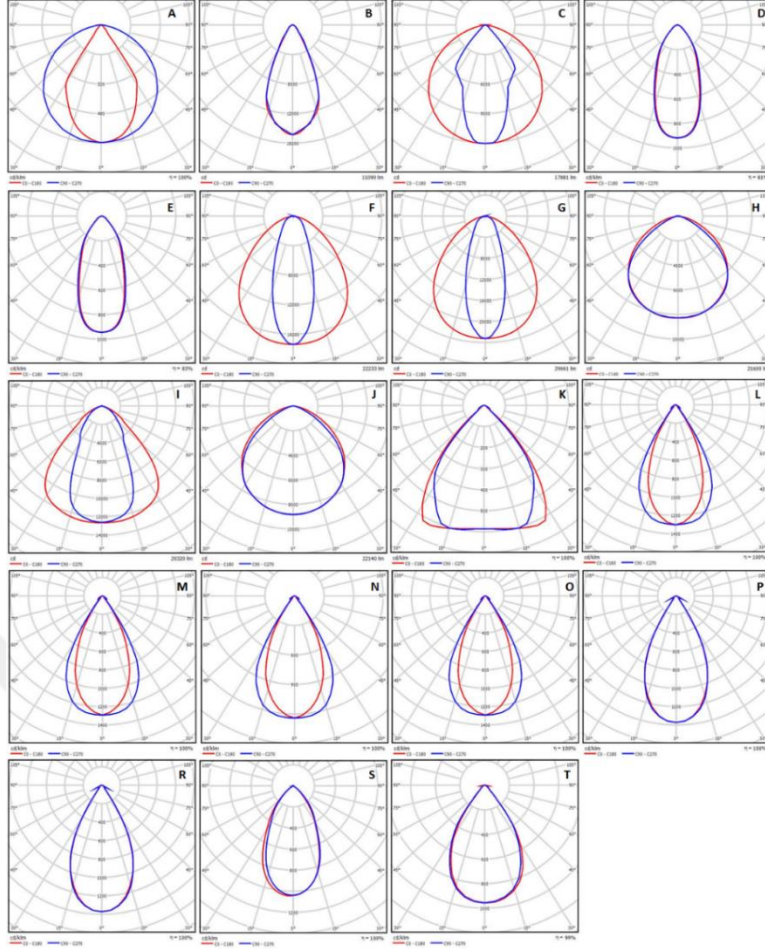
### 3.1 Piyasada bulunan LED Işık Kaynaklı Yüksek Tavan Endüstriyel Armatürlerin İncelenmesi

Piyasada bulunan LED'li yüksek tavan armatürleri ışık akısı, güç ve etkinlik faktörü gibi özellikleri dikkate alınarak incelenmiştir. Çizelge 3.1'de incelenen armatürlerin bir kısmına ait özellikler marka ve model belirtilmeden verilmiştir. Bu armatürlere ait ışık dağılım eğrileri ise Şekil 3.2'de gösterilmiştir. Çizelge 3.1 ve Şekil 3.2'den görüldüğü gibi yüksek tavan endüstriyel aydınlatma armatürleri çok çeşitli ışık akısı ve ışık dağılım eğrilerine sahip olabilmektedir. İlgili armatürlerin seçimi kullanılacakları yer ve o yer için gerekli aydınlatma kriterleri göz önüne alınarak yapılmalıdır. Bu çalışmada amaç yüksek ışık akılı ve dolayısıyla yüksek güçlü armatürlerin soğutma sistemlerinin incelenmesi olduğundan hedef ışık akısı olarak

piyasada mevcut en yüksek değerlerden olan 32000 lümen belirlenmiştir. Bu değer yüksek tavanlı endüstri tesislerinin aydınlatmasında sıklıkla kullanılan 400W gücündeki metal halide ışık kaynaklı armatürlerin ışık akısı değerine eşdeğer olabilecektir. Bir sonraki bölümde bu ışık akısının elde edilmesi için kullanılacak COB LED ve özellikleri yapılan ölçüm ve hesaplamalar ile belirlenmektedir.

**Çizelge 3.1 :** Çeşitli LED ışık kaynaklı endüstriyel aydınlatma armatürlerinin ışık akısı, güç ve etkinlik faktörü değerleri.

Armatür	Armatür ışık akısı [lm]	Güç [W]	Etkinlik Faktörü [lm/W]
A	17520	168	104,2
B	11090	103,2	107,5
C	17881	164,6	108,6
D	17573	155	113,4
E	24392	222	109,9
F	22233	225	98,8
G	29661	295	100,5
H	21600	191	113,1
I	20320	191	106,4
J	22140	191	115,9
K	32000	238	134,5
L	17000	128	132,8
M	25000	192	130,2
N	17000	126	134,9
O	25000	180	138,8
P	17000	138	123,2
R	25000	200	125
S	21845	195	112
T	20938	200	104,5



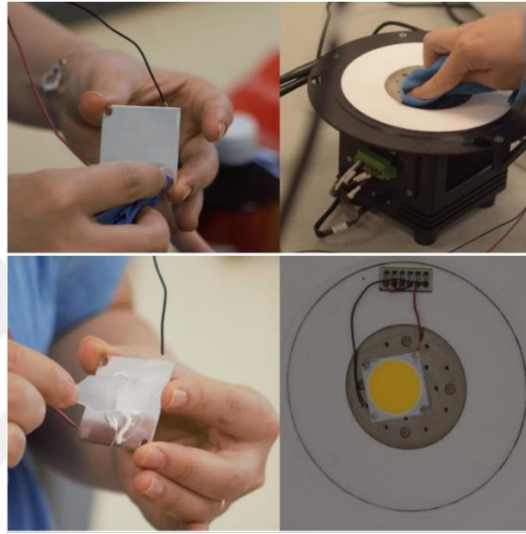
Şekil 3.2 : Çizelge 3.1’deki LED ışık kaynaklı armatürlerin ışık dağılım eğrileri.

### 3.2 Kullanılacak COB LED’in Ulbricht Küresi ile Özelliklerinin Belirlenmesi

Soğutma sistemlerinin analiz edileceği armatür prototipinde kullanılacak COB LED’in özelliklerinin ve bu özelliklerin sıcaklıkla değişimlerinin belirlenebilmesi için sıcaklık kontrollü Ulbricht Küresi kullanılarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Kürenin sıcaklık kontrollü plakasının sıcaklığı 10 °C’lik basamaklarla değiştirilmiştir. Ölçümlerin gerçek duruma uygun olması amacıyla örnek COB LED’lerin PCB’lerinin altına ince bir tabaka termal macun (gres) uygulanmıştır. Öncelikle ölçülecek COB LED’lerin PCB altı ve ölçüm küresinin sıcaklık kontrollü alt plakası isopropil alkolle temizlenerek ısı transferini olumsuz etkileyebilecek partiküller uzaklaştırılmıştır. Ardından termal macun uygulanarak örnek COB LED’ler sıcaklık kontrollü plakaya monte edilmiştir (Şekil 3.3).

Ölçümlerde üç adet örnek COB LED kullanılmıştır. Daha önce gerçekleştirilen ölçümlere benzer şekilde ölçümler, farklı sürüş akımı kademelerinde (350 mA, 700

mA, 1050 mA ve 1400 mA) ve 25°C-75°C arasındaki altı sıcaklık basamağında yapılmıştır. Kullanılan soğutucu plakaya sağlanabilen soğutma gücü ölçülen LED'in sıcaklığını 25°C'ye düşürmeye ve akım ile gerilim değerlerini bu sıcaklıkta sabit tutmaya yeterli olamadığı için, 1400 mA sürüş akımındaki ölçümler 30°C-75°C sıcaklıkları arasında gerçekleştirilebilmiştir. Farklı sıcaklıklarda dört farklı sürüş akımında gerçekleştirilen ölçüm sonuçları ve bu değerlerle hesaplanan karakteristik özellikler, değerlendirilen üç COB LED için ayrı ayrı ve bu üç LED için elde edilen değerlerin ortalaması olarak Çizelge 3.2'de verilmiştir.



**Şekil 3.3** : COB LED'in ölçüm hazırlığı.

Optik güç, ışık akısı, verim ve etkinlik faktörünün artan alt plaka sıcaklıklarından olumsuz etkilendiği görülmektedir. Buna ek olarak verim ve etkinlik faktörü artan akım kademesinden de olumsuz olarak etkilenmektedir. Isıl güç ise sıcaklık artışından optik güç kadar etkilenmemektedir. Örnek olarak seçilen LED'lerin renk özellikleri de sıcaklıkla büyük bir değişim göstermemektedir. Seçilen COB LED'in verim değerinin sürüş akımına bağlı olarak %50 değerine ulaşabildiği gözlemlenmiştir. Şekil 3.4'teki grafik, üç örnek COB LED'in ortalama ışık akılarının farklı sürüş akımı kademelerinde artan sıcaklıkla değişimini göstermektedir. Şekil 3.5'te ise aynı örnek LED'lerin yine ortalama ışık akılarının bu sefer farklı sıcaklıklarda artan sürüş akımlarındaki değişimleri görülmektedir. Şekil 3.5'ten, tüm sürüş akımı kademelerinde, en yüksek alt plaka sıcaklık basamağı olan 75°C'de ışık akısının en düşük değeri aldığı net bir şekilde görülmektedir. Sıcaklık farkları ile ışık akısındaki değişim aralıklarının düşük sürüş akımlarında küçük olduğu, yüksek sürüş akımı kademelerinde ise basamaklar arasındaki farkın arttığı da şekilden gözlemlenmektedir.

Çizelge 3.2 : Ölçülen COB LED'lerin karakteristik özellikleri ve bu özelliklerin ortalama değerleri.

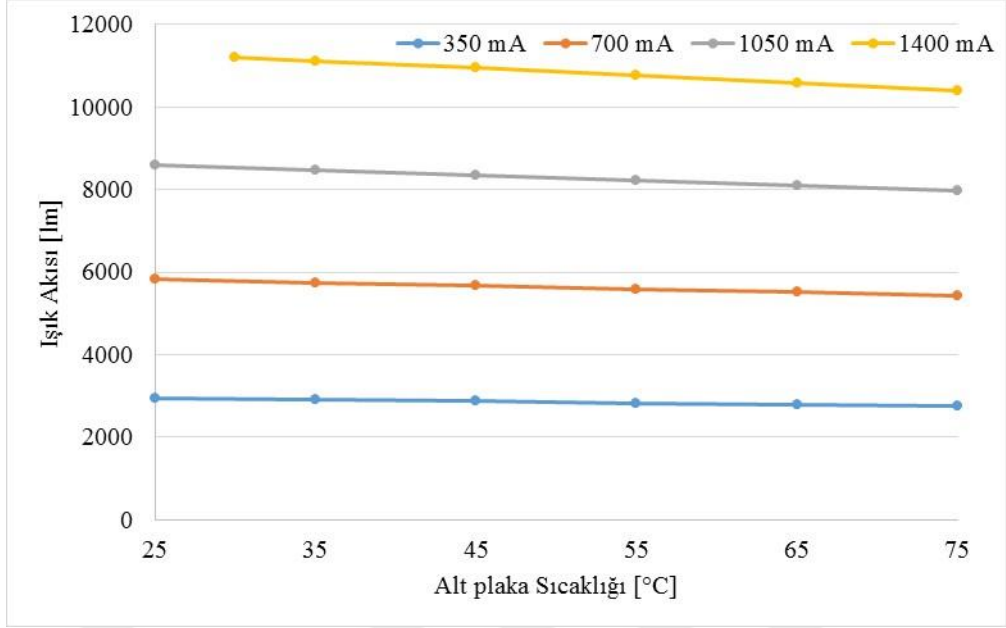
Akım	Özellik	LED 1						LED 2					
		Sıcaklık [°C]						Sıcaklık [°C]					
		25	35	45	55	65	75	25	35	45	55	65	75
350 mA	Gerilim [V]	47,705	47,516	47,329	47,144	46,958	46,772	47,786	47,605	47,425	47,241	47,066	46,886
	Akım [A]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
	Işık Akısı	2945	2907	2866	2825	2781	2734	2914	2880	2843	2806	2773	2730
	Optik Güç [W]	8,60	8,51	8,41	8,32	8,21	8,09	8,52	8,46	8,37	8,28	8,20	8,10
	Renk S.[K]	3831	3841	3859	3874	3889	3911	3844	3855	3872	3891	3907	3925
	Ra	83,37	83,4	83,29	83,27	83,15	83,14	83,61	83,57	83,53	83,42	83,35	83,29
	Elektriksel Güç [W]	16,70	16,63	16,57	16,50	16,44	16,37	16,73	16,66	16,60	16,53	16,47	16,41
	Isıl Güç [W]	8,10	8,12	8,15	8,18	8,23	8,29	8,20	8,21	8,22	8,25	8,27	8,31
	Verim [%]	0,51	0,51	0,51	0,50	0,50	0,49	0,51	0,51	0,50	0,50	0,50	0,49
Etkinlik F. [lm/W]	176,4	174,8	173,0	171,2	169,2	167,0	174,2	172,9	171,3	169,7	168,3	166,4	
700 mA	Gerilim [V]	48,964	48,766	48,575	48,389	48,204	48,02	49,009	48,825	48,640	48,460	48,254	48,070
	Akım [A]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	Işık Akısı	5833	5757	5680	5599	5512	5418	5767	5696	5622	5545	5460	5371
	Optik Güç [W]	17,00	16,83	16,63	16,44	16,22	15,99	16,86	16,67	16,51	16,32	16,10	15,87
	Renk S.[K]	3841	3853	3868	3881	3899	3916	3853	3864	3883	3896	3913	3932
	Ra	83,12	83,06	83,08	83,03	83,01	82,88	83,32	83,25	83,24	83,21	83,12	83,04
	Elektriksel Güç [W]	34,27	34,14	34,00	33,87	33,74	33,61	34,31	34,18	34,05	33,92	33,78	33,65
	Isıl Güç [W]	17,27	17,31	17,37	17,43	17,52	17,62	17,45	17,51	17,54	17,60	17,68	17,78
	Verim [%]	0,50	0,49	0,49	0,49	0,48	0,48	0,49	0,49	0,48	0,48	0,48	0,47
Etkinlik F. [lm/W]	170,2	168,6	167,0	165,3	163,4	161,2	168,1	166,7	165,1	163,5	161,6	159,6	
1050 mA	Gerilim [V]	50,015	49,806	49,608	49,416	49,228	49,045	50,007	49,800	49,612	49,430	49,248	49,068
	Akım [A]	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
	Işık Akısı	8630	8509	8384	8258	8130	7984	8515	8404	8285	8162	8035	7891
	Optik Güç [W]	25,10	24,84	24,48	24,21	23,90	23,51	24,82	24,57	24,28	23,96	23,64	23,31
	Renk S.[K]	3849	3863	3876	3892	3906	3925	3859	3874	3888	3903	3921	3938
	Ra	82,83	82,84	82,83	82,79	82,71	82,65	83,04	82,99	83,01	82,92	82,88	82,84
	Elektriksel Güç [W]	52,52	52,30	52,09	51,89	51,69	51,50	52,51	52,29	52,09	51,90	51,71	51,52
	Isıl Güç [W]	27,42	27,46	27,61	27,68	27,79	27,99	27,69	27,72	27,81	27,94	28,07	28,21
	Verim [%]	0,48	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46	0,45
Etkinlik F. [lm/W]	164,3	162,7	161,0	159,2	157,3	155,0	162,2	160,7	159,0	157,3	155,4	153,2	

**Çizelge 3.2 (devam) : Ölçülen COB LED'lerin özellikleri ve bu özelliklerin ortalama değerleri.**

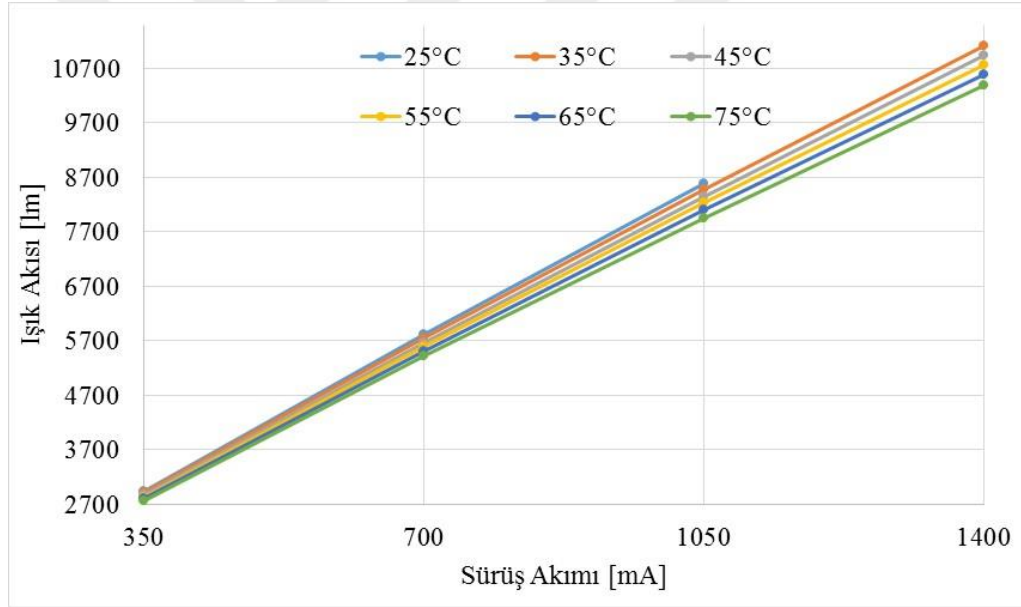
Akım	Özellik	LED 3						Ortalama					
		Sıcaklık [°C]						Sıcaklık [°C]					
		25	35	45	55	65	75	25	35	45	55	65	75
350 mA	Gerilim [V]	47,764	47,582	47,404	47,229	47,052	46,873	47,752	47,568	47,386	47,205	47,025	46,844
	Akım [A]	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35	0,35
	Işık Akısı	2969	2934	2897	2859	2819	2773	2942,7	2907,0	2868,7	2830,0	2791,0	2745,7
	Optik Güç [W]	8,69	8,61	8,53	8,44	8,33	8,23	8,60	8,53	8,44	8,35	8,25	8,14
	Renk S.[K]	3812	3825	3841	3857	3874	3891	3829	3840	3857	3874	3890	3909
	Ra	83,65	83,58	83,52	83,42	83,38	83,29	83,54	83,52	83,45	83,37	83,29	83,24
	Elektriksel Güç [W]	16,72	16,65	16,59	16,53	16,47	16,41	16,71	16,65	16,59	16,52	16,46	16,40
	Isıl Güç [W]	8,03	8,04	8,07	8,09	8,14	8,18	8,11	8,12	8,15	8,18	8,21	8,26
	Verim [%]	0,52	0,52	0,51	0,51	0,51	0,50	0,51	0,51	0,51	0,51	0,50	0,50
Etkinlik F. [lm/W]	177,6	176,2	174,6	173,0	171,2	169,0	176,1	174,6	173,0	171,3	169,6	167,5	
700 mA	Gerilim [V]	49,006	48,818	48,635	48,456	48,28	48,105	48,993	48,803	48,617	48,435	48,246	48,065
	Akım [A]	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7	0,7
	Işık Akısı	5850	5780	5707	5626	5545	5457	5816,7	5744,3	5669,7	5590,0	5505,7	5415,3
	Optik Güç [W]	17,07	16,93	16,76	16,55	16,35	16,12	16,98	16,81	16,63	16,44	16,22	15,99
	Renk S.[K]	3821	3832	3846	3861	3876	3894	3838	3850	3866	3879	3896	3914
	Ra	83,33	83,24	83,22	83,17	83,08	82,98	83,26	83,18	83,18	83,14	83,07	82,97
	Elektriksel Güç [W]	34,30	34,17	34,04	33,92	33,80	33,67	34,30	34,16	34,03	33,90	33,77	33,65
	Isıl Güç [W]	17,23	17,24	17,28	17,37	17,45	17,55	17,32	17,35	17,40	17,47	17,55	17,65
	Verim [%]	0,50	0,50	0,49	0,49	0,48	0,48	0,50	0,49	0,49	0,48	0,48	0,48
Etkinlik F. [lm/W]	170,5	169,1	167,6	165,9	164,1	162,1	169,6	168,1	166,6	164,9	163,0	161,0	
1050 mA	Gerilim [V]	50,046	49,821	49,631	49,448	49,27	49,072	50,023	49,809	49,617	49,431	49,249	49,062
	Akım [A]	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05	1,05
	Işık Akısı	8617	8508	8389	8271	8139	8003	8587,3	8473,7	8352,7	8230,3	8101,3	7959,3
	Optik Güç [W]	25,08	24,83	24,56	24,27	23,94	23,58	25,00	24,75	24,44	24,15	23,83	23,47
	Renk S.[K]	3827	3839	3852	3867	3882	3899	3845	3859	3872	3887	3903	3921
	Ra	83,03	82,99	82,95	82,87	82,81	82,74	82,97	82,94	82,93	82,86	82,80	82,74
	Elektriksel Güç [W]	52,55	52,31	52,11	51,92	51,73	51,53	52,52	52,30	52,10	51,90	51,71	51,51
	Isıl Güç [W]	27,47	27,48	27,55	27,65	27,79	27,95	27,52	27,55	27,66	27,76	27,88	28,05
	Verim [%]	0,48	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46	0,48	0,47	0,47	0,47	0,46	0,46
Etkinlik F. [lm/W]	164,0	162,6	161,0	159,3	157,3	155,3	163,5	162,0	160,3	158,6	156,7	154,5	

**Çizelge 3.2 (devam) : Ölçülen COB LED'lerin özellikleri ve bu özelliklerin ortalama değerleri.**

Akım 1400 mA	Özellik	LED 1						LED 2					
		Sıcaklık [°C]						Sıcaklık [°C]					
		30	35	45	55	65	75	30	35	45	55	65	75
	Gerilim [V]	50,861	50,755	50,55	50,355	50,168	49,983	50,819	50,716	50,522	50,336	50,156	49,979
	Akım [A]	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
	Işık Akısı	11261	11182	11017	10837	10644	10451	11082	11006	10839	10673	10492	10305
	Optik Güç [W]	32,75	32,60	32,20	31,75	31,25	30,75	32,33	32,08	31,75	31,36	30,89	30,38
	Renk S.[K]	3866	3872	3887	3901	3919	3937	3877	3882	3897	3913	3931	3946
	Ra	82,65	82,63	82,61	82,59	82,57	82,51	82,83	82,82	82,8	82,78	82,7	82,72
	Elektriksel Güç [W]	71,21	71,06	70,77	70,50	70,24	69,98	71,15	71,00	70,73	70,47	70,22	69,97
	Isıl Güç [W]	38,46	38,46	38,57	38,75	38,99	39,23	38,82	38,92	38,98	39,11	39,33	39,59
	Verim [%]	0,46	0,46	0,45	0,45	0,44	0,44	0,45	0,45	0,45	0,45	0,44	0,43
	Etkinlik F. [lm/W]	158,1	157,4	155,7	153,7	151,5	149,4	155,8	155,0	153,2	151,5	149,4	147,3
1400 mA	Özellik	LED 3						Ortalama					
		Sıcaklık [°C]						Sıcaklık [°C]					
		30	35	45	55	65	75	30	35	45	55	65	75
	Gerilim [V]	50,845	50,734	50,54	50,358	50,176	50,001	50,842	50,735	50,537	50,350	50,167	49,988
	Akım [A]	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4	1,4
	Işık Akısı	11229	11152	10986	10816	10638	10443	11190,7	11113,3	10947,3	10775,3	10591,3	10399,7
	Optik Güç [W]	32,70	32,53	32,10	31,71	31,28	30,74	32,59	32,40	32,02	31,61	31,14	30,62
	Renk S.[K]	3841	3847	3861	3876	3894	3909	3861	3867	3882	3897	3915	3931
	Ra	82,77	82,73	82,7	82,64	82,56	82,57	82,75	82,73	82,70	82,67	82,61	82,60
	Elektriksel Güç [W]	71,18	71,03	70,76	70,50	70,25	70,00	71,18	71,03	70,75	70,49	70,23	69,98
	Isıl Güç [W]	38,48	38,50	38,66	38,79	38,97	39,26	38,59	38,63	38,74	38,88	39,09	39,36
	Verim [%]	0,46	0,46	0,45	0,45	0,45	0,44	0,46	0,46	0,45	0,45	0,44	0,44
	Etkinlik F. [lm/W]	157,7	157,0	155,3	153,4	151,4	149,2	157,2	156,5	154,7	152,9	150,8	148,6



**Şekil 3.4 :** Farklı sürüş akım kademelerinde artan sıcaklığın ışık akısına etkisi.



**Şekil 3.5 :** Artan sürüş akımında farklı sıcaklıklar için ışık akısı değişimi.

Çalışmada yapılacak kabullerde, bu üç örnek COB LED'in farklı sürüş akımı ve sıcaklık basamaklarındaki ölçüm sonuçlarının ortalama değerleri kullanılmaktadır.

### 3.3 Prototipde Kullanılacak COB LED Sayısının Belirlenmesi

Tez kapsamında değerlendirilen armatürler yüksek güç ve ışık akısı gereksinimi bulunan endüstriyel yüksek tavan aydınlatma armatürleridir. Soğutma sistemlerinin karşılaştırılması amaçlı üretilecek COB LED'li prototipte kullanılacak ışık kaynağı

sayısı, Çizelge 3.1’de verilen ve piyasada mevcut yüksek tavan armatürlerindeki en yüksek ışık akısı değeri olan 32000 lm ve %20’lik bir optik kayıp değeri dikkate alınarak, Eşitlik 3.1 yardımı ile hesaplanmıştır. Kritik ısı koşulların yaratılması hedeflenerek, gerçekleştirilen deneylerdeki en yüksek sürüş akımı kademesi olan 1400 mA ve ışık akısı olarak da bu akım kademesinde 70°C plaka sıcaklığındaki tek bir COB LED’in ortalama ışık akısı değeri alınmıştır. Bu sıcaklıktaki (70°C) ışık akısı değeri 65°C ve 75°C’deki ölçülen ışık akısı değerlerinin enterpolasyonu bir başka deyişle ortalaması alınarak elde edilmiştir. Kullanılması gereken COB LED sayısı 3,81 olarak bulunmuş, tasarım ve simülasyonlarda bir yüksek tam sayı değeri olan dört adet COB LED kullanılmıştır.

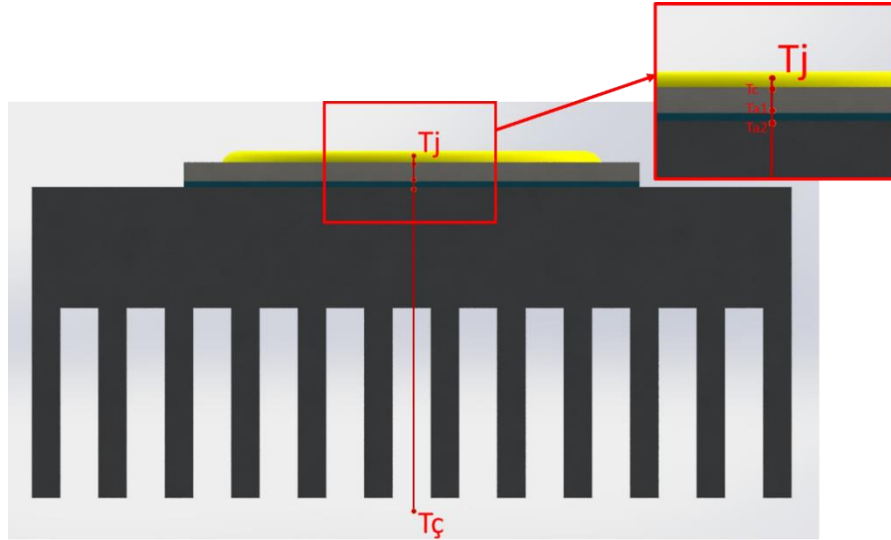
$$\text{COB LED Sayısı} = \frac{32000 \text{ [lm]}}{10496 \text{ [lm]} \times 0,8} = 3,81 \quad (3.1)$$

## 4. ARMATÜR TASARIMI, ISIL SİMÜLASYONLAR VE DENEYSEL ÖLÇÜMLER

Tez kapsamında incelenen soğutma sistemleri ile ilgili detaylı analiz ve ölçümler bu bölümde verilmektedir.

### 4.1 LED Işık Kaynaklı Bir Armatürün Direnç Şeması

LED ışık kaynaklı bir yapıda jonksiyon noktası sıcaklığının belirlenebilmesi için kullanılan tüm malzemelerin ısı iletkenlik katsayılarının [W/mK] ya da ısı dirençlerinin [K/W] bilinmesi gerekmektedir. Şekil 4.1’de kanatlı tip soğutucuya sahip LED ışık kaynaklı bir armatür yapısının basitleştirilmiş ısı direnç şeması görülmektedir. Jonksiyon noktası sıcaklığı  $T_j$ , kasa (case) sıcaklığı  $T_c$ , ısı arayüzey malzemesinin üst ve alt noktalarındaki sıcaklıklar sırasıyla  $T_{a1}$  ve  $T_{a2}$ , çevre sıcaklığı ise  $T_ç$  olarak gösterilmektedir. Jonksiyon noktası sıcaklığından çevre sıcaklığına kadar olan dirençlerin ısı analiz programına tanımlanması gerekmektedir.



Şekil 4.1 : LED ışık kaynaklı bir armatür yapısının basitleştirilmiş ısı direnç şeması.

#### 4.1.1 Jonksiyon noktası ile kasa (case) arasındaki ısı direnç ( $R_{j-c}$ )

LED’lerin jonksiyon noktası sıcaklığı, LED üretici firmaların kataloglarında belirttiği jonksiyon noktası ve PCB arasındaki ısı direnç değeri kullanılarak hesaplanmaktadır.

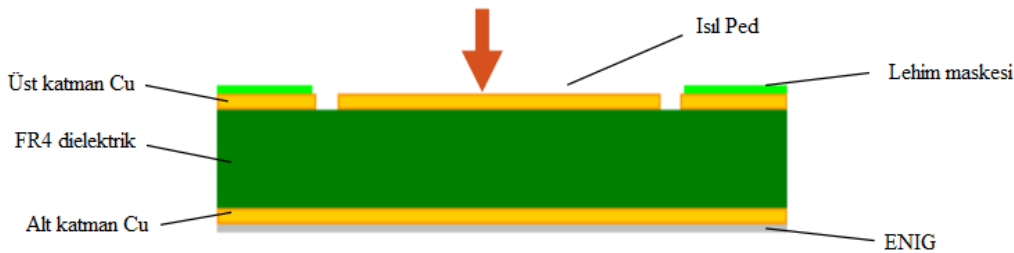
Bu çalışmada kullanılan COB LED'e ait ısıl direnç değeri, COB LED'in dairesel alanı dikkate alınarak ısıl analiz programında kullanılmak üzere  $K.m^2/W$  birimine çevrilmiş ve ısıl simülasyonların bulunduğu bölümde verilmiştir.

#### 4.1.2 Kasa noktasından ısıl arayüzey malzemesinin başlangıcına kadar olan baskı devre kartının (PCB) ısıl direnci ( $R_{c-a1}$ )

LED'ler elektrik bağlantılarının da yapıldığı bir baskı devre kartı (Printed Circuit Board-PCB) üzerine monte edilerek kullanılmaktadır.

Bileşenlerle doğrudan temas halinde bir destek elemanı olan PCB, ısıl yönetimin sağlanmasında dikkate alınan ana elemanlardan biridir. Piyasada LED uygulamalarına uygun, kendi içlerinde üstünlük ve zayıflıkları bulunan çok sayıda PCB teknolojisi mevcuttur. Bununla birlikte, tüm PCB teknolojilerinin kendilerine göre üstünlükleri bulunduğundan hangisinin en iyi olduğu farklı gereksinim ve şartları olan uygulamalara göre değişiklik göstermektedir (Url-8).

FR-4 en yaygın kullanılan PCB türlerinden biri olup Kuzey Amerika'daki National Electrical Manufacturers Association (NEMA)'nın alev geciktirici, cam yünü takviyeli epoksi laminatlara verdiği isimdir. FR-4 düşük ısıl iletkenliğe sahiptir. Şekil 4.2'de iki katmanlı FR-4 PCB'nin tipik kesit geometrisi görülmektedir. FR-4 PCB katmanlarının tipik ısıl iletkenlikleri de Çizelge 4.1'de verilmektedir (Url-9).



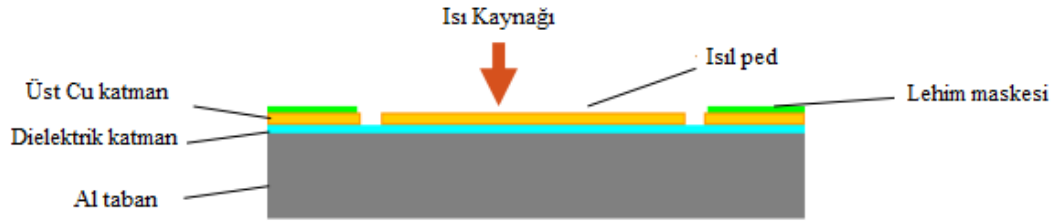
Şekil 4.2 : FR-4 PCB'nin tipik kesit geometrisi (Url-9).

Çizelge 4.1 : FR-4 PCB katmanlarının tipik ısıl iletkenlik değerleri (Url-9).

Katman/Malzeme	Kalınlık [ $\mu m$ ]	Isıl iletkenlik [ $W/mK$ ]
SnAgCu lehim	75	58
Üst katman Cu	70	398
FR-4 dielektrik	1588	0,2
Alt katman Cu	70	398
Elektroliz Nikel/daldırma altın (ENIG)	5	4,2

FR-4 PCB'lerde ısı geçişini iyileştirmenin pahalı olmayan bir yolu, iletken tabakalar arasına ısıl hatlar (kaplanmış bir uçtan bir uca kanallar) eklemektir (Url-9).

Diğer bir PCB çeşidi olan basit tek katmanlı MCPCB ise; lehim maskesi, bakır devre katmanı, ısıl iletken dielektrik katman ve metal ana maddeli taban katmanından oluşmaktadır (Şekil 4.3). Bu üç tabaka katmanlanmış ve birbirine bağlanmış, böylelikle ısının yayılacağı bir yol oluşturulmuştur. Metal alt katman genellikle alüminyum olmakla birlikte, bu amaçla çelik ve bakır da kullanılabilir (Url-9).



Şekil 4.3 : MCPCB'nin tipik kesit geometrisi (Url-9).

Çizelge 4.2'de MCPCB katmanlarının tipik ısıl iletkenlik değerleri ve kalınlıkları verilmektedir (Url-9).

Çizelge 4.2 : MCPCB katmanlarının tipik ısıl iletkenlik değerleri (Url-9).

Katman/Malzeme	Kalınlık [ $\mu\text{m}$ ]	Isıl iletkenlik [ $\text{W/mK}$ ]
SnAgCu lehim	75	58
Üst katman Cu	70	398
PCB dielektrik	100	2,2
Al plaka	1588	150

Kullanılan COB LED'in kataloğunda direnç değeri jonksiyon noktasından COB'nin alt yüzeyine kadar verilmiştir. Modelde ise bu direnç değeri PCB ile LED'in üst katmanı arasındaki dairesel alan olarak tanımlanmıştır. Ayrıca ilave bir dirence sebep olmaması için çalışmada ısıl modellemeler gerçekleştirilirken, COB LED PCB'si MCPCB'nin en kalın katmanını oluşturan alüminyum tabaka olarak kabul edilmiştir. Tanımlanan ısıl iletkenlik değerine ısıl simülasyonların bulunduğu bölümde yer verilmektedir.

### 4.1.3 Isıl arayüzey malzemesinin direnci ( $R_{a1-a2}$ )

Isıl arayüzey malzemelerinin amacı en basit tanımıyla; havanın düşük ısı iletkenliğini dikkate alarak, birleştirilecek metal yüzeyler arasındaki hava boşluklarının azaltılmasıdır. LED ışık kaynaklı armatür yapılarında ısı direncin azaltılması, çok değişik form ve çeşitlerde bulunabilen ısı arayüzey malzemelerinin değerlendirilmesi ve seçilmesini gerektirmektedir (Saums, 2014).

Birleştirilecek yüzeyler tam olarak pürüzsüz olamamakta ve bu sebeple arada ısı geçişini olumsuz etkileyen boşluklar kalabilmektedir (Şekil 4.4). Isıl arayüzey malzemeleri kullanılarak bu boşlukların azaltılıp ısı geçişinin iyileştirilmesi amaçlanmaktadır. Isıl arayüzey malzemelerinin; silikon bazlı ya da silikon bazlı olmayan ısıl macunlar, faz değiştiren malzemeler, ısıl bantlar, yapıştırıcılar, jeller, pedler vb. çok sayıda çeşidi bulunmaktadır.



**Şekil 4.4 :** İki malzemenin birleşim bölgesindeki boşlukların ısıl ara yüzey malzemesi ile doldurulması.

Belli başlı ısıl arayüzey malzemelerinin üstünlük ve zayıflıkları Çizelge 4.3'te verilmektedir (Majahan, 2004). Uygulama alanına uyumlu olacak şekilde, ısıl arayüzey malzemelerinin özellikleri göz önünde bulundurularak seçim gerçekleştirilmelidir.

Bu çalışmada Keratherm KP 97 marka termal macun, PCB'lerin alt yüzeyi ile kanatlı soğutucu arasına uygulanmıştır. Bu malzemenin özellikleri Çizelge 4.4'te verilmektedir. KP 97 macunun temas basıncına bağlı ısıl direnç değerleri ise Şekil 4.5'te görülmektedir.

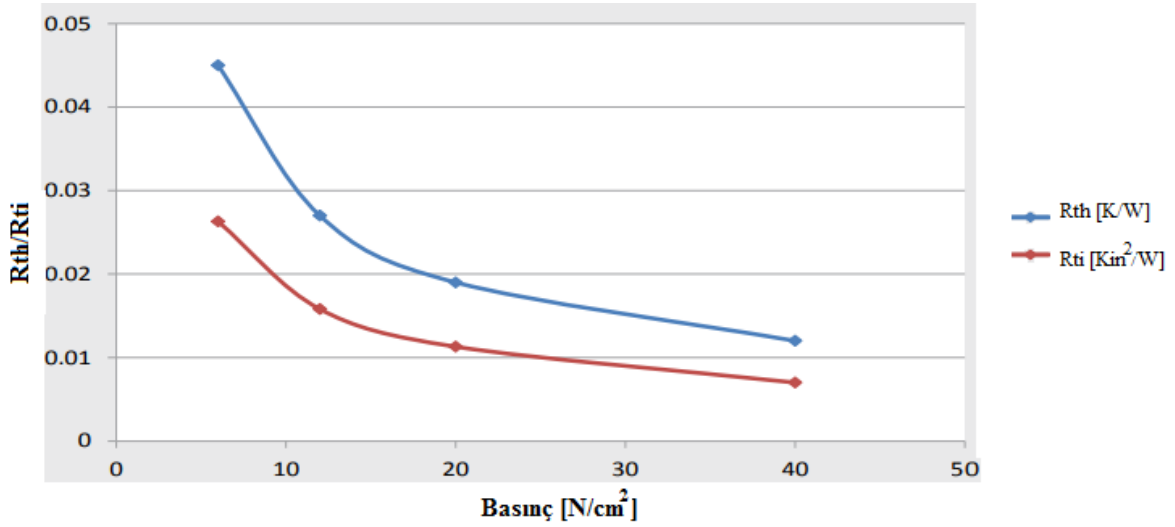
**Çizelge 4.3 : Isıl arayüzey malzemelerinin üstünlük ve zayıflıkları (Majahan, 2004).**

Isıl Arayüzey Malzemesi	Üstünlük	Zayıflık
<b>Macunlar (Gresler)</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek ısı iletim katsayısı</li> <li>• Düşük birleştirme basıncıyla ince bağlantı bölgesi kalınlığı</li> <li>• Düşük vizkozite matris malzemesinin yüzey çatlaklarının kolayca doldurulabilmesi</li> <li>• Kürlenme gerekmemesi</li> <li>• Katmanlara ayrılmaması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macunun dışarı pompalanmaya ve faz ayrılmasına elverişli olması</li> <li>• Bulaşma eğilimi olduğundan üretim ortamında dağınıklığa sebep olabilmesi</li> </ul>
<b>Faz değiştiren malzemeler</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Yüksek viskozitenin kararlılığı arttırması ile dışarı pompalanmaya elverişliliğin azaltılabilmesi</li> <li>• Uygulama ve kullanımının macunlara göre kolay olması</li> <li>• Kürlenme gerekmemesi</li> <li>• Katmanlara ayrılmaması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Macunlara göre düşük ısı iletkenlik</li> <li>• Yüzey direncinin macunlara göre daha yüksek olabilmesi, ancak ısı ön işlem ile azaltılabilmesi</li> <li>• Isıl verimi arttırmak için bağlantı basıncı gerektirdiğinden artan mekanik gerilmelere neden olabilmesi</li> </ul>
<b>Jeller</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kürlenmeden önce yüzey düzgünlüklerine uygunluk</li> <li>• Dışarı pompalanma ya da taşınma riskinin olmaması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kürlenme gerektirmesi</li> <li>• Macunlara göre düşük ısı iletkenlik</li> <li>• Yapıştırıcılara göre daha az yapıştırıcılık; katmanlara ayrılabilirlik</li> </ul>
<b>Yapıştırıcılar</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kürlenmeden önce yüzey düzgünlüklerine uygunluk</li> <li>• Dışarı pompalanma riskinin olmaması</li> <li>• Taşınma riskinin olmaması</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Kürlenme gerektirmesi</li> <li>• Güvenilirlik testi sonrası katmanlara ayrılabilirlik</li> <li>• Kürlenmiş epoksiler yüksek kürlenme sonrası modülüne sahip olduğundan, ısı genleşme katsayısı uyumsuzluğu kaynaklı gerilme riski</li> </ul>

**Çizelge 4.4 : Keratherm KP 97 termal macunun özellikleri (Url-10).**

Özellikler	Birim	KP97
Renk		Beyaz
<b>Isıl Özellikler</b>		
Isıl Direnç $R_{th}$	K/W	0,012
Isıl Empedans $R_{ti}$	$^{\circ}Cmm^2/W$	4,5
Isıl İletkenlik	$Kin^2/W$	0,007
	W/mK	5
<b>Elektriksel Özellikler</b>		
Elektriksel iletkenlik (DIN 51412-1'e göre)	pS/m	0
<b>Mekanik Özellikler</b>		
Ölçülen kalınlık (+/- %10)	mm	0,025
<b>Fiziksel Özellikler</b>		
Uygulama Sıcaklığı	$^{\circ}C$	-60'dan 200'e
Yoğunluk	$g/cm^3$	2,1

Isıl empedans, birleşim ara yüzeyinden geçen birim ısı akısı için oluşan sıcaklık gradyeni olarak tanımlanabilir (Url-11).



Şekil 4.5 : KP 97 macunun temas basıncına bağlı ısı direnci ve empedans değeri (Url-10).

PCB'ler soğutucu üzerine vidalar ile bağlanmaktadır. Bu bağlantı esnasında üniform bir basınç sağlanamadığından PCB'lerde vidalama basıncına bağlı olarak eğilmelerin oluşmaması için, yüksek basınçlar uygulanamamaktadır. Bu olasılıklar değerlendirilerek üreticinin sağladığı en düşük basınç değerindeki (~5 N/cm<sup>2</sup>) ısı empedans (R<sub>ti</sub>) Şekil 4.5'teki grafikten yaklaşık 0,026 Kin<sup>2</sup>/W olarak okunmuş ve birim dönüşümü yapılarak 0,17 Kcm<sup>2</sup>/W olarak ısı analizlerde kullanılmıştır.

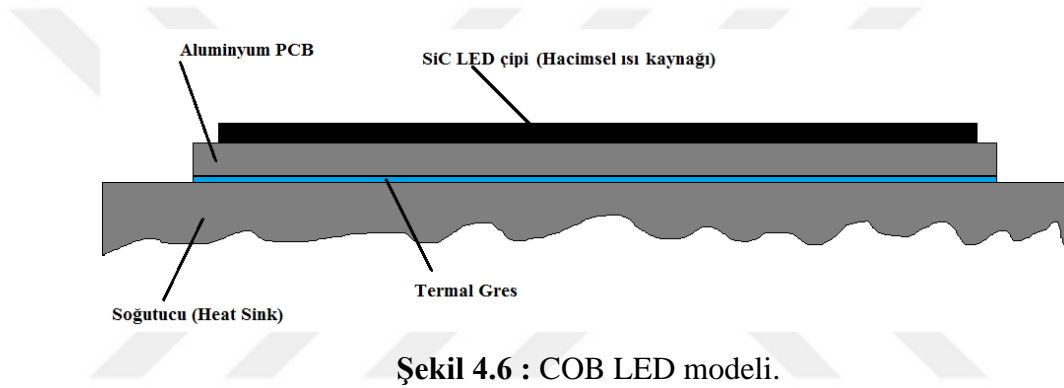
#### 4.2 Sadece Soğutucu Kanatların Kullanıldığı Tasarımın Isıl Simülasyonu, Deneysel Analizi ve Karşılaştırmalı Doğrulmaları

Bu tez kapsamında ısı simülasyonu sonuçlarının gerçek üretim sonucu elde edilen prototibin deneysel ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılması amaçlanmaktadır. Bu doğrultuda çeşitli ön ısı analizlerle soğutucu plaka boyutları yaklaşık olarak belirlenmeye çalışılmıştır. Diğer yandan üretim koşulları, tekniği ve kabiliyeti dikkate alınarak soğutucu sistemlerinin karşılaştırılması amaçlı tasarlanacak prototibin plaka boyutlarının 290mm×221mm×14mm, kanat yüksekliğinin ise 76 mm olmasına karar verilmiştir. Prototip 26 adet 1 mm kalınlığında kanada sahiptir. Kanatların oldukça ince tutulmasının bir sebebi de ağırlığın mümkün olduğunca düşürülmesi ve malzeme kullanımının azaltılmasıdır. Kanat sayısı seçiminde ise ısı performansı ve üretim

olanaklarının dışında kanat boşluklarının eşit uzunlukta olması da göz önüne alınmıştır. Her bir kanat arası boşluk 7,8 mm'dir.

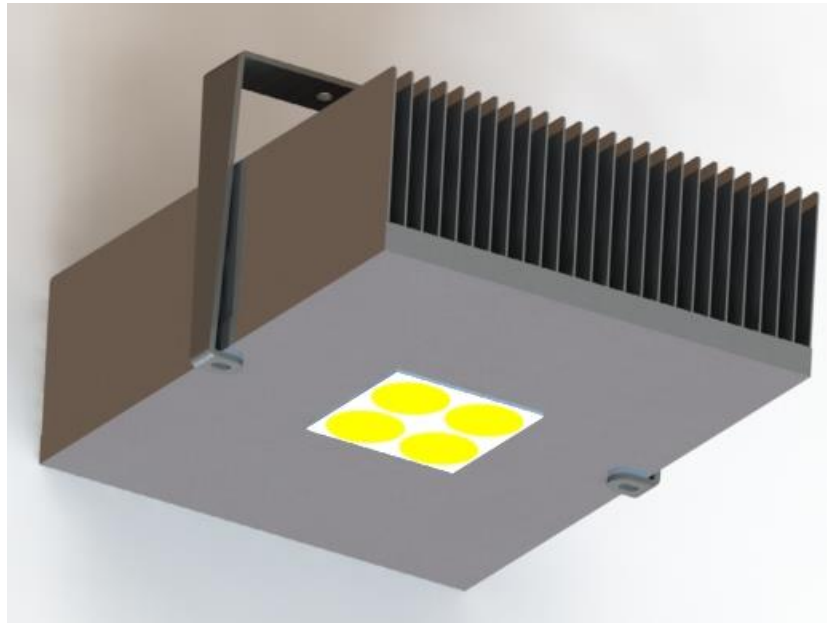
#### 4.2.1 Isıl simülasyonlar

Tasarlanan armatür prototipinin ısı simülasyonlarının gerçekleştirilebilmesi için, kanatlı soğutucu ve kullanılan COB LED'ler modellenmiştir. Bu çalışmada COB LED, Silikon Karbid bir LED çipi ve tek katmanlı alüminyum bir PCB olarak modellenmiştir (Şekil 4.6). Isıl simülasyonların yapılabilmesi için İTÜ, Enerji Enstitüsü, Enerji Planlaması ve Yönetimi Anabilim Dalına Mentor Graphics FloEFD programının üniversite lisansı yıllık olarak kiralanmış ve simülasyonlar gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.6 : COB LED modeli.

Armatür prototipinin yapısı ve COB LED ışık kaynaklarının prototip üzerindeki konumu Şekil 4.7'de görülmektedir.



Şekil 4.7 : Tasarlanan COB LED'li armatür prototipi.

Isıl simülasyonlarda malzemelere atanan özellikler Çizelge 4.5'te görülmektedir. Isıl direnç değerleri ise Çizelge 4.6'da verilmektedir.

**Çizelge 4.5 : Isıl simülasyonlarda kullanılan malzeme özellikleri.**

Eleman	Malzeme	Isıl İletkenlik [W/mK]	Isınım Yayınrlığı Katsayısı
LED Çipi	Silikon Karbid	150 (@293 K)	0,7
PCB	Alüminyum 5052	140 (@273 K)	0,05
Soğutucu	Alüminyum 1050	222	0,05
Askı Elemanı	Paslanmaz Çelik 304	16,2	0,075

**Çizelge 4.6 : Isıl direnç değerleri.**

Isıl Direnç	Malzeme	Değer [ $10^{-5}$ K.m <sup>2</sup> /W]
LED Çipi - PCB	-	5
PCB - Soğutucu	KP97 Termal Macun	1,7
Soğutucu –Askı Elemanı	KP97 Termal Macun	1,7

Isıl simülasyonlarda çevre sıcaklığı 25 °C olarak kabul edilmiştir. Isıl yönetim zorluğunun artması sebebiyle bu tez çalışmasında yüksek güçler hedeflenmiş, bu nedenle ısı simülasyon ve deneysel analizler verileri mevcut en yüksek 1400 mA sürüş akımı kademesinde gerçekleştirilmiştir.

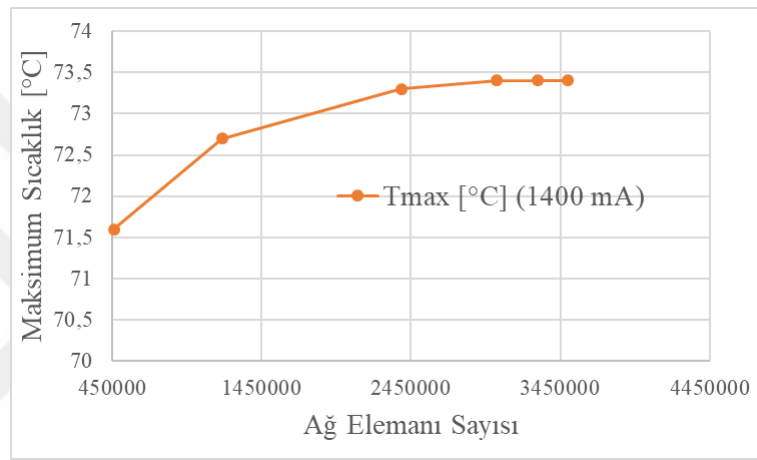
COB LED'lerin ölçümleri alt plaka sıcaklığına göre yapıldığından, ısı güç kabulleri de hedef alt plaka sıcaklığına göredir. 1400 mA sürüş akımında hedef alt plaka sıcaklığı olarak 70 °C seçilmiştir. Çizelge 3.2 kullanılarak bu sıcaklıktaki ısı güç değeri dört adet COB LED için interpolasyon ile 156,9 W olarak hesaplanmıştır.

Isıl simülasyonlarda kullanılan ağın doğru sonuç verebilmesi için bir ağ duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, prototipte oluşan maksimum sıcaklığın 4 numaralı ağdan sonra artan ağ elemanı sayısı ile anlamlı biçimde değişmediği görülmüştür (Çizelge 4.7).

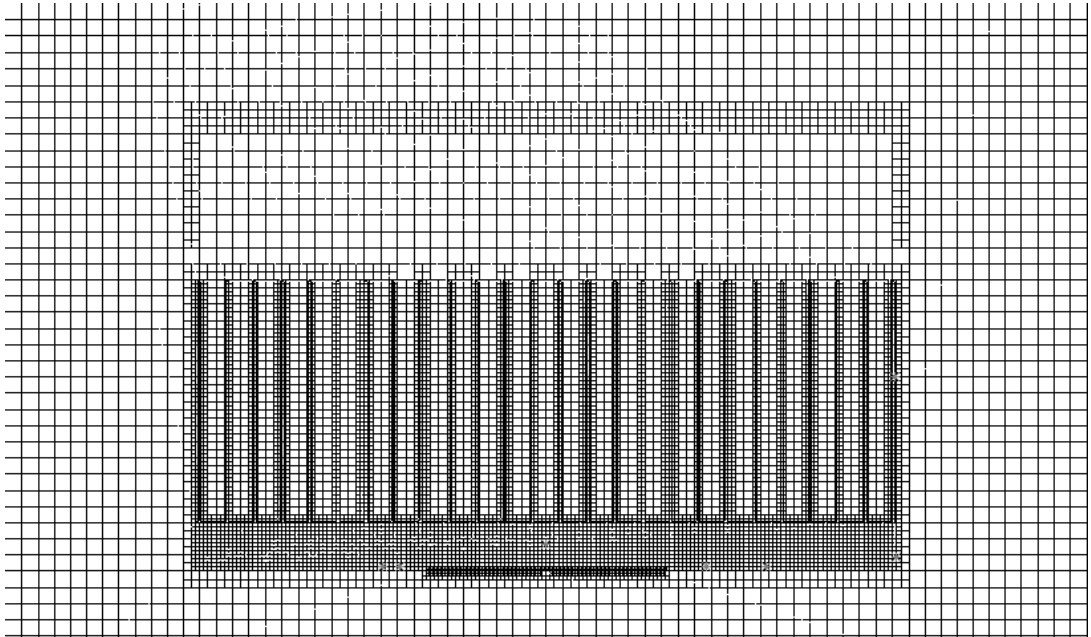
**Çizelge 4.7 : Ağ duyarlılık analizi.**

Ağ	Katı Eleman	Toplam Eleman	Tmaks. [°C] (1400 mA)
1	174659	458700	71,61
2	451204	1184666	72,67
3	918516	2383876	73,27
4	1216770	3022719	73,39
5	1342560	3301325	73,41
6	1422103	3502324	73,36

Analizlerin gerçekleştirildiği akım kademesinde prototipteki maksimum sıcaklığın farklı ağ elemanı sayısına göre değişimi Şekil 4.8’de de görülmektedir. Bu sonuçlara dayanılarak, dört numaralı ağın simülasyonlarda kullanılmasına karar verilmiştir. Bu ağın bir kesidinin görünüşü Şekil 4.9’da verilmektedir. Şekil 4.10’da ise 1400 mA sürüş akımında prototipteki sıcaklık dağılımı görülmektedir. Beklendiği gibi prototip ortasında, bir başka deyişle COB LED’lerin bulunduğu bölgede sıcaklık prototipin diğer bölgelerine göre daha yüksek olmaktadır. Bu durum, ısı borularının kullanımının orta bölgedeki sıcaklığın armatürün farklı bölgelerine transfer edilmesinde olumlu sonuçlar verme potansiyelinin olduğunu ortaya koymaktadır.

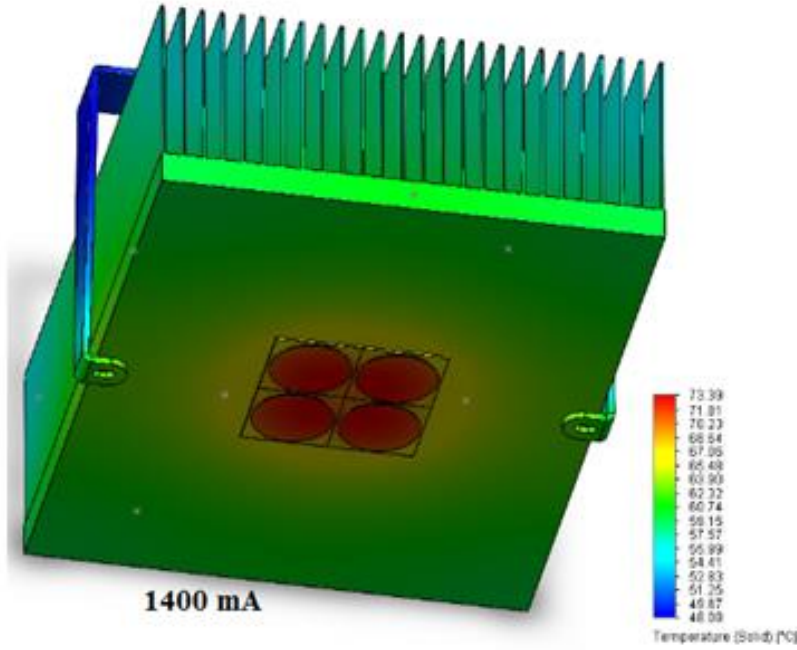


Şekil 4.8 : Maksimum sıcaklık-ağ elemanı sayısı.

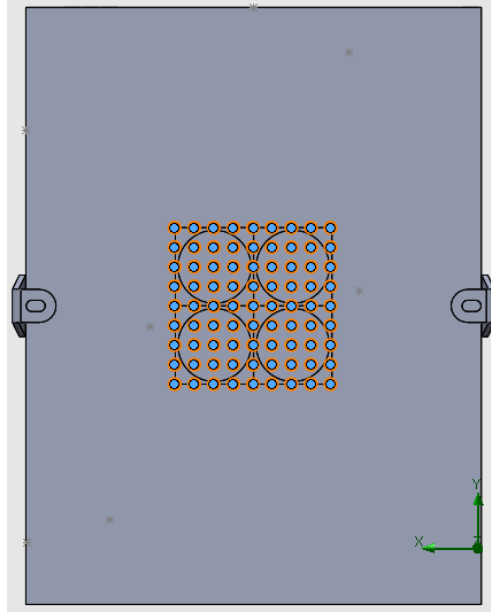


Şekil 4.9 : Dört numaralı ağın bir kesit resmi.

Çizelge 3.2 incelendiğinde ısı gücünün sıcaklık artışından elektriksel güç ve optik güç kadar etkilenmediği gözlemlenmektedir. Fakat yine de doğru alt plaka sıcaklığının hedef olarak belirlenip ısı gücü değerinin seçilmesi, sonuçların gerçeğe yakınlığı için önemli olmaktadır. Isıl analizler sonucunda elde edilen alt plaka sıcaklığının, hedef sıcaklık ile uyumlu olup olmadığının kontrol edilebilmesi için PCB'nin altında kalan bölgedeki soğutucunun üzerinde 81 adet değerlendirme noktası belirlenmiştir (Şekil 4.11). Simülasyonlar sonucunda bu noktalar için bulunan sıcaklıkların ortalaması alınarak "simülasyon sıcaklık değeri" olarak kabul edilmiştir. 1400 mA'de 81 noktanın ortalaması 69,1°C olarak belirlenmiştir. Elde edilen bu değer, hedef sıcaklık değeri olan 70°C ile kabul edilebilir düzeyde uyumludur. Bu değerlendirmeler sonucunda, soğutma amacıyla sadece kanatların kullanıldığı ilk prototip ve ısı boruları ile kanatların birlikte kullanıldığı ikinci prototip tasarımı ile elde edilecek sonuçların karşılaştırılmasında parametre olarak, örnek COB LED'lerin tekil ölçüm sonuçlarının ortalaması kullanılarak yapılan ısı simülasyonlarla 81 adet nokta için elde edilen ortalama sıcaklık değerlerinin kullanılmasına karar verilmiştir.



Şekil 4.10 : Prototip tasarımındaki sıcaklık dağılımı.



Şekil 4.11 : Soğutucu üzerinde sıcaklık ölçümü için belirlenen 81 nokta.

#### 4.2.2 Prototip üretim süreci

Yüksek güçlü ve yüksek ışık akıllı LED’li armatürlerdeki ısı borulu soğutma sistemlerinin etkisini karşılaştırmak amaçlı oluşturulacak prototipler, bir aydınlatma armatürünün tüm bileşenlerinden değil sadece ısı birikim ve akış yollarının olduğu düzeneklerinden oluşacaktır. Çalışma kapsamındaki prototip üretim süreci alüminyum bloğun işlenmesi ve montaj aşamalarından oluşmaktadır. Öncelikle Şekil 4.12’de görülen metal bloktan soğutucu kanatlar işlenmiş ardından LED’lerin monte edileceği yüzeyin pürüzleri giderilerek düzeltilmiş ve montaj delikleri açılmıştır.

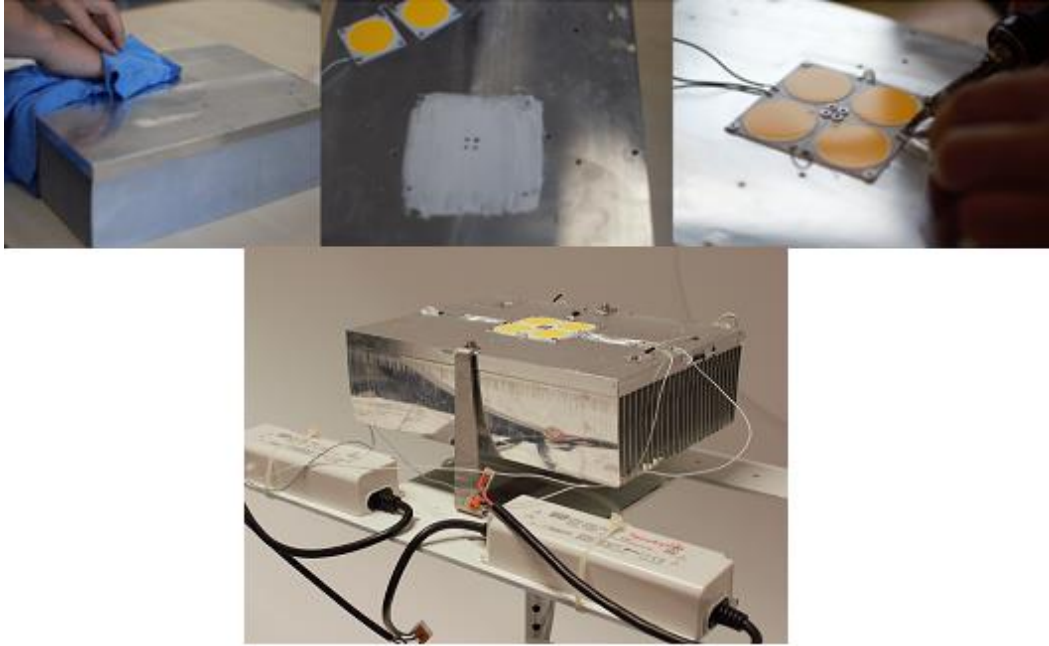


Şekil 4.12 : Alüminyum bloğun işlenmesi.

Prototip montaj işlemleri aşağıdaki basamaklarla gerçekleştirilmiştir (Şekil 4.13);

- LED’lerin monte edileceği yüzeyin isopropil alkol ile temizlenerek ısı transfer yüzeylerindeki imalat esnasında oluşmuş kalıntıların giderilmesi,

- LED'ler ile soğutucu arasında ısı transferinin iyileştirilmesi amacıyla PCB ile soğutucunun temas yüzeyleri arasına termal macun uygulanması,
- LED'lerin soğutucu üzerine vida bağlantısı ile monte edilmesi,
- LED'lerin elektrik ve sürücü bağlantılarının yapılması,
- Prototip askı elemanının monte edilmesi.



Şekil 4.13 : Prototip montajı.

#### 4.2.3 Deneysel ölçümler

Deney esnasında prototip, ısı simülasyonlarda olduğu gibi herhangi bir yüzey ile temas etmemesi için Şekil 4.14'teki deney düzeneğinde görülen askı mekanizmasıyla havada tutulmuştur. Ortam sıcaklığı ve hava hızı problemler ile sürekli kontrol edilmiştir. Ortam sıcaklığının  $25^{\circ}\text{C} \pm 0,3^{\circ}\text{C}$  aralığında ve ortamdaki hava hızının  $0,04 \text{ m/s}$ 'nin altında olduğu gözlemlenmiştir. İki adet sabit akım sürücüsü COB LED'lerin beslenmesi amacıyla kullanılmıştır.

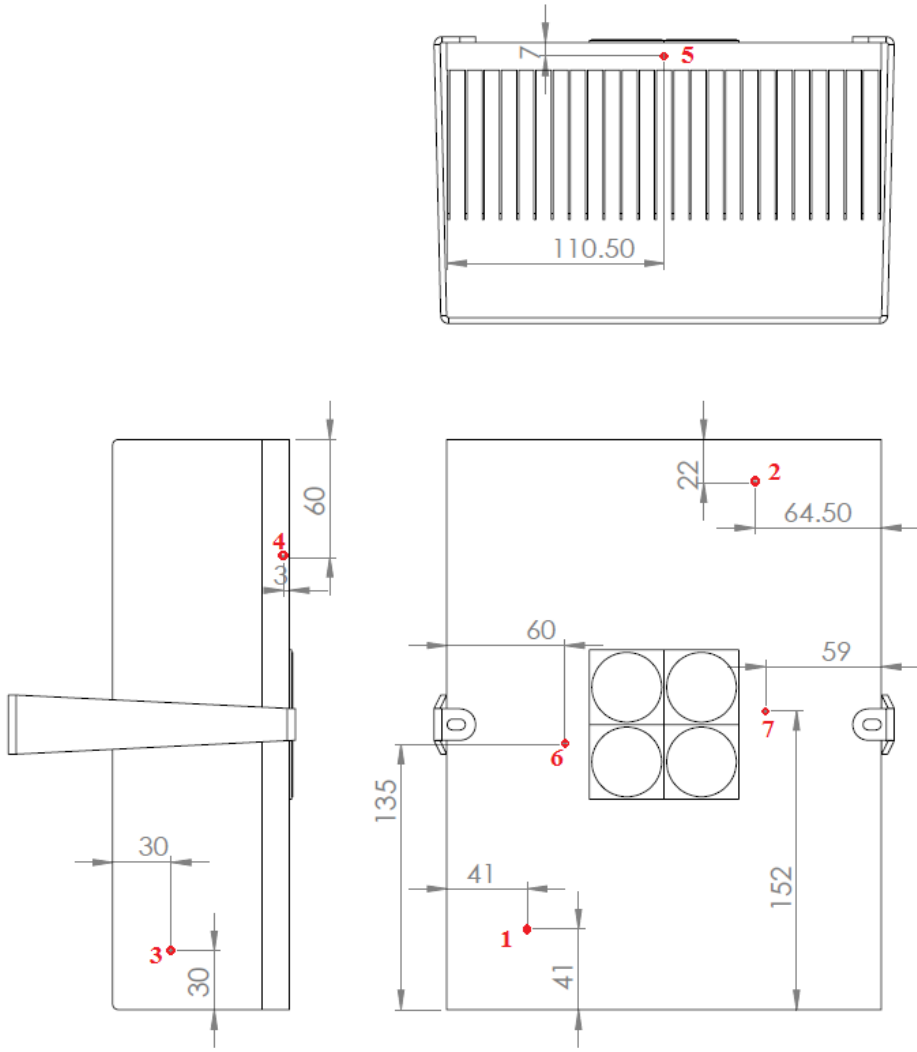
Sıcaklık ölçümleri Keithley 2700 Dijital Multimetre cihazı kullanılarak,  $1400 \text{ mA}$  sürüş akımında çalışan prototipe bağlanan K tipi termokupllarla gerçekleştirilmiştir.



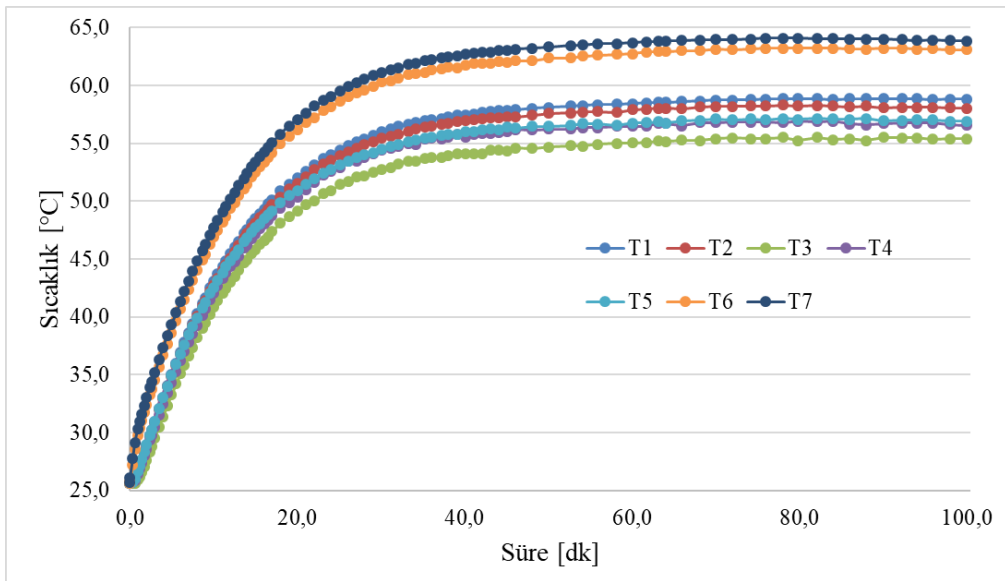
Şekil 4.14 : Deney düzeneği.

Prototip üzerindeki yedi noktadan deneysel ölçümler alınmıştır. Ölçüm alınan noktalar Şekil 4.15'te prototipin farklı kesitleri üzerinde 1'den 7'ye numaralandırılmıştır.

Şekil 4.16'da belirlenen bu yedi ölçüm noktasında 1400 mA sürüş akımındaki sıcaklıkların zamana bağlı değişim grafikleri görülmektedir. Ölçümün ilk bölümünde sıcaklık değişimi hızlı olduğundan kısa zaman aralıklarıyla ölçümler alınırken, prototip sıcaklığı dengeye gelmeye başlayınca ölçüm sıklığı azaltılmıştır. Bu ölçümler, armatür prototipinin ısı dengeye geldiği durumu belirleyebilmek ve ölçüm noktalarının ısı denge halindeki sıcaklık değerlerini elde etmek amacıyla gerçekleştirilmiştir. Bu değerler; deneysel ölçümler ve ısı simülasyonlar ile elde edilen sıcaklık değerlerini doğrulama amacıyla kullanılmaktadır.



Şekil 4.15 : Ölçüm noktaları.



Şekil 4.16 : Isı borusuz sistemde yedi noktadan termokupullarla ölçülen sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimleri.

#### 4.2.4 Karşılaştırma ve doğrulama

Yukarıda açıklanan kabullerle yedi ölçüm noktası için 1400 mA sürüş akımındaki ısı simülasyonlar ve deneysel ölçümlerle elde edilen sıcaklık değerleri ve bu sıcaklıklar arasındaki farklar Çizelge 4.8’de verilmektedir.

**Çizelge 4.8 :** Kanatlı soğutma sisteminin ısı simülasyon ve deneysel ölçümlerinin karşılaştırılması.

Kanatlı Sistem	1	2	3	4	5	6	7
Isıl Simülasyon [°C]	60,5	60,4	57,0	60,7	60,4	65,8	65,7
Deneysel [°C]	58,8	58,1	55,4	56,7	57,0	63,2	64,0
Fark [%]	-2,9	-3,8	-2,9	-7,0	-5,8	-4,1	-2,6

Isıl simülasyonlar ile deneysel ölçümler arasındaki minimum ve maksimum sıcaklık farkları %2,9 ve %7,0 olarak bulunmuştur. Kabul edilebilir hata sınırları içindeki bu sonuçlar, bu çalışmada modeli oluşturulan ısı simülasyonların farklı sistemlerin karşılaştırmaları ve parametrik irdemeleri için kullanılabileceğini göstermektedir.

#### 4.3 Belirsizlik Analizi

Elde edilen sonuçların güvenilirliğini artırmak amacıyla, yapılan sıcaklık ölçümlerindeki sapmaların ve belirsizliklerin irdelenmesi bu bölümde gerçekleştirilmiştir.

Bir ölçümde hata, ölçülenin gerçek değeri ile ölçüm sonucunda edilen değer arasındaki farktır. Bir hata kaynağı, sebep olduğu hatanın sabit veya değişken olmasına bağlı olarak genellikle "sabit" veya "rastgele" olarak sınıflandırılır. Hataların kendilerine ise sistematik hata veya hassasiyet hatası denir ve hassasiyet hatasının rastgele davrandığı ve ortalamasının da sıfır olduğu varsayılır. Çoğu mühendislik ölçümlerinde deney sırasında değişen ancak rastgele olmayan hatalar için, üçüncü bir hata kategorisi gereklidir. Bunlar, değişkendir ama deterministik olarak tanımlanabilirler (Moffat,1988).

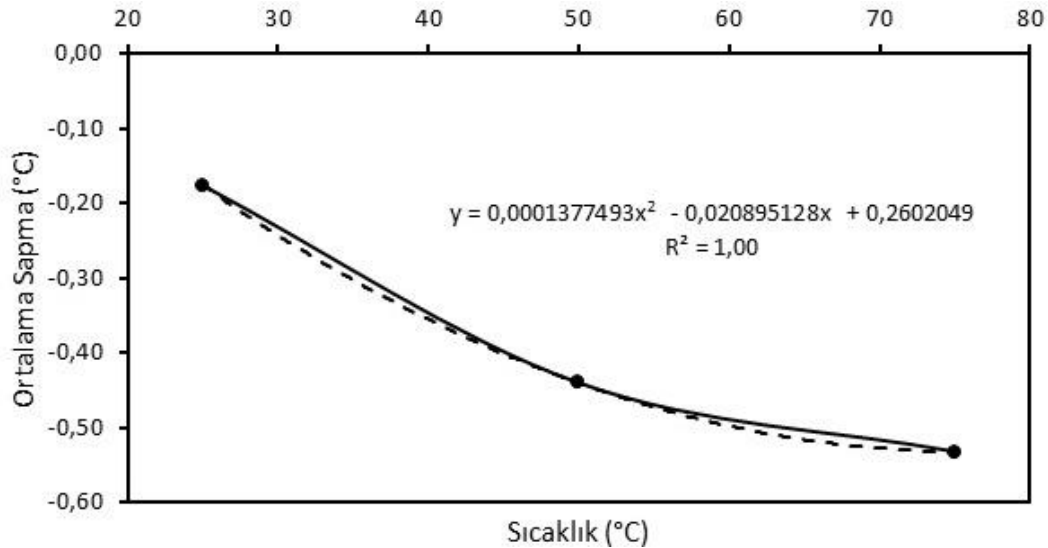
Sistematik hata (Bias), edilebilen (ideal olarak) bir mekanizma sebebiyle ortaya çıkan sistematik bir kusurdur. Ölçümler bias hatalarını kapsayacak şekilde ayarlanabilir. Rastgele hata ise bilinmeyen ya da kontrol edilemeyen bir etki sebebiyle oluşan ve tekrar edilemeyen bir hata türüdür. Tekrar edilebilen tüm hatalar sabit (fixed) hatalardır. Sabit hataların kaynakları, sensör kalibrasyonu ve sisteme yapılan sabit bir bozucu etkidir (Recktenwald, 2006).

Tez kapsamında kullanılan termokuplların kalibrasyon işlemi sabit hataların ve belirsizliklerin öngörülebilmesi amacıyla gerçekleştirilmiştir. Kalibrasyon amacıyla, her bir termokupl ile çalışma sıcaklıklarını kapsayan 25°C, 50°C ve 75°C’de kalibre ekipmanlar kullanılarak 10’ar adet ölçüm gerçekleştirilmiştir. Her bir termokupl için bir ölçüm sıcaklığında alınan on adet ölçümün ortalaması alınmıştır. Ardından on adet termokuplun ölçüm ortalamalarının da aritmetik ortalaması hesaplanmıştır. Gerçek sıcaklıkla ölçüm ile elde edilen sıcaklık ortalaması arasındaki fark olan “sapma değeri” belirlenmiştir. Bu değerler Çizelge 4.9’da görülmektedir.

**Çizelge 4.9 :** Termokupl sıcaklık ölçüm sapma değerleri.

	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	Ortalama	Sapma
25 °C	24,45	24,84	24,85	24,87	24,88	24,87	24,89	24,86	24,87	24,85	24,82	0,18
50 °C	49,49	49,64	49,59	49,50	49,40	49,54	49,56	49,69	49,56	49,65	49,56	0,44
75 °C	74,29	74,63	74,49	74,42	74,17	74,61	74,44	74,67	74,40	74,46	74,46	0,53

Bu sapmalar deneysel sonuçlara eklenecek kalibrasyon değerleridir. Elde edilen sapma değerleri ve bu değerler ile oluşturulan denklem Şekil 4.17’de görülmektedir. Şekildeki düz çizgi bu değerlerden geçen eğriyi, kesikli çizgiler ise şekildeki denklem ile elde edilen eğriyi göstermektedir. Uydurulan eğrinin R<sup>2</sup> değeri 1 olup denklem gerçek değerleri yüksek doğrulukla temsil etmektedir.



**Şekil 4.17 :** Sıcaklık-ortalama sapma grafiği.

Şekil 4.17’deki denklem kullanılarak deneysel sıcaklık ölçümlerine sapma miktarları eklenmiştir. Bir önceki bölümdeki Çizelge 4.8’deki sonuçlar ile Şekil 4.16’deki grafik bu sapma değerleri eklenerek elde edilmiştir. Aynı şekilde bir sonraki bölümde verilen ısı borulu-kanatlı sistemdeki sonuçlara da sapma değerleri eklenmiştir.

Kalibrasyon işlemiyle termokuplların  $\pm 0,37^{\circ}\text{C}$  hassasiyetle ölçüm alınmasının sağlandığı kabul edilmektedir. Bu değer kalibrasyon uygulandıktan sonraki en büyük fark değeridir ( 1 numaralı termokuplun  $25^{\circ}\text{C}$ 'deki ölçüm ortalaması değeri).

Tekrarlanabilirlik belirsizliğinin elde edilebilmesi için ise öncelikle aynı koşullarda alınmış n tekrarlı ölçümlerin ortalamasının bulunması (Denklem 4.1), ardından da her bir ölçümün bu ortalama değerden sapmasına bağlı toplam belirsizlik değerinin (Denklem 4.2) saptanması gerekmektedir.

$$x_{ort} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (4.1)$$

$$u = \sqrt{\frac{1}{n(n-1)} \sum_{i=1}^n (x_i - x_{ort})^2} \quad (4.2)$$

ya da  $u = \frac{\text{standart sapma}}{\sqrt{n}}$

Bu çalışmadaki tüm termokupllar ile ölçüm alınan üç sıcaklık değerlendirilmiş ve tekrarlanabilirlik belirsizliğinin en yüksek değeri 0,01 olarak hesaplanmıştır. Bu değer tüm termokuplların tekrarlanabilirlik belirsizliği olarak kabul edilmiştir. Bu değer tekrar edilen ölçümlerin arasındaki farkın az ve belirsizliğin düşük olduğunu göstermektedir.

Sistematik hatanın kaynağının kalibrasyon ile giderildiği düşünülerek "0" kabul edildiğinde diğer kaynaklardan gelen hatalar ile hesaplanan belirsizlik değerleri Çizelge 4.10'da verilmektedir. Çizelgeden de görüldüğü gibi sıcaklık ölçümlerindeki belirsizlik değeri  $\pm 0,74^{\circ}\text{C}$ 'dir.

**Çizelge 4.10 :** Belirsizlik değerleri ve toplam genişletilmiş belirsizlik.

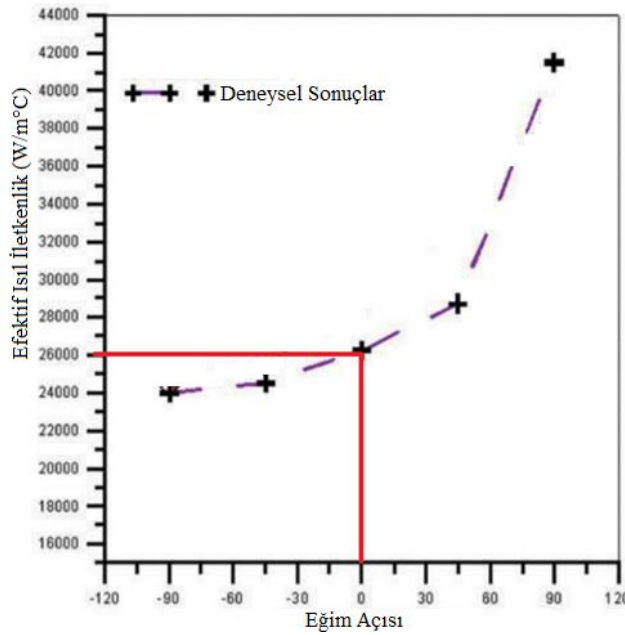
Kaynak	Değer	Birim	Standart Belirsizlik
Termokupl Probu	0,37	$^{\circ}\text{C}$	0,37
Tekrarlanabilirlik	0,01	$^{\circ}\text{C}$	0,01
Birleştirilmiş standart belirsizlik	$\sqrt{0,37^2 + 0,01^2}$		$\pm 0,37$
Genişletilmiş Belirsizlik (%95 güven aralığı k=2)			$\pm 0,74$

Belirsizlik  $\pm 0,74^{\circ}\text{C}$  bir başka deyişle yaklaşık  $1,5^{\circ}\text{C}$ 'lik bir aralığın içinde kalmaktadır. Ölçüm sonuçlarının sıcaklık aralığı dikkate alındığında belirsizlik değeri kabul edilebilir derecede küçüktür. Belirsizliğin bu değeri, ölçüm sonuçları ve ısı simülasyon sonuçlarının doğrulanmasının önünde bir engel oluşturmamaktadır.

#### 4.4 Isı Boruları ve Kanatların Birlikte Kullanıldığı Tasarımın Isıl Simülasyonu, Deneysel Analiz ve Karşılaştırmalı Doğrulamaları

Gömülü ısı borularının kullanılmasının planlandığı bu çalışmada çeşitli boyutlarda ısı boruları ve bu ısı borularının armatür prototibinde farklı yerleşim şekilleri için analizler yapılmıştır. Bu analizlerin amacı mümkün olan en iyi sistemin seçilmesidir. Bu seçim gerçekleştirilirken armatürün talaşlı imalat ile kolay üretilebilirliği de dikkate alınmıştır.

Isı borularının ısı simülasyon programında modellenmesi amacıyla öncelikle ısı iletim katsayısının belirlenmesi gerekmektedir. Bu tez kapsamında yapılan ısı simülasyonlarda, Salem ve diğ. (2019) tarafından gerçekleştirilen çalışmadaki eğim açısı - ısı iletim katsayısı grafiğinden  $0^\circ$  eğim açısı için belirlenmiş olan  $26000 \text{ W/m}^\circ\text{C}$  ısı iletim katsayısı değeri kullanılmıştır (Şekil 4.18). Literatürden seçilerek kullanılan ısı iletim katsayısı ile ilgili bir doğrulama çalışması ilerleyen bölümlerde yer almaktadır. Ön tasarımlar için belirlenen bu ısı iletim katsayısıyla ısı analizler gerçekleştirilmiştir.



Şekil 4.18 : Efektif termal iletkenlik-eğim açısı grafiği (Salem ve diğ., 2019).

Isıl simülasyonlarla bilgisayar ortamında analiz edilen beş farklı ısı boru yerleşimli sistem ve sonuçları bu bölümde verilmektedir. Değerlendirme kriteri olarak, daha önce soğutucu üzerinde belirlenmiş olan 81 adet noktadaki sıcaklıkların ortalaması

alınmıştır. Bu sistemlere ait özellikler Çizelge 4.11’de verilmektedir. Sistemlerin şematik gösterimleri ise Şekil 4.19’da görülmektedir.

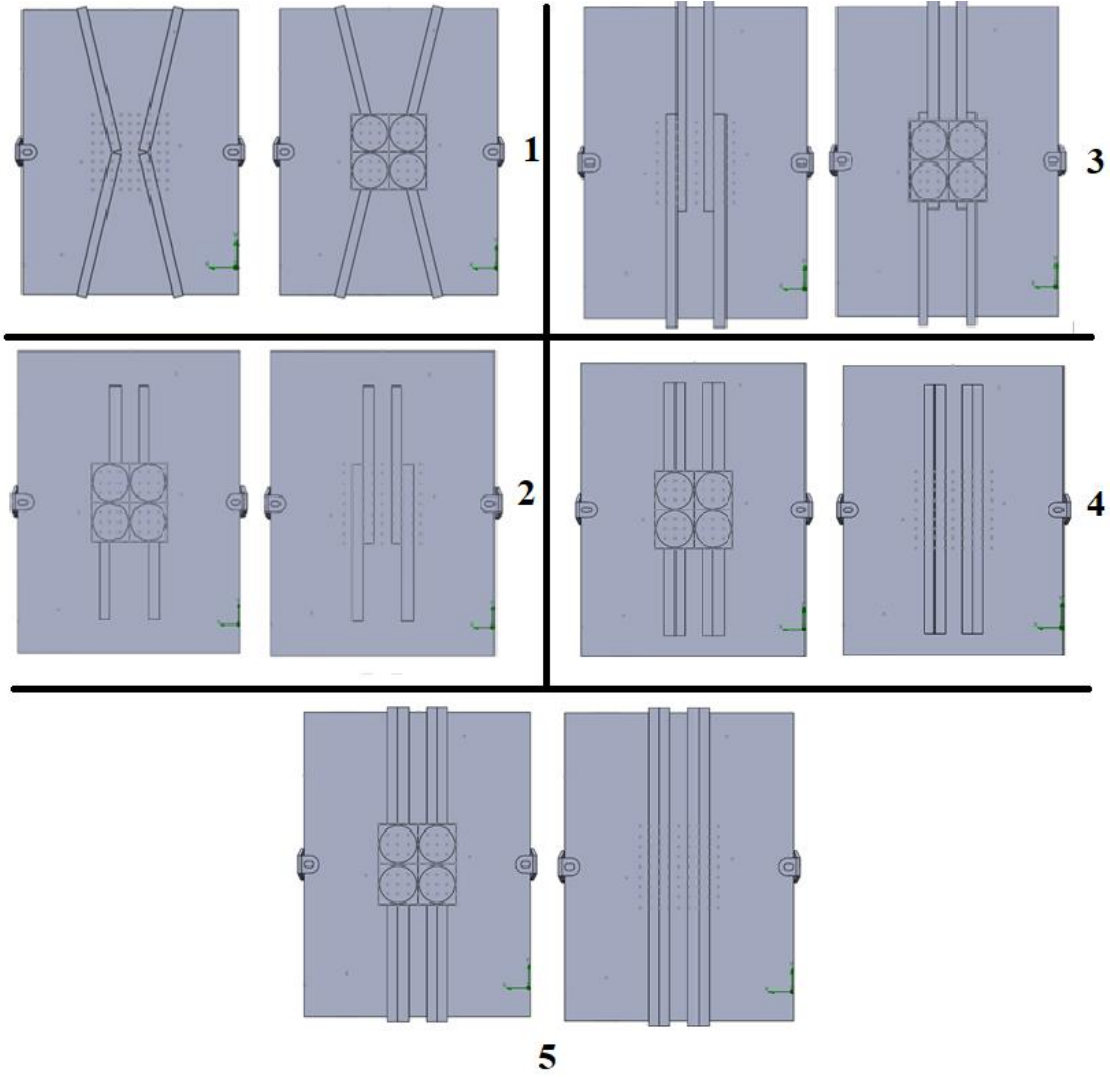
Çizelge 4.11’den görüldüğü gibi farklı ısı borusu konum ve uzunlukları ile oluşturulan sistemlerde maksimum sıcaklık ve PCB altında kalan 81 adet noktanın ortalama sıcaklıklarının en yüksek ve en düşük değerleri arasındaki maksimum fark sadece 1°C olmuştur. Farkın çok küçük olması nedeniyle, talaşlı imalat ile üretim kolaylığı ön plana çıkarılarak, prototip için 3 numaralı sistem seçilmiş ve bu sistemin üretimi gerçekleştirilmiştir.

Üç numaralı sistemde dört adet 200 mm boyunda ısı borusu kullanılmaktadır. Isı borularının kanalları düzdür ve birbiriyle yan yanadır. İmalat açısından bu kanalların freze ile açılması ve sonrasında ısı borularının yerleştirilmesi çapraz yerleşime göre daha kolay olmaktadır. Çapraz yerleşimde (1 numara) ısı borularının başlangıçlarının COB LED’lerin tam alt bölgesine denk gelmesi ve soğutmayı olumsuz etkileme ihtimali de dikkate alınarak bu yerleşim biçimi seçilmemiştir.

Yapılan ısıl simülasyonlar sonucunda daha uzun ısı borularının (4 ve 5 numaralı) kullanıldığı yerleşimler ise sıcaklığı 3 numaralı sisteme göre yüksek bir farkla azaltmadığından ve ısı borusu boyu artışındaki olumsuzluklar da gözönüne alınarak tercih edilmemiştir.

**Çizelge 4.11 : Farklı ısıl boru sistemlerin karşılaştırılması.**

<b>Sistem</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>
<b>81 nokta ortalamaları [°C]</b>	65,5	66,1	65,8	65,6	65,2
<b>Maksimum Sıcaklık [°C]</b>	69,0	69,6	69,2	69,2	68,6
<b>Isı Borusu Sayısı</b>	4	4	4	4	4
<b>Isı Borusu Uzunluğu [mm]</b>	150	150	200	250	300
<b>Yerleşim</b>	Çapraz	Düz	Düz	Düz	Düz



**Şekil 4.19 :** Simülasyonlar ile denenen sistemlere ait şematik görünüşler.

#### 4.4.1 Isı borulu-kanatlı sistemin ısı simülasyonları

Isı borulu-kanatlı prototibin ısı simülasyon ve deneysel ölçüm sonuçlarının karşılaştırmalı olarak doğrulanabilmesi amacıyla yapılan çalışmalara bu bölümde yer verilmektedir.

Isı borulu prototibin simülasyon aşamasında kullanılan malzeme özellikleri ve birleşim noktalarına tanımlanan ısı direnç değerleri sırasıyla Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13'te verilmektedir.

Talaşlı işleme yapılan prototibe ısı boruları TC-2810 ısı iletken epoksi ile yapıştırılmıştır (Url-12). Isıl simülasyon programında bu epoksi sistemini karakterize etmek için, ısı boruları ile soğutucu arasına  $0,32 \text{ Kcm}^2/\text{W}$ 'lık bir direnç tanımlanmıştır.

**Çizelge 4.12 :** Isıl simülasyonlarda kullanılan malzeme özellikleri.

Eleman	Malzeme	Isıl İletkenlik [W/mK]	Işınım Yayınlılığı Katsayısı
LED Çipi	Silikon Karbid	150 (@293 K)	0,7
PCB	Alüminyum 5052	140 (@273 K)	0,05
Soğutucu	Alüminyum 1050	222	0,05
Askı Elemanı	Paslanmaz Çelik 304	16,2	0,075
Isı Borusu	-	26000	0,02-0,03 (200K-300K)

**Çizelge 4.13 :** Isıl direnç değerleri.

Isıl Direnç	Malzeme	Değer [ $10^{-5}$ K.m <sup>2</sup> /W]
LED Çipi - PCB	-	5
PCB - Soğutucu	KP97 Termal Macun	1,7
Soğutucu –Askı Elemanı	KP97 Termal Macun	1,7
Isı Borusu-Soğutucu	TC-2810	3,2

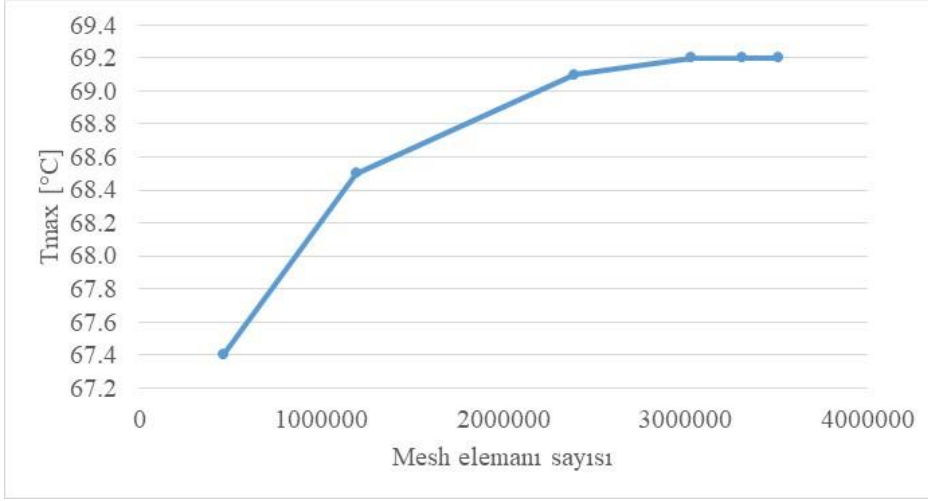
Isıl simülasyonlarda kullanılan ağın doğru sonuç verebilmesi için ısı boruları ve kanatların birlikte kullanıldığı sistem için de sadece kanatlı sistemde olduğu gibi ağ duyarlılık analizi gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyonlar sonucunda, prototipte oluşan maksimum sıcaklığın 4 numaralı ağdan sonra artan ağ elemanı sayısı ile anlamlı biçimde değişmediği görülmüştür (Çizelge 4.14).

**Çizelge 4.14 :** Ağ duyarlılık analizi.

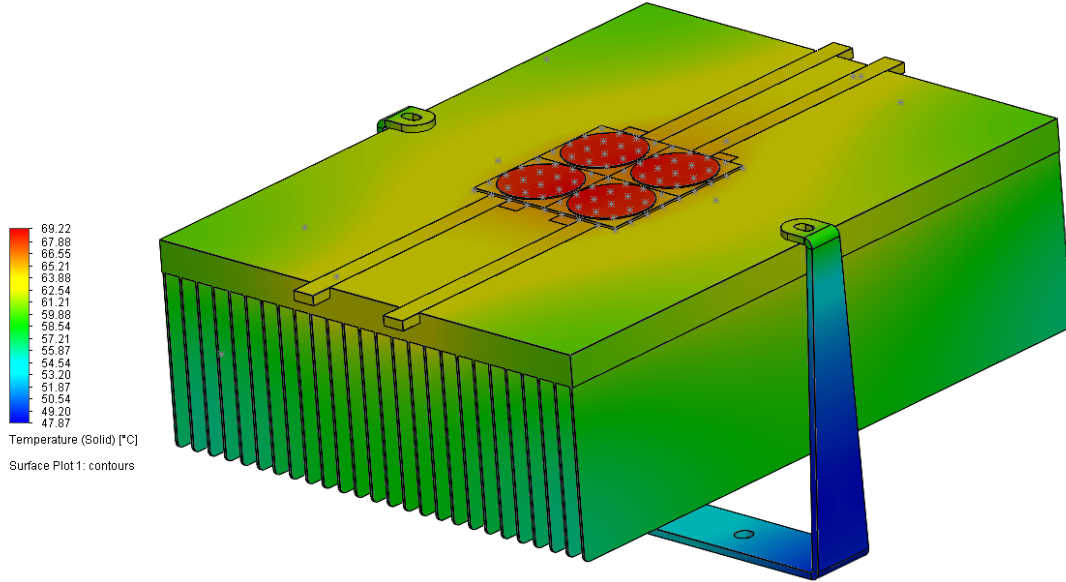
Ağ	Toplam Eleman Sayısı	Tmaks. [°C] (1400 mA)
1	460933	67,39
2	1190218	68,46
3	2391766	69,08
4	3033423	69,19
5	3312317	69,21
6	3514280	69,19

Prototipteki maksimum sıcaklığın farklı ağ (mesh) elemanı sayısına göre değişimi Şekil 4.20’de de görülmektedir. Dört numaralı ağın simülasyonlarda kullanılmasına karar verilmiştir.

Isı borulu ve kanatlı prototibin simülasyon sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı Şekil 4.21’de görüldüğü gibidir. Isı borusuz prototipte COB LED’lerin alt kısmında dairesel olarak yoğunlaşan sıcaklıklar, ısı borulu prototipte ısı boruları boyunca iletilerek yayılabilmektedir.



**Şekil 4.20 :** Maksimum sıcaklık-ağ elemanı sayısı.



**Şekil 4.21 :** Isı borulu-kanatlı prototibin simülasyon sonucu elde edilen sıcaklık dağılımı.

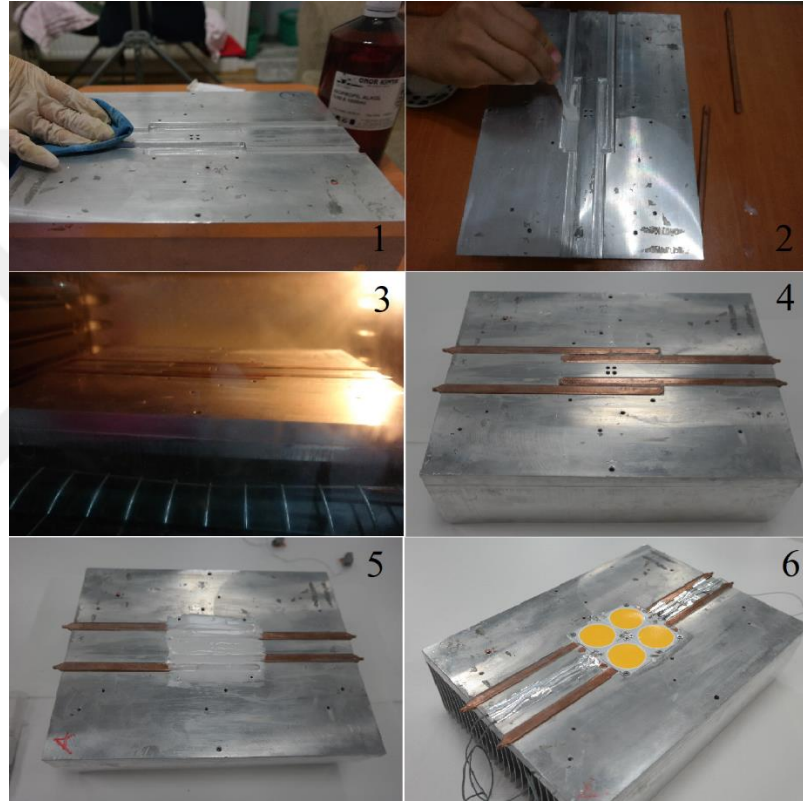
#### 4.4.2 Prototip üretim süreci

Isıl simülasyondan sonra, ısı borulu-kanatlı prototibin üretim aşamasına geçilmiştir. Bu amaçla yapılan işlemler sırasıyla aşağıda açıklanmakta ve Şekil 4.22’de gösterilmektedir.

Üretim aşamaları aşağıdaki sırayla gerçekleştirilmiştir:

1. Prototibe talaşlı imalat ile ısı borularının yerleştirileceği oyukların açılması ve ardından yüzeylerin isopropil alkol ile silinerek ısı transferini olumsuz etkileyebilecek kalıntılardan temizlenmesi,

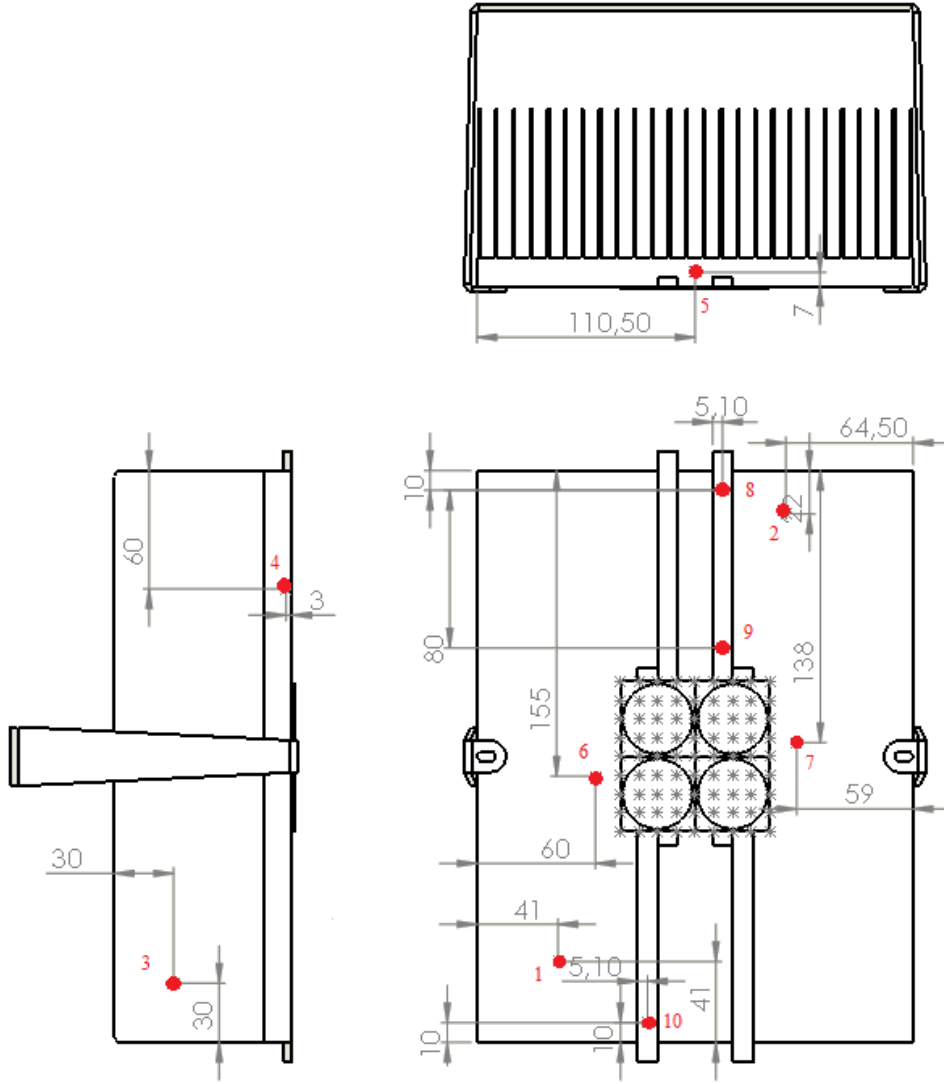
2. Isıl iletken epoksinin ince bir tabaka halinde ısı borularının yerleştirileceği kanallara sürülmesi,
3. Isı borularının soğutucudaki kanallara yerleştirilmesi ve bir fırın yardımıyla epoksinin 90°C’de 30 dakika kürlendirilmesi,
4. Termal macunun uygulanacağı bölgenin isopropil alkol ile temizlenmesi,
5. Soğutucu ve COB LED PCB’lerinin arasına termal macun uygulanması,
6. COB LED’ler monte edilerek elektriksel bağlantılarının yapılması.



Şekil 4.22 : Isı borulu prototibin üretim aşamaları.

#### 4.4.3 Deneysel ölçümler

Prototip üzerindeki 10 adet noktaya termokupllar monte edilerek bu noktalardan zamana bağlı sıcaklık ölçümleri alınmıştır. Şekil 4.23’te farklı kesitlerdeki prototip teknik resimleri üzerinde termokuplların monte edildiği noktalar gösterilmektedir. Ölçümlerin gerçekleştirildiği deney düzeneği de Şekil 4.24’te görülmektedir. Deneysel ölçümlerin yapıldığı alanın sıcaklığı ve hava hızı ölçümler süresince sıcaklık ve hot bulb hız problemleri ile kontrol edilmiştir. Hava sıcaklığının 25±0,5°C aralığında kalması sağlanmıştır. Ortamdaki hava hızının ise 0,04 m/s’den daha düşük olduğu gözlemlenmiştir.

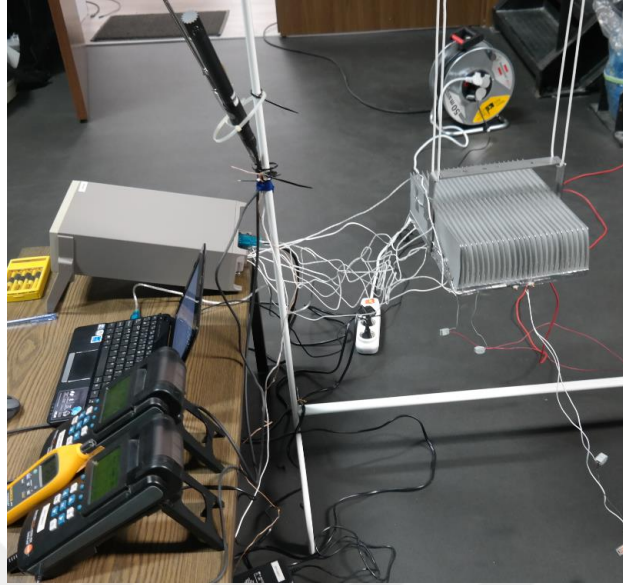


**Şekil 4.23 : Ölçüm noktaları.**

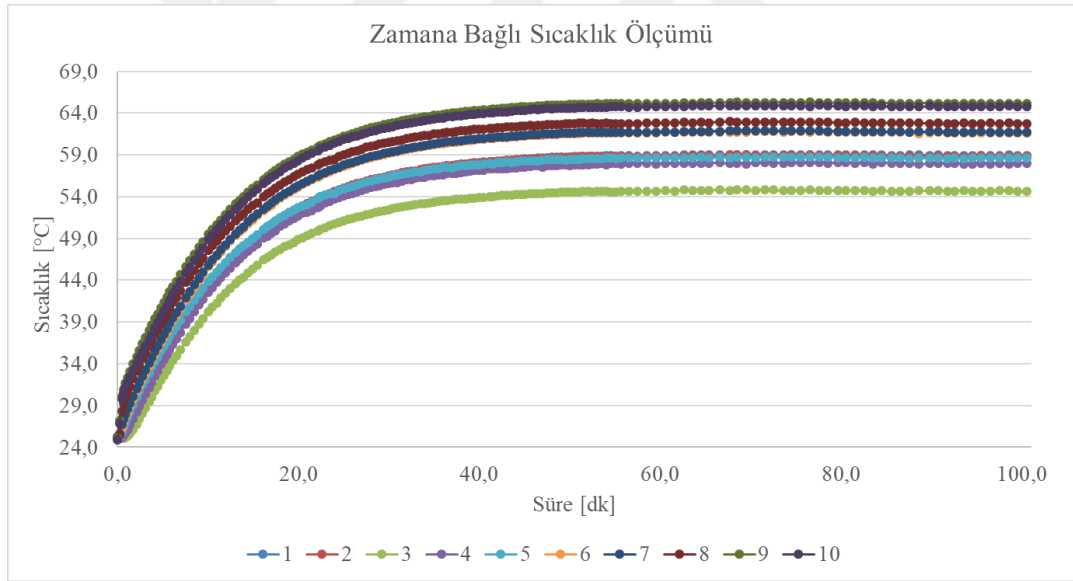
Üç termokupl hariç tüm termokupllar COB LED'lerin monte edildiği soğutucu yüzeyindedir. 3 ve 4 numaralı termokupllar soğutucunun uzun kenarının bulunduğu yan yüzeyde, 5 numaralı termokupl ise kısa kenarının olduğu yan yüzey üzerindedir.

Gerçekleştirilen deneysel ölçümlerde termokuplların monte edildiği noktalardan alınan sıcaklık değerlerinin zamana bağlı değişimleri Şekil 4.25'te verilmektedir. Bu değerler bir önceki bölümde hesaplanan sapma değerleri de eklenerek elde edilmiştir. Ölçümlerin başında daha sık süre aralıklarında ölçümler alınırken denge durumuna yaklaşırken ölçüm sıklığı azaltılmıştır. Şekilden de görüldüğü gibi, ölçüme başladıktan sonra 80-100 dakika arasındaki bir sürede sıcaklık değerleri sabit hale gelmektedir. Çalışmada her bir ölçüm noktası için 80-100 dakikalar arasındaki sıcaklık değerlerinin ortalamaları alınarak, o ölçüm noktası için sıcaklık değeri belirlenmiştir.

Bir sonraki bölümde bu ölçüm değerleri ile ısı simülasyon sonucunda elde edilen değerler karşılaştırılacaktır.



Şekil 4.24 : Ölçüm düzeneği.



Şekil 4.25 : Isı borulu-kanatlı sistemde termokupllardan alınan ölçüm sonuçlarının zamana bağlı değişimi.

#### 4.4.4 Karşılaştırma ve doğrulama

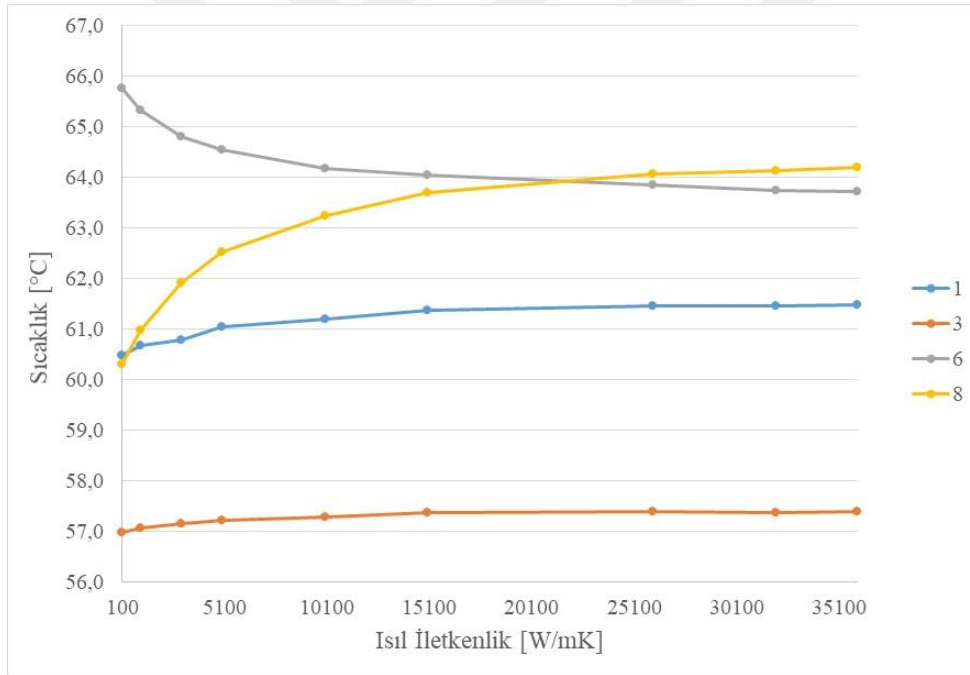
Bu bölümde ısı simülasyonlar sonucunda elde edilen sıcaklık değerleri ile deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırılmaktadır. Çizelge 4.15'te 10 adet ölçüm noktasında elde edilen sonuçlar ve bu sonuçlar arasındaki yüzdesel farklar görülmektedir. İki durum arasında minimum %0,4 maksimum %8,3 fark olduğu gözlemlenmiştir. Yüksek hata

tek bir nokta için oluşmuş, diğer tüm noktalarda hatalar kabul edilebilir sınırlar dahilinde kalmıştır.

**Çizelge 4.15 :** Isı borulu sistemin ısı simülasyonu ve deneysel ölçümlerinin karşılaştırılması.

Isı Borulu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Isıl Simülasyon [°C]	61,5	61,9	57,4	60,9	63,5	63,9	63,8	64,1	64,9	63,8
Deneysel [°C]	59,0	58,8	54,7	58,0	58,6	61,7	61,8	62,8	65,2	64,8
Fark [%]	-4,3	-5,2	-5,0	-5,0	-8,3	-3,6	-3,3	-2,1	0,4	1,5

Isı borusu için, literatürdeki çalışmalar kullanılarak seçilen ısı iletkenlik katsayısı değerinin geçerliliğinin değerlendirilmesi de ayrıca yapılmıştır. Bunun için, analizlerde kullanılan ve değişik konumları karakterize eden 1, 3, 6 ve 8 nolu ölçüm noktaları için 9 farklı ısı borusu iletkenlik değeri kullanılarak ısı analizleri tekrarlanmış ve elde edilen sıcaklık değerleri ile Şekil 4.26 oluşturulmuştur.



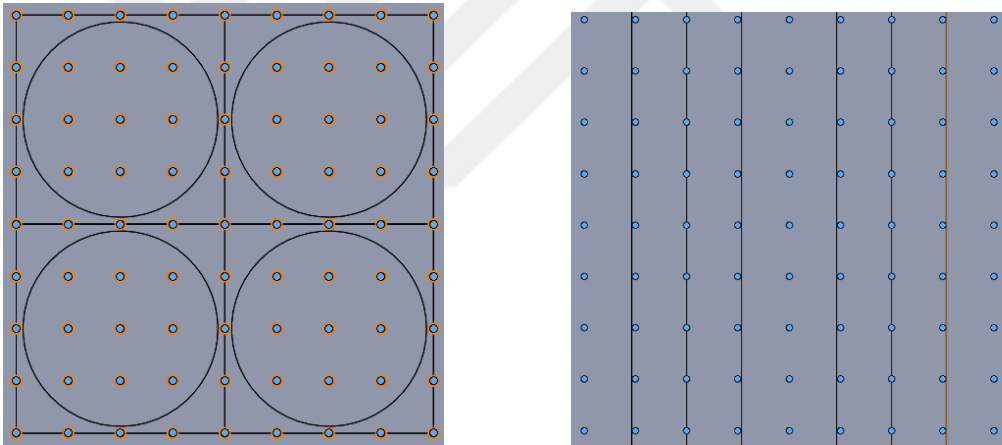
**Şekil 4.26 :** Farklı noktalarda ısı borusu ısı iletkenlik değerinin sıcaklığa etkisi.

Şekil 4.26'dan da görüldüğü gibi, ısı borusunun belli bir ısı iletkenlik değerinden sonra, ısı iletkenlik artışı belirlenen noktaların sıcaklıklarına büyük oranda etki etmemektedir. Çalışmada seçilen 26000 W/m°C değeri sıcaklık değişiminin doyuma ulaştığı bölgede yer aldığı için, ısı simülasyonların gerçekleştirilmesi amacıyla kabul edilebilir bir değer olarak değerlendirilebilmektedir.

#### 4.5 Isı Borulu-Kanatlı ve Sadece Kanatlı Soğutma Sistemlerinin Karşılaştırılması

Gerçekleştirilen çalışmalar sonucunda ısıl analiz sonuçlarının gerçek prototip ölçüm sonuçlarıyla örtüşebildiği gözlemlenmiştir. Bu nedenle, ısı borulu ve ısı borusuz sistemlerin karşılaştırılmasında ve parametrik irdemelerin yapılmasında ısıl simülasyon sonuçlarının kullanılması uygun olabilecektir.

Bu bulgular ışığında, ısı borulu-kanatlı ve ısı borusuz sadece kanatlı sistemlerin karşılaştırılması ısıl simülasyonlarla gerçekleştirilmiştir. PCB'nin altında kalan soğutucu üzerindeki 81 adet noktanın simülasyonlar sonucu elde edilen sıcaklık ortalaması, iki sistemin karşılaştırılması amacıyla kullanılmıştır (Şekil 4.27). Isı borulu-kanatlı sistem için 81 adet noktanın sıcaklıklarının ortalaması  $65,8^{\circ}\text{C}$  iken sadece kanatların kullanıldığı sistem için bu değer  $69,1^{\circ}\text{C}$  olarak belirlenmiştir. Tanımlanan çalışma koşullarında aradaki sıcaklık farkı yalnızca  $3,3^{\circ}\text{C}$  olmuştur.



Şekil 4.27 : Sıcaklık ortalamaları alınan 81 adet nokta konumu.

Çalışmanın başında, LED seçimi aşamasında 1 metre çaplı sıcaklık kontrollü Ulbricht küresi ile ölçümleri gerçekleştirilen 3 adet COB LED'in tekil ölçümlerinden 1400 mA sürüş akımı ve sırasıyla  $65^{\circ}\text{C}$  ve  $75^{\circ}\text{C}$  plaka sıcaklıkları için elde edilmiş ortalama değerler sırasıyla 10591,3 lm ve 10399,7 lm'dir. Bu ölçümler  $25\pm 1^{\circ}\text{C}$  ortam sıcaklığında ve kalibrasyonu yapılmış bir küre ile gerçekleştirilmiştir. Üç adet COB LED ışık kaynağının kullanılmasının sebebi ise örnek sayısının artırılarak gerçek değere en yakın sonucun elde edilmeye çalışılmasıdır.

Isıl simülasyonlar ile sadece kanatlı ve ısı borulu-kanatlı sistemler için elde edilmiş ve küre ölçümlerindeki plaka sıcaklığını temsil eden 81 adet noktanın ölçüm ortalamaları

ise sırasıyla 69,1°C ve 65,8°C'dir. Bu sıcaklıklardaki ışık akısı değerleri küre ölçümleri sonucunda elde edilen değerlerden lineer interpolasyon ile hesaplanmıştır. Ara değerlerin bulunması amacıyla kullanılan ölçüm sonuçları ve interpolasyonla elde edilen ara değerler Çizelge 4.16'da gösterilmektedir. Çizelgedeki IB kısaltması ısı borulu-kanatlı, KNT kısaltması ise sadece kanatlı sistemi ifade etmektedir.

**Çizelge 4.16 :** 1400 mA sürüş akımında ısı borulu ve ısı borusuz sistemin ışık akıları (lm).

Sıcaklık	Küre ile ölçülmüş ışık akısı değerleri		Simülasyon sonucu elde edilen ara sıcaklık değerleri ve bu sıcaklıklar için hesaplanmış ışık akıları	
	65 °C	75°C	65,8 °C (IB)	69,1 °C (KNT)
Işık Akısı [lm]	10591,3	10399,7	10576,0	10512,7

Üretimi gerçekleştirilen prototipte dört adet COB LED kullanıldığından hesaplanan değerler dört ile çarpılmıştır.

Isı borulu-kanatlı prototibin ışık akısı = 42304 lm

Sadece kanatların kullanıldığı ısı borusuz prototibin ışık akısı = 42051lm

İki sistem arasındaki ışık akısı farkı = 253 lm olarak hesaplanmıştır. Bu lümen farkı yüzdesel olarak % 0,6 lık değişimi ifade etmektedir.

Görüldüğü gibi, kanatlı soğutma sistemine ısı boruları ilave edildiğinde sistemlerde oluşan sıcaklık değerleri ve ışık akıları arasında büyük bir fark elde edilememiştir. Bu sonuç, belli çalışma koşulları altında gerçekleştirilen ısıl simülasyon ve buna uygun üretilen prototipin deneysel ölçümleri ile elde edilmiştir. Koşullar değiştiğinde farklı sonuçlar elde edilebileceği düşüncesi ile, sonraki bölümlerde istatistiksel yöntemlerle incelenen soğutma sistemlerinin maksimum sıcaklıklarına etki eden parametrelerin analizi gerçekleştirilmiştir.

## 5. SİMÜLASYON SONUÇLARININ PARAMETRİK İRDELEMESİ VE İSTATİSTİKSEL ANALİZLERİ

Bu bölümde, tez konusu olan ısı borulu-kanatlı ve sadece kanatlı soğutma sistemleri ile ilgili parametrik irdelemeler ısı simülasyonlar yardımıyla gerçekleştirilmektedir. İlk olarak genel bir değerlendirme yapılması amaçlı belirlenen faktörler, tam faktöriyel analizler ile incelenmiş daha sonra simülasyon sayısı artırılarak regresyon analizleri gerçekleştirilmiştir.

### 5.1 Tam Faktöriyel Başlangıç Analizleri

Parametrik değerlendirmelere başlangıç olarak, tam faktöriyel analizler Minitab istatistiksel analiz programında stepwise (adım adım) olarak gerçekleştirilerek sistemin maksimum sıcaklığına doğrudan etki eden faktörler ve etkileşimler belirlenmiştir. Alfa-ekleme ve alfa-çıkarma değeri olarak 0,05 alınmıştır. “p” değerinin 0,05’ten küçük olması ilgili parametrenin istatistiksel olarak anlamlı olduğunu göstermektedir.

Standart stepwise regresyonda, her bir basamak için gerekli olan öngöstergeler hem eklenip hem de çıkarılmaktadır. Minitab programı p değeri, belirlenen alfa-ekleme değerinden daha büyük olan değişkenler modelde olmadığı ve p değeri belirlenen alfa-çıkarma değerinden daha düşük ya da eşit olan değişkenler modelde bulunduğu, çalışmasını sonlandırmaktadır (Url-13).

İlk olarak sadece kanatların kullanıldığı soğutma sisteminin parametrik irdelemesi gerçekleştirilmiştir. Seçilen faktörler ısı güç, hava sıcaklığı, soğutucu malzemesinin ısı iletim katsayısı (ısı iletkenliği) ve PCB ile soğutucu arasına uygulanan macunun ısı direncidir. Bu parametrelerden ısı güç, ısı iletim katsayısı ve ısı direnç seçilen sistem elemanlarına göre değişiklik gösterebileceğinden, bunların parametrik irdelemelerle değerlendirilmesine karar verilmiştir. Hava sıcaklığı da ısı transferine etki edecek bir parametre olduğundan ilk analizlerde göz önüne alınmıştır. Tam faktöriyel deney tasarımına göre dört adet faktör için yapılan deney sayısı  $2^4$  yani 16 adettir. Faktörlerin seviyeleri Çizelge 5.1’de verilmektedir. Isı güç faktörünün

seviyeleri sırasıyla 1400 mA ve 1050 mA sürüş akımlarındaki değerler olan 156,9 W ve 111,3 W olarak seçilmiştir. Bu seçimde COB LED'in Çizelge 3.2'deki ısı güç değerleri (dört adet için) dikkate alınmıştır. Düşük sürüş akımı kademesi olan 1050 mA'de 60°C'deki ısı güç değeri, 1400 mA'de ise 70°C'deki ısı güç değeri kullanılmıştır. Aynı akım kademesinde ısı güç yüksek oranda değişmese de düşük sürüş akımında daha düşük sıcaklık gözlemleneceği düşünülerek bu seçim gerçekleştirilmiştir. Her iki sıcaklık kademesi de ara değerler olduğundan bir üst ve bir alt sıcaklık değerlerindeki ısı güçlerin enterpolasyonu ile elde edilen değerler kullanılmıştır.

Dış sıcaklık faktörünün seviyeleri 10 °C ve 25 °C olarak belirlenmiştir. Seviyelerden 25 °C aynı zamanda deneysel ölçümlerin de gerçekleştirildiği sıcaklıktır. İstanbul için yıllık ortalama en düşük sıcaklık değerleri dikkate alınarak 10°C'nin diğer bir seviye olarak seçilmesi uygun bulunmuştur.

Kullanılan alüminyum soğutucuların ısı iletkenlik değerlerinin seviyeleri olarak 160 W/mK ve 222 W/mK seçilmiştir. Çalışmada kullanılan alüminyum soğutucunun ısı iletkenlik değeri 222 W/mK'dir. Piyasada kullanılan farklı alüminyum alaşımlarının ısı iletkenlik değerleri de göz önüne alınarak diğer seviye olarak 160 W/mK seçilmiştir.

Termal macunun ısı direnç seviyelerinden biri prototipte kullanılan malzemenin değeri olan 0,000017 Km<sup>2</sup>/W değeri ise bu değer yaklaşık üç katı olan 0,00005 Km<sup>2</sup>/W olarak seçilmiştir. Piyasada çok çeşitli kalitede termal macunlar bulunmaktadır. Seçilen iki seviye de iyi kalitede birer termal macunda bulunabilecek derecede düşüktür.

Seçilen bu faktörlerin tüm kombinasyonları tam faktöriyel analiz kapsamında ısı analizlerle elde edilmiştir. Her bir analiz sonucunda elde edilen maksimum sıcaklık değeri Çizelge 5.1'de görülmektedir. Maksimum sıcaklık COB LED'lerin jonksiyon noktasında oluşacağından, faktörlerin parametrik irdelemesi açısından uygun bir karşılaştırma kriteridir.

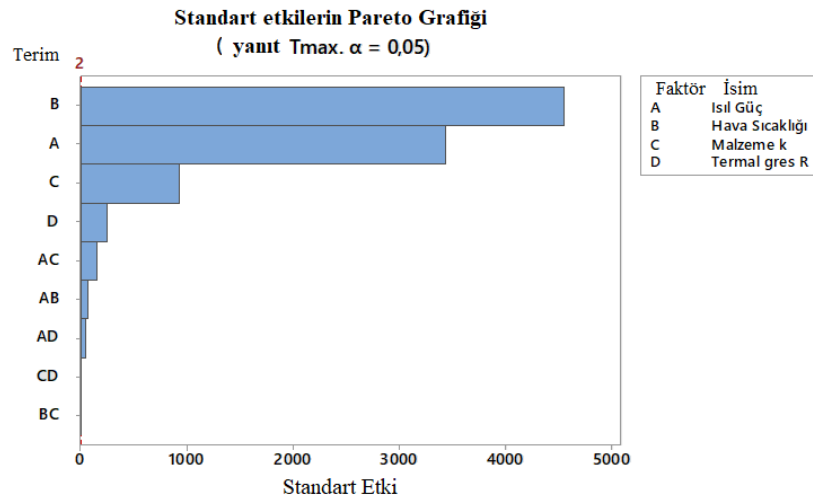
**Çizelge 5.1 : Faktörlerin seviyeleri ve maksimum sıcaklıklar.**

No	A Isıl Güç [W]	B Hava Sıcaklığı [°C]	C Malzeme k [W/mK]	D Termal macun R [Km <sup>2</sup> /W]	Tmaks. [°C]
1	111,3	25	160	0,00017	64,68
2	111,3	25	222	0,00017	61,96
3	111,3	10	222	0,00017	46,40
4	111,3	25	222	0,00005	62,70
5	156,9	10	222	0,00017	57,45
6	156,9	25	160	0,00017	77,18
7	156,9	10	222	0,00005	58,48
8	156,9	10	160	0,00017	61,20
9	111,3	10	160	0,00005	49,8
10	111,3	10	160	0,00017	49,09
11	156,9	10	160	0,00005	62,18
12	111,3	25	160	0,00005	65,38
13	156,9	25	222	0,00005	74,41
14	156,9	25	222	0,00017	73,39
15	156,9	25	160	0,00005	78,16
16	111,3	10	222	0,00005	47,13

Analiz sonucunda;

Etkili olan faktörlerin büyükten küçüğe; hava sıcaklığı, ısıl güç, soğutucu malzemesi ısıl iletkenliği, termal macun ısıl direnci olduğu,

Etkili olan ikili etkileşimlerin de büyükten küçüğe; ısıl güç-soğutucu malzemesi ısıl iletkenliği, ısıl güç-hava sıcaklığı, ısıl güç-termal macun ısıl direnci, soğutucu malzemesi ısıl iletkenliği-termal macun ısıl direnci, hava sıcaklığı-soğutucu malzemesi ısıl iletkenliği olduğu anlaşılmıştır. Şekil 5.1'deki pareto grafiğinde referans çizgiyi geçerek istatistiksel olarak anlamlı olan parametreler ve etkileşimler görülmektedir.



**Şekil 5.1 : Pareto grafiği.**

$T_{maks}$  için residual (artık) grafikleri Şekil 5.2’de verilmektedir. Residual (artık) grafikleri regresyonun uyum derecesini gösteren grafiklerdir.

Bu grafiklerin değerlendirilmesi aşağıdaki gibi yapılabilmektedir (Url-14);

(a) Artıkların normal olasılık grafiği, artıkların normal dağılıma sahip olduğu kabulünü doğrulamak amacıyla kullanılır. Artıkların normal olasılık grafiği yaklaşık olarak düz bir çizgiyi takip etmelidir.

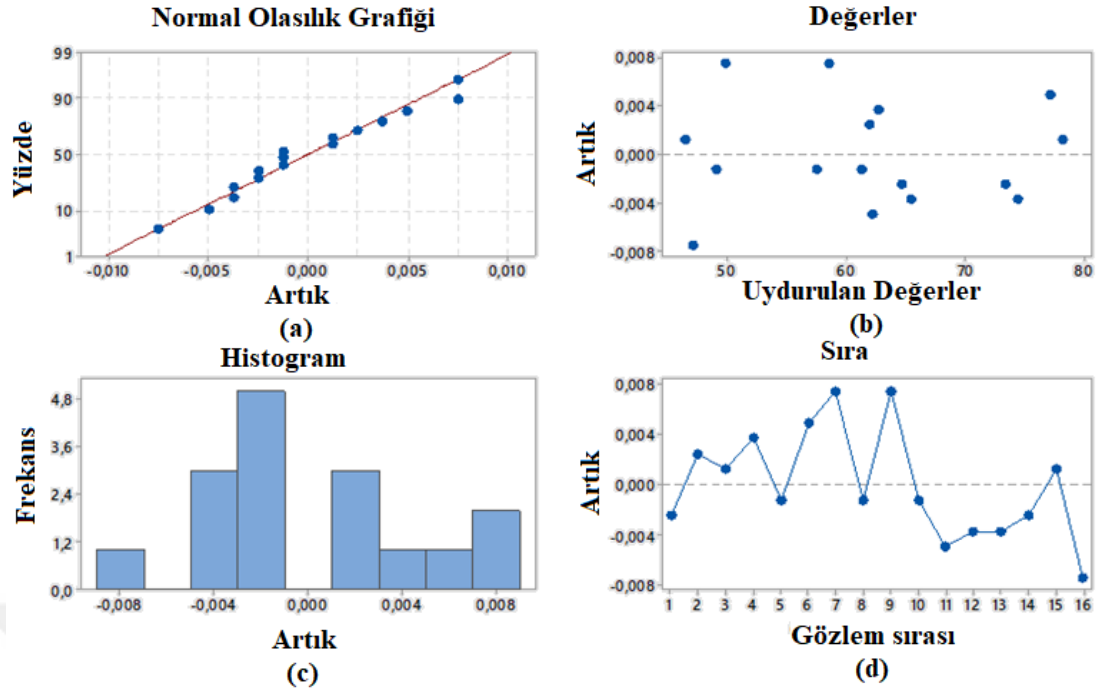
(b) Artıklar-uydurulan değerler grafiği, artıkların random (rasgele) bir şekilde dağıldığı ve varyansının sabit olduğu kabulünü doğrulamak amacıyla kullanılır. İdeal olarak, noktalar sıfır (0) çizgisinin iki tarafına rasgele bir şekilde düşmeli ve farkedilebilen bir desen (pattern) olmamalıdır.

(c) Artıkların histogramı, tüm gözlemler için artıkların dağılımını gösterir. Artıkların histogramı (sütun grafikleri) verinin çarpık olup olmadığını ya da uç değerler içerip içermediğini göstermek için kullanılır.

(d) Artık-gözlem sırası grafiği, verinin toplandığı sıraya göre artıkları gösterir. Bağımsız artıklar sıralı olarak gösterildiğinde bir eğilim ya da desen takip etmezler.

Şekil 5.2’den görüldüğü gibi (a) artıkların normal olasılık grafiği yaklaşık olarak düz bir çizgiyi takip etmektedir, (b) noktalar sıfır çizgisinin iki tarafında rasgele bir şekilde yer almaktadır, (c) artıkların histogramı normal dağılıma yakındır, (d) grafik bir desen izlememektedir. Hata terimlerinin dağılımlarının beklenen kriterleri sağladığı görülmüştür.

Isı borulu-kanatlı sistemin parametrik irdelemesinde seçilen faktörler yine ısı güç, hava sıcaklığı, soğutucu malzemesinin ısı iletkenlik katsayısı ve PCB ile soğutucu arasına uygulanan macunun ısıl direncidir. Tam faktöriyel deney tasarımına göre dört adet faktör için yapılan deney sayısı yine 16 ( $2^4$ ) adettir. Faktörlerin seviyeleri Çizelge 5.2’de verilmektedir. Isı borulu-kanatlı sistemde de her bir analiz sonucunda elde edilen maksimum sıcaklık değeri karşılaştırma kriteri olarak ele alınmıştır bu değerler de Çizelge 5.2’de verilmektedir.



Şekil 5.2 : Residual (artık) grafikleri.

Çizelge 5.2 : Faktörlerin seviyeleri ve maksimum sıcaklıklar.

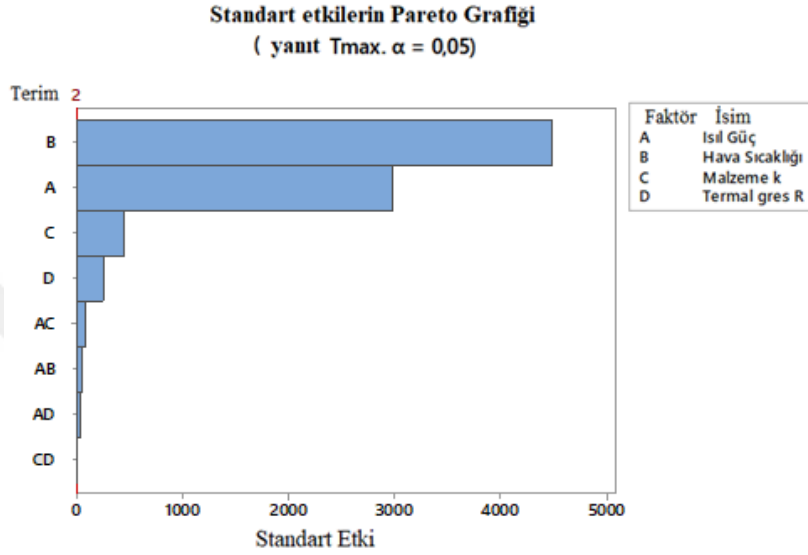
No	A Isıl Güç [W]	B Hava Sıcaklığı [°C]	C Malzeme k [W/mK]	D Termal macun R [Km <sup>2</sup> /W]	Tmaks [°C]
1	156,9	25	160	0,00005	72,04
2	111,3	25	160	0,000017	60,30
3	111,3	25	222	0,000017	58,96
4	156,9	25	160	0,000017	71,05
5	156,9	25	222	0,000017	69,19
6	111,3	10	160	0,00005	45,44
7	111,3	10	222	0,000017	43,41
8	156,9	10	222	0,00005	54,29
9	156,9	10	222	0,000017	53,28
10	156,9	25	222	0,00005	70,21
11	111,3	10	160	0,000017	44,74
12	156,9	10	160	0,000017	55,13
13	156,9	10	160	0,00005	56,10
14	111,3	25	222	0,00005	59,68
15	111,3	25	160	0,00005	61,00
16	111,3	10	222	0,00005	44,13

Analiz sonucunda;

Etkili olan faktörlerin büyükten küçüğe; hava sıcaklığı, ısıl güç, soğutucu malzemesi ısıl iletkenliği, termal macun ısıl direnci olduğu,

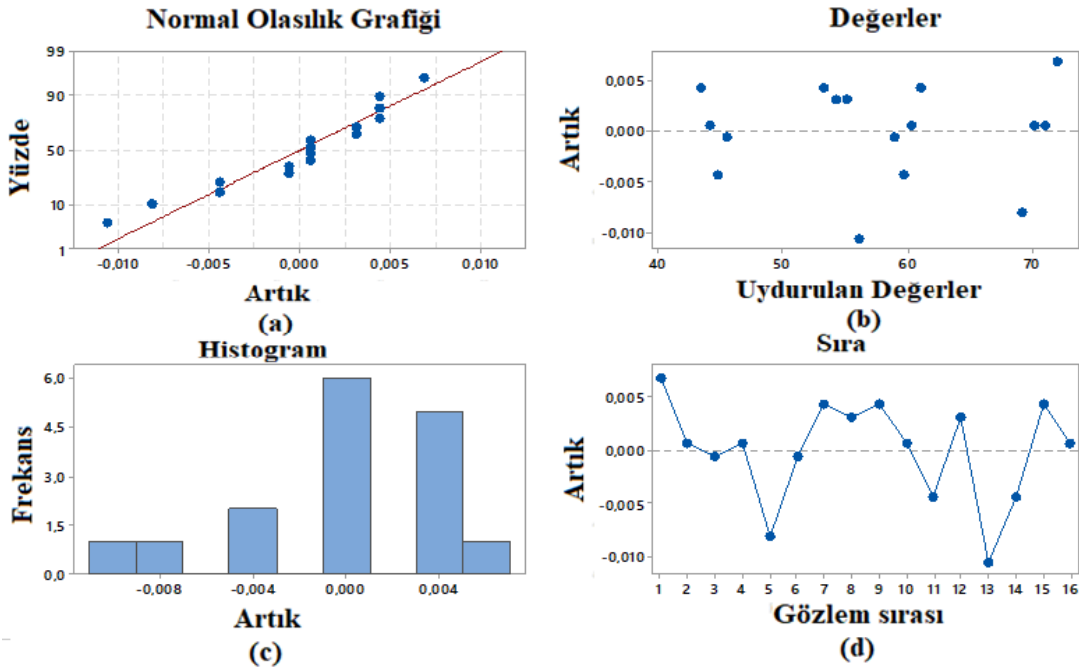
Etkili olan ikili etkileşimlerin büyükten küçüğe; ısı güç-soğutucu malzemesi ısı iletkenliği, ısı güç- hava sıcaklığı, ısı güç-termal macun ısı direnci, soğutucu malzemesi ısı iletkenliği -termal macun ısı direnci olduğu anlaşılmıştır.

Şekil 5.3’deki pareto grafiğinde referans çizgiyi geçerek istatistiksel olarak anlamlı olan parametreler ve etkileşimler görülmektedir.



Şekil 5.3 : Pareto grafiği.

$T_{maks}$  için residual (artık) grafikleri Şekil 5.4’ te verilmiştir.



Şekil 5.4 : Residual (artık) grafikleri.

Şekil 5.4'ten de görüldüğü gibi (a) artıkların normal olasılık grafiği yaklaşık olarak düz bir çizgiyi takip etmektedir, (b) noktalar sıfır (0) çizgisinin iki tarafında rasgele bir şekilde yer almaktadır, (c) artıkların histogramı normal dağılıma yakındır, (d) grafik bir desen izlememektedir. Hata terimlerinin dağılımlarının beklenen kriterleri sağladığı görülmüştür.

Isı borulu-kanatlı ve sadece kanatlı sistemlerin birlikte değerlendirilmesinde; seçilen faktörler ise yine ısı güç, hava sıcaklığı, soğutucu malzemesinin ısı iletkenlik katsayısı, PCB ile soğutucu arasına uygulanan macunun ısı direnci olup, bu analizlerde bir de sistemin ısı borulu yada sadece kanatlı olması şeklinde tasarım farklılığı ilave edilmiştir. Tam faktöriyel deney tasarımına göre beş faktör için yapılan deney sayısı bu durumda 32 ( $2^5$ ) adettir. Faktörlerin seviyeleri Çizelge 5.1 ve Çizelge 5.2'de verilmektedir. İki çizelge birlikte değerlendirildiğinde faktör sayısı 5'e, tam faktöriyel deney sayısı 32'ye çıkmaktadır.

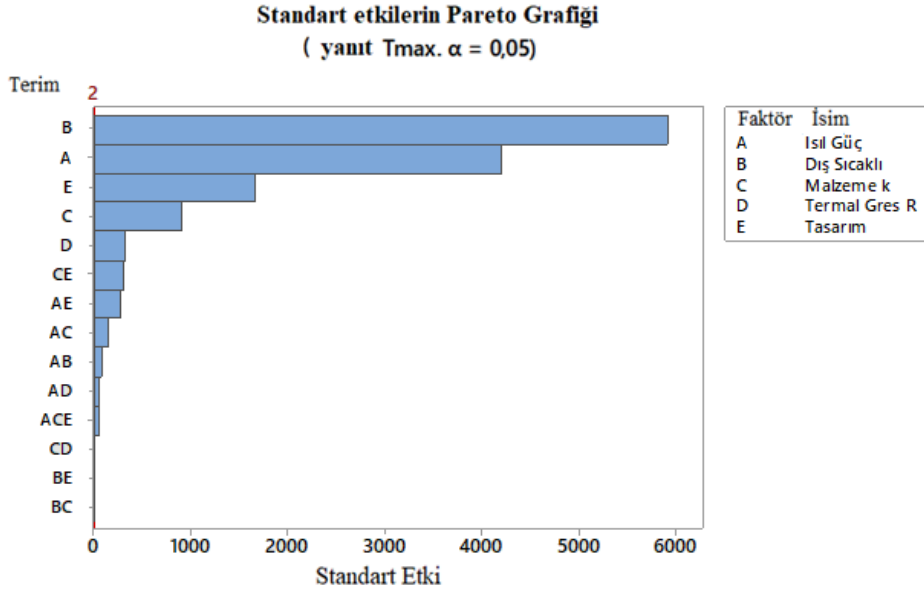
Analiz sonucunda;

Etkili olan faktörlerin büyükten küçüğe; hava sıcaklığı, ısı güç, tasarım, soğutucu malzemesi ısı iletkenliği, termal macun ısı direnci olduğu,

Etkili olan ikili etkileşimlerin büyükten küçüğe; soğutucu malzemesi ısı iletkenliği - tasarım, ısı güç-tasarım, ısı güç-soğutucu malzemesi ısı iletkenliği, ısı güç-hava sıcaklığı, ısı güç-termal macun ısı direnci, soğutucu malzemesi ısı iletkenliği -termal macun ısı direnci, hava sıcaklığı-tasarım, hava sıcaklığı-soğutucu malzemesi ısı iletkenliği olduğu anlaşılmaktadır.

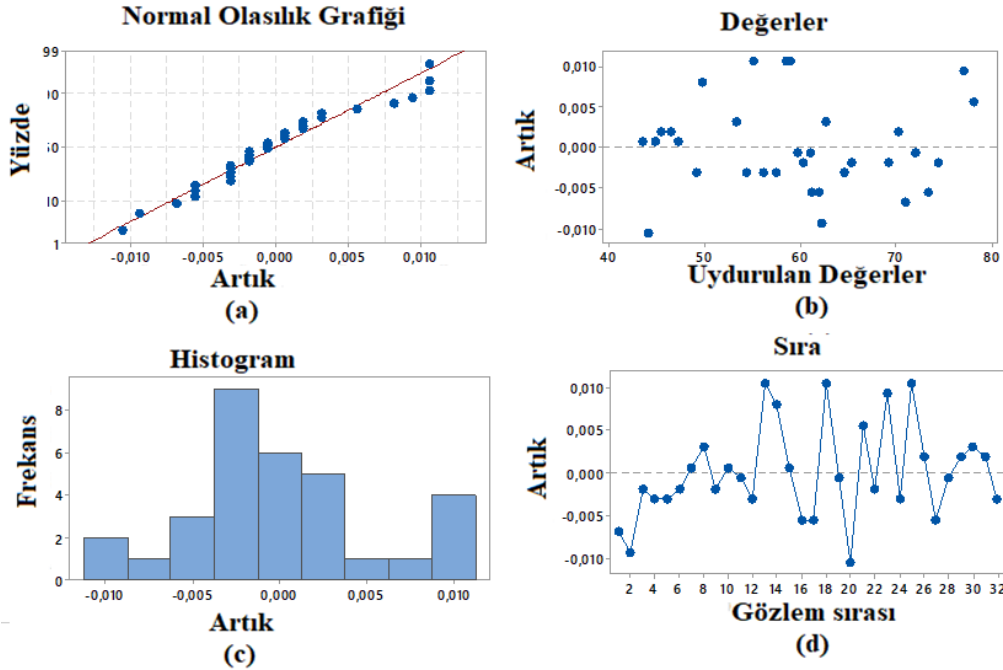
Etkili olan üçlü etkileşimler; ısı güç - soğutucu malzemesi ısı iletkenliği - tasarım'dır.

Şekil 5.5'deki pareto grafiğinde referans çizgiyi geçerek istatistiksel olarak anlamlı olan parametreler ve etkileşimler görülmektedir.



**Şekil 5.5 : Pareto grafiği.**

$T_{maks}$  için residual (artık) grafikleri de Şekil 5.6’da görülmektedir.



**Şekil 5.6 : Residual (artık) grafikleri.**

Şekil 5.6’den görüldüğü gibi (a) artıkların normal olasılık grafiği yaklaşık olarak düz bir çizgiyi takip etmektedir, (b) noktalar sıfır çizgisinin iki tarafında rasgele bir şekilde yer almaktadır, (c) artıkların histogramı normal dağılıma yakındır, (d) grafik bir desen izlememektedir. Hata terimlerinin dağılımlarının beklenen kriterleri sağladığı görülmüştür.

İlk analizler sonucunda elde edilen bilgiler dikkate alınarak detaylı analizlere geçilmiştir.

## 5.2 Detaylı Regresyon Analizleri

İlk parametrik analizlerde ele alınan faktörler; ısı güç, hava sıcaklığı, soğutucu malzemesinin ısı iletkenlik katsayısı, PCB ile soğutucu arasına uygulanan macunun ısı direnci ve yapının tasarımı (ısı borulu ve ısı borusuz) olarak belirlenmiştir.

Çalışmanın devamında, analizlerin farklı ısı güç, soğutucu malzemesi ısı iletkenliği ve termal macun ısı direnci basamaklarını kapsayacak şekilde genişletilmesine karar verilmiştir. Dış hava sıcaklığı, doğrudan müdahale edilemeyen bir üretim parametresi olduğu için ilave parametrik irdemelerde inceleme dışında bırakılmıştır. Bu amaçla gerçekleştirilen çalışmalar aşağıda açıklanmaktadır.

Tez kapsamında yapılan tekil LED ölçüm sonuçları (Çizelge 3.2), ısı gücün aynı akım kademesinde sıcaklıktan çok fazla etkilenmediğini fakat artan akım kademesiyle artış gösterdiğini ortaya koymuştur. Çalışmada yüksek güçlü aydınlatma armatürlerinin incelenmesi amaçlanmaktadır. Yapılması planlanan ilave parametrik irdemelerde yüksek güç ve ısı koşullarını simüle edebilmesi için 1050 mA ve 1400 mA sürüş akımına ek olarak bir üst sürüş akımı olan 1750 mA'deki sonuçların da değerlendirilmesi planlanmaktadır. Bu amaçla, 1750 mA güçteki ısı güç değeri; 350, 700, 1050 ve 1400 mA sürüş akımlarında farklı sıcaklıklar için ölçümlerden belirlenen ısı güç değerlerinden ekstrapolasyon yardımıyla hesaplanmıştır. 1050 ve 1400 mA'de ölçümlerle elde edilen sırasıyla 60 ve 70°C'deki ısı güç değerleri ısı analizlerde kullanılmıştır. 1750 mA güçte ise 80°C'deki ısı güç değeri ekstrapolasyon yardımıyla hesaplanmış ve ısı analizlerde kullanılmıştır.

İlave parametrik analizlerde ısı güç, soğutucu (heat sink) malzemesinin ısı iletkenliği ve COB LED'ler ile soğutucu arasına sürülen termal macunun ısı direnci birer parametre olarak ele alınmıştır. Soğutucu malzemesi ısı iletkenlik değerleri ve termal macun ısı direnci; piyasada kullanılan alüminyum soğutucular ve termal macunlar dikkate alınarak seçilmiştir. Analizlerde kullanılan ısı güç, soğutucu ısı iletkenlik ve termal macun ısı direnç değerleri Çizelge 5.3'te görülmektedir. Soğutucu malzemesinin ısı iletkenlik değeri düşük-orta-yüksek kademeleri olarak 140 W/mK, 181 W/mK ve 222 W/mK seçilmiştir. Termal macunun ısı direnci düşük-orta-yüksek

kademeleri olarak 0,000017 Km<sup>2</sup>/W, 0,00017 Km<sup>2</sup>/W ve 0,0017 seçilmiştir. Bu seçimde piyasada bulunan ve LED'lerin soğutucu ile birleşim bölgesinde kullanılabilir farklı ısı arayüz malzemelerinin (macun, yapıştırıcı, termal bant) ısı direnç değerleri göz önüne alınarak direnç aralığı geniş tutulmuştur. Ayrıca termal arayüz malzemesinin uygulama kalitesine göre de ısı direnç değeri farklılık gösterebileceğinden aralığın geniş tutulmasının uygun olacağı düşünülmüştür. İlerleyen bölümlerde bu parametre macun ısı direnci olarak ifade edilecektir. Isıl gücün düşük-orta-yüksek kademeleri olarak ise 111,3 W, 156,9 W ve 207,6 W değerleri ölçüm sonuçlarından ve ekstrapolasyon yönteminden yararlanılarak belirlenmiştir.

**Çizelge 5.3 :** Parametrik analizlerde kullanılan özellik değeri kademeleri.

Özellik	Düşük	Orta	Yüksek
Isıl Güç [W]	111,3	156,9	207,6 (Ekstrapolasyonla ile)
Soğutucu Malzemesi Isıl İletkenliği [W/mK]	140	181	222
Macun Isıl Direnci [Km <sup>2</sup> /W]	0,000017	0,00017	0,0017

Bu değerlerin kombinasyonu olarak ısı borulu-kanatlı ve ısı borusuz sadece kanatlı her bir durum için yirmi yedişer (27) adet analiz gerçekleştirilmiştir. Isıl analiz programı ile yapılan analizler sonucunda elde edilen maksimum sıcaklık değerleri ısı borulu ve ısı borusuz sistemler için Çizelge 5.4'te verilmiştir.

Isı borulu ve sadece kanatlı sistemler karşılaştırıldığında, bire bir aynı koşullar altında maksimum sıcaklıklar arasındaki en düşük yüzdesel fark; en küçük ısı gücün, en yüksek soğutucu ısı iletkenliğinin ve en yüksek macun ısı direncinin olduğu 3 numaralı durumda %2,1 olarak gerçekleşmiştir.

En yüksek yüzdesel fark ise; en yüksek ısı gücün, en düşük soğutucu ısı iletkenliğinin ve en düşük macun ısı direncinin olduğu 25 numaralı durumda %10,1 olarak gerçekleşmiştir. Yüksek güç gereksiniminin bulunduğu ve soğutucu olarak düşük ısı iletkenliğe sahip bir malzeme kullanılması durumunda, ısı borulu-kanatlı sistemin sadece kanatlı sisteme göre ön plana çıkabildiği gözlemlenmiştir.

Hesaplanan %10,1'lik sıcaklık farkının önemi COB LED'lerin ömürleri açısından kullanılacak LED kalitesine göre değişebilecek olmasına rağmen, bu sonuca dayanılarak ısı borulu-kanatlı sistemin üstünlük sağlama potansiyelinin olabileceği söylenebilmektedir.

Çizelge 5.4 : İlave parametrik analizlerde kullanılan özellik kademeleri ve sıcaklık değerleri.

Durum	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<b>Soğutucu Malzemesi Isıl İletkenliği [W/mK]</b>	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3	111,3
<b>Isıl Güç [W]</b>	222	222	222	181	181	181	140	140	140
<b>Macun Isıl Direnci [Km<sup>2</sup>/W]</b>	0,000017	0,00017	0,0017	0,000017	0,00017	0,0017	0,000017	0,00017	0,0017
<b>Isı Borusuz</b>	61,96	65,24	93,93	63,54	66,76	95,28	66,06	69,12	97,33
<b>Isı Borulu</b>	58,96	62,34	91,92	59,75	63,04	92,62	60,96	64,17	93,75
<b>Fark [%]</b>	4,8	4,4	2,1	6,0	5,6	2,8	7,7	7,2	3,7
<b>Durum</b>	<b>10</b>	<b>11</b>	<b>12</b>	<b>13</b>	<b>14</b>	<b>15</b>	<b>16</b>	<b>17</b>	<b>18</b>
<b>Soğutucu Malzemesi Isıl İletkenliği [W/mK]</b>	156,9	156,9	156,9	156,9	156,9	156,9	156,9	156,9	156,9
<b>Isıl Güç [W]</b>	222	222	222	181	181	181	140	140	140
<b>Macun Isıl Direnci [Km<sup>2</sup>/W]</b>	0,000017	0,00017	0,0017	0,000017	0,00017	0,0017	0,000017	0,00017	0,0017
<b>Isı Borusuz</b>	73,39	78,01	118,36	75,61	80,1	120,17	79,06	83,43	123,31
<b>Isı Borulu</b>	69,19	73,97	115,66	70,29	74,97	116,53	71,93	76,52	118,14
<b>Fark [%]</b>	5,7	5,2	2,3	7,0	6,4	3,0	9,0	8,3	4,2
<b>Durum</b>	<b>19</b>	<b>20</b>	<b>21</b>	<b>22</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	<b>25</b>	<b>26</b>	<b>27</b>
<b>Soğutucu Malzemesi Isıl İletkenliği [W/mK]</b>	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6	207,6
<b>Isıl Güç [W]</b>	222	222	222	181	181	181	140	140	140
<b>Macun Isıl Direnci [Km<sup>2</sup>/W]</b>	0,000017	0,00017	0,0017	0,000017	0,00017	0,0017	0,000017	0,00017	0,0017
<b>Isı Borusuz</b>	85,47	91,55	144,76	88,36	94,29	147,24	92,92	98,62	151,19
<b>Isı Borulu</b>	79,96	86,24	141,23	81,39	87,54	142,46	83,56	89,58	144,39
<b>Fark [%]</b>	6,4	5,8	2,4	7,9	7,2	3,2	10,1	9,2	4,5

Bu analizlerden de görülmektedir ki diğer iki özellik aynı kalmak şartıyla soğutucu malzemesi iyileştikçe ısı borulu ve ısı borusuz sistemler arasındaki fark düşmekte, bir başka deyişle ısı borularının sağladığı üstünlük azalmaktadır.

Isı borulu sistemde 9 numaralı durumda maksimum sıcaklık 93,75 °C olarak gerçekleşmiştir. Diğer iki parametre aynı kalmak şartıyla sadece soğutucu ısıl iletkenliği 140 W/mK'den 222 W/mK'e çıkarılarak ısı borusuz sistemle durum 3'teki gibi 93,93°C maksimum sıcaklık elde etmek mümkün olmuştur. Bu bulgulardan, ısı borusu kullanmak ya da ısı borusuz bir sistemle daha iyi bir soğutucu malzemesi kullanarak benzer sonucu elde etmek şeklinde bir seçime gidilebileceği görülmektedir. Karar aşamasında soğutucu malzemesi ve ısı borusu maliyetlerinin karşılaştırılması gerekmektedir.

Analizler neticesinde elde edilen bir diğer sonuç ise, termal macun kalitesi arttıkça bir başka deyişle macun ısıl direnci azaldıkça ısı borulu ve ısı borusuz sistemler arasındaki sıcaklık farkı artmaktadır. Diğer koşullar sabit kalmak kaydıyla ısıl güç arttığında da ısı borulu ve ısı borusuz sistemler arasındaki sıcaklık farkı yine artmaktadır. Yüksek ısıl güçlerde gömülü ısı borulu sistemlerin üstünlükleri daha fazla ortaya çıkmaktadır. Tüm bu sonuçlar, ısı borulu sistemin üstünlüğünün diğer parametreler ile bağlantılı olduğunu ortaya koymaktadır.

Isı borulu sistemlere karar verilmeden önce yapılacak ısıl analizler ile sistemin üstünlükleri ve zayıflıkları irdelenmeli, alternatif sistemler tanımlanarak elde edilebilecek sonuçlar ile karşılaştırmalar yapılmalıdır.

Bir diğer kritik nokta ise, durum 12, 15, 18, 21, 24 ve 27 gibi, macun ısıl direncinin yüksek olduğu durumlarda sistemdeki maksimum sıcaklığın kullanılan COB LED'in kataloğunda belirtilen maksimum jonksiyon sıcaklığı değeri olan 125°C'ye yaklaşması ya da aşmasıdır. Özellikle analiz edilen en yüksek güç kademesinde bu durum daha belirgin bir şekilde ortaya çıkmaktadır. Armatür tasarımcı ve üreticilerinin kullanılacak ısıl arayüz malzemelerini doğru bir şekilde seçmesinin ve uygulamasının, özellikle yüksek güç gerektiren uygulamalarda LED'lerin aşırı sıcaklık etkisiyle bozulmaması açısından çok önemli olduğu görülmektedir.

Detaylı istatistiksel analizlerde de, doğrudan müdahale edilemeyen hava sıcaklığı parametresi ele alınmamıştır. Bu analizlerde de; önceki değerlendirmede etki faktörleri saptanan ısıl güç, soğutucu malzemesinin ısıl iletkenlik katsayısı, PCB ile soğutucu

arasına uygulanan macunun ısı direnci ve tasarım (ısı borulu ve ısı borusuz) dikkate alınmıştır. Isıl güç değeri olarak COB LED'lerin 1050 mA, 1400mA ve 1750 mA deki ısı güç değerleri ele alınmıştır. Isıl iletkenlik değerleri piyasada ticari olarak bulunan ve soğutucu üretiminde kullanılan alüminyumların yaklaşık alt ve üst değerleri dikkate alınarak belirlenmiştir. Macunun ısı direnç değeri ise geniş bir aralıkta ele alınarak piyasada bulunan ticari ısıl araüzey malzemelerinin çoğunu kapsayacak şekilde belirlenmiştir.

Isıl simülasyonlarda kullanılan değerler ve simülasyonlar sonucunda elde edilen maksimum sıcaklıklar Çizelge 5.5'te görülmektedir. Çizelgede; R, macun ısıl direncini; k, soğutucu malzemesinin ısıl iletkenliğini, P ise ısıl gücü temsil etmektedir. Analiz edilen toplam 66 adet durumda elde edilen maksimum sıcaklıklara ayrıca regresyon analizleri de uygulanmıştır (ilave analizler ve ilk analizler ile elde edilen sonuçlar birlikte değerlendirilmiştir). İlave analizlerde "aşamalı (stepwise) regresyon" yöntemi kullanılmış ve modelin hiyerarşik olmasına dikkat edilmiştir. Anlamlılık seviyesi olarak yine 0,05 kabulü yapılmıştır.

**Çizelge 5.5 : Simülasyon sonuçları.**

	<b>R</b>	<b>k</b>	<b>P</b>	<b>Tasarım</b>	<b>Tmaks</b>
<b>1</b>	0,000017	222	111,3	ısı borusuz	61,96
<b>2</b>	0,00017	222	111,3	ısı borusuz	65,24
<b>3</b>	0,0017	222	111,3	ısı borusuz	93,93
<b>4</b>	0,000017	181	111,3	ısı borusuz	63,54
<b>5</b>	0,00017	181	111,3	ısı borusuz	66,76
<b>6</b>	0,0017	181	111,3	ısı borusuz	95,28
<b>7</b>	0,000017	140	111,3	ısı borusuz	66,06
<b>8</b>	0,00017	140	111,3	ısı borusuz	69,12
<b>9</b>	0,0017	140	111,3	ısı borusuz	97,33
<b>10</b>	0,000017	222	156,9	ısı borusuz	73,39
<b>11</b>	0,00017	222	156,9	ısı borusuz	78,01
<b>12</b>	0,0017	222	156,9	ısı borusuz	118,36
<b>13</b>	0,000017	181	156,9	ısı borusuz	75,61
<b>14</b>	0,00017	181	156,9	ısı borusuz	80,1
<b>15</b>	0,0017	181	156,9	ısı borusuz	120,17
<b>16</b>	0,000017	140	156,9	ısı borusuz	79,06
<b>17</b>	0,00017	140	156,9	ısı borusuz	83,43
<b>18</b>	0,0017	140	156,9	ısı borusuz	123,31
<b>19</b>	0,000017	222	207,6	ısı borusuz	85,47
<b>20</b>	0,00017	222	207,6	ısı borusuz	91,55
<b>21</b>	0,0017	222	207,6	ısı borusuz	144,76
<b>22</b>	0,000017	181	207,6	ısı borusuz	88,36
<b>23</b>	0,00017	181	207,6	ısı borusuz	94,29
<b>24</b>	0,0017	181	207,6	ısı borusuz	147,24

**Çizelge 5.5 (devam) : Simülasyon sonuçları.**

	<b>R</b>	<b>k</b>	<b>P</b>	<b>Tasarım</b>	<b>Tmaks</b>
<b>25</b>	0,000017	140	207,6	1S1 borusuz	92,92
<b>26</b>	0,00017	140	207,6	1S1 borusuz	98,62
<b>27</b>	0,0017	140	207,6	1S1 borusuz	151,19
<b>28</b>	0,000017	222	111,3	1S1 borulu	58,96
<b>29</b>	0,000017	222	156,9	1S1 borulu	69,19
<b>30</b>	0,000017	222	207,6	1S1 borulu	79,96
<b>31</b>	0,00017	222	111,3	1S1 borulu	62,34
<b>32</b>	0,00017	222	156,9	1S1 borulu	73,97
<b>33</b>	0,00017	222	207,6	1S1 borulu	86,24
<b>34</b>	0,0017	222	111,3	1S1 borulu	91,92
<b>35</b>	0,0017	222	156,9	1S1 borulu	115,66
<b>36</b>	0,0017	222	207,6	1S1 borulu	141,23
<b>37</b>	0,000017	140	111,3	1S1 borulu	60,96
<b>38</b>	0,000017	140	156,9	1S1 borulu	71,93
<b>39</b>	0,000017	140	207,6	1S1 borulu	83,56
<b>40</b>	0,00017	140	111,3	1S1 borulu	64,17
<b>41</b>	0,00017	140	156,9	1S1 borulu	76,52
<b>42</b>	0,00017	140	207,6	1S1 borulu	89,58
<b>43</b>	0,0017	140	111,3	1S1 borulu	93,75
<b>44</b>	0,0017	140	156,9	1S1 borulu	118,14
<b>45</b>	0,0017	140	207,6	1S1 borulu	144,37
<b>46</b>	0,000017	181	111,3	1S1 borulu	59,75
<b>47</b>	0,000017	181	156,9	1S1 borulu	70,29
<b>48</b>	0,000017	181	207,6	1S1 borulu	81,39
<b>49</b>	0,00017	181	111,3	1S1 borulu	63,04
<b>50</b>	0,00017	181	156,9	1S1 borulu	74,97
<b>51</b>	0,00017	181	207,6	1S1 borulu	87,54
<b>52</b>	0,0017	181	111,3	1S1 borulu	92,62
<b>53</b>	0,0017	181	156,9	1S1 borulu	116,53
<b>54</b>	0,0017	181	207,6	1S1 borulu	142,46
<b>55</b>	0,000017	160	156,9	1S1 borulu	71,05
<b>56</b>	0,000017	160	111,3	1S1 borulu	60,3
<b>57</b>	0,00005	222	111,3	1S1 borusuz	62,7
<b>58</b>	0,00005	222	156,9	1S1 borusuz	74,41
<b>59</b>	0,00005	222	111,3	1S1 borulu	59,68
<b>60</b>	0,00005	160	156,9	1S1 borulu	72,04
<b>61</b>	0,00005	160	156,9	1S1 borusuz	78,16
<b>62</b>	0,00005	160	111,3	1S1 borusuz	65,38
<b>63</b>	0,000017	160	156,9	1S1 borusuz	77,18
<b>64</b>	0,00005	160	111,3	1S1 borulu	61
<b>65</b>	0,00005	222	156,9	1S1 borulu	70,21
<b>66</b>	0,000017	160	111,3	1S1 borusuz	64,68

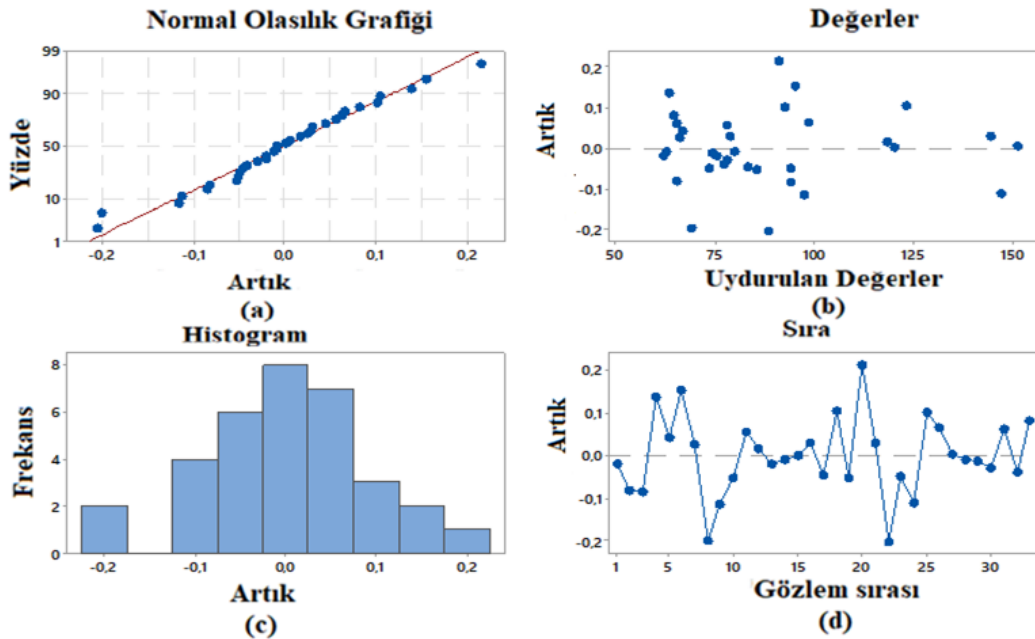
Soğutma amacıyla sadece kanatların kullanıldığı sisteme ait varyans analizi (ANOVA) tablosu Çizelge 5.6’da verilmektedir. Bu değerlendirmede sistemdeki tüm etkileşimler ve faktörlerin kareleri de dikkate alınmıştır. ANOVA tablosundan da görüldüğü gibi

ıslıl güç, soğutucu malzemesinin ıslıl iletkenliği ve macunun ıslıl direnci istatistiksel olarak anlamlı parametrelerdir. Ayrıca faktörlerin etkilerinin karesi de etkilidir. Macun ıslıl direnci-ıslıl güç, soğutucu malzemesi ıslıl iletkenliği-ıslıl güç etkileşimleri de etkilidir. Çizelgede; yine R, macun ıslıl direncini; k, soğutucu malzemesinin ıslıl iletkenliğini, P ise ıslıl gücü temsil etmektedir.

**Çizelge 5.6 :** Sadece kanatların kullanıldığı sistemin varyans analizi tablosu.

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
Regresyon	10	20088,8	2008,88	164383,39	0,000
R	1	0,2	0,21	17,20	0,000
k	1	2,2	2,17	177,45	0,000
P	1	40,4	40,36	3302,87	0,000
R×R	1	1,0	1,00	81,80	0,000
k×k	1	2,4	2,43	198,45	0,000
P×P	1	0,7	0,74	60,76	0,000
R×k	1	0,0	0,01	0,64	0,433
R×P	1	22,7	22,67	1854,86	0,000
k×P	1	5,5	5,46	447,15	0,000
R×k×P	1	0,0	0,01	0,64	0,433
Hata	22	0,3	0,01		
Toplam	32	20089,0			
	S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ayarlanmış)	R <sup>2</sup> (tahmin)	
	0,110547	% 100,00	% 100,00	% 100,00	

Sadece kanatların kullanıldığı sistemde T<sub>maks</sub> için residual (artık) grafikleri Şekil 5.7'de görülmektedir.

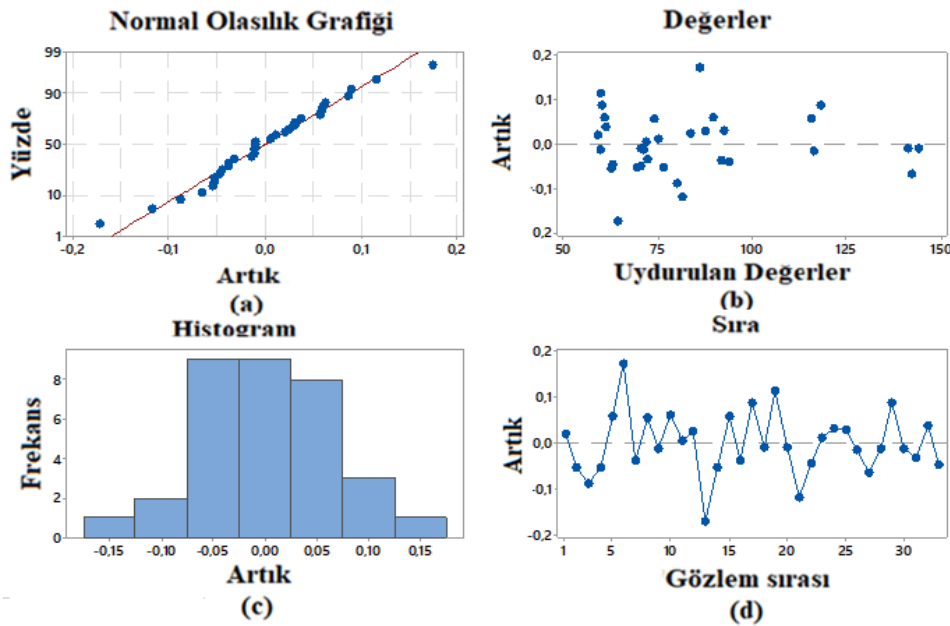


**Şekil 5.7 :** Sadece kanatların kullanıldığı sistemin artık grafikleri.

Isı borulu-kanatlı sisteme ait varyans analizi (ANOVA) tablosu da Çizelge 5.7’de görülmektedir. ANOVA tablosundan bu tasarımda da sadece kanatlı sistemde olduğu gibi ısı güç, soğutucu malzemesinin ısı iletkenliği ve macunun ısı direncinin istatistiksel olarak anlamlı parametreler olduğu görülmektedir. Ayrıca faktörlerin etkilerinin karesi de etkilidir. Macunun ısı direnci-ısı güç, soğutucu malzemesi ısı iletkenliği-ısı güç etkileşimleri etkilidir. Çizelgede; R, macun ısı direncini; k, soğutucu malzemesinin ısı iletkenliğini, P ise ısı gücü temsil etmektedir. Isı borulu-kanatlı sistemde  $T_{maks}$  için residual (artık) grafikleri Şekil 5.8’de görülmektedir.

**Çizelge 5.7 :** Isı borulu sistemin varyans analizi tablosu.

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
Regresyon	10	19887,8	1988,70	288975,03	0,000
R	1	0,4	0,35	51,39	0,000
k	1	0,5	0,49	70,49	0,000
P	1	26,0	25,99	3776,58	0,000
R×R	1	1,1	1,12	162,13	0,000
k×k	1	0,5	0,53	77,41	0,000
P×P	1	0,7	0,72	104,33	0,000
R×k	1	0,0	0,00	0,13	0,724
R×P	1	24,4	24,41	3546,47	0,000
k×P	1	1,2	1,21	176,44	0,000
R×k×P	1	0,0	0,01	1,12	0,301
Hata	22	0,2	0,01		
Toplam	32	19888,0			
	S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ayarlanmış)	R <sup>2</sup> (tahmin)	
	0,0829590	%100,00	%100,00	%100,00	



**Şekil 5.8 :** Isı borulu sistemin artık grafikleri.

Isı borulu-kanatlı ve sadece kanatlı sistemlerin birlikte değerlendirilmesine ait ANOVA tablosu Çizelge 5.8’de, regresyon denklemleri ise (5.1) ve (5.2)’de verilmektedir. ANOVA tablosundan da görüldüğü gibi ısı güç, soğutucu malzemesinin ısı iletkenliği ve macunun ısı direnci istatistiksel olarak anlamlı parametrelerdir. Tasarımın ısı borulu ya da ısı borusuz olması, yalnız başına maksimum sıcaklık üzerinde etkili değildir. Ancak sistem tasarımının ısı güç ile ikili ve ısı güç-soğutucu malzemesinin ısı iletkenliği ile üçlü etkileşimleri etkili olduğundan, modeldeki hiyerarşinin sağlanması amacıyla “tasarım” analizde tutulmaktadır. ANOVA tablosundan görüldüğü gibi faktörlerin karesi de etkilidir. İkili etkileşimlerden macun ısı direnci-ısı güç, soğutucu malzemesinin ısı iletkenliği-ısı güç, tasarım-ısı güç; üçlü etkileşimlerden ise soğutucu malzemesinin ısı iletkenliği-ısı güç- tasarım etkilidir. Analizler sonucunda ısı gücün hem tek başına hem de diğer parametrelerle etkileşiminin istatistiksel olarak anlamlı olduğu görülmüştür. Çizelge 5.8’de ve Eşitlik (5.1) ve (5.2)’de; R, macun ısı direncini; k, soğutucu malzemesinin ısı iletkenliğini, P ise ısı gücü temsil etmektedir.

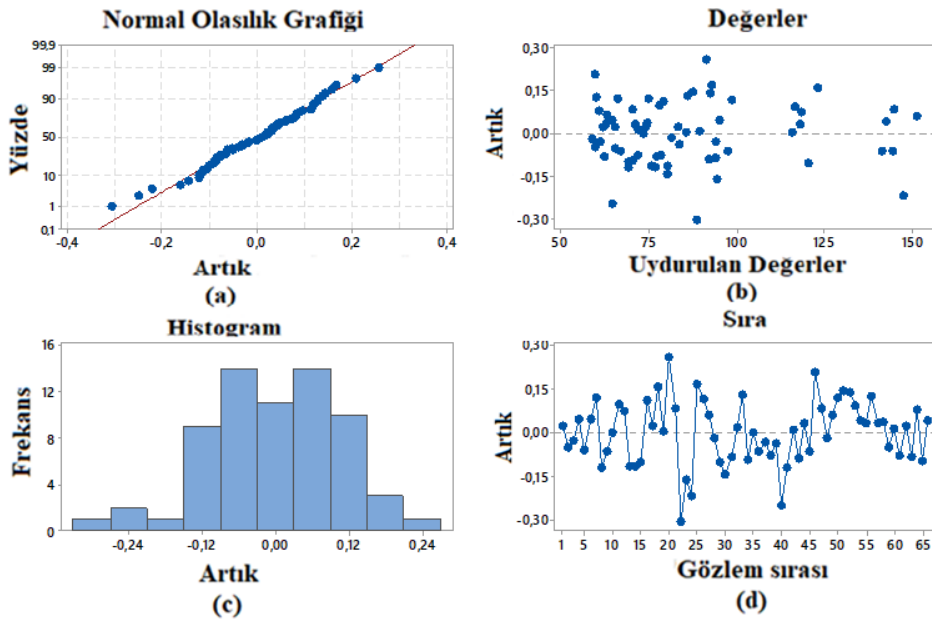
**Çizelge 5.8 :** Isı borulu-kanatlı ve sadece kanatlı sistemlerin birlikte değerlendirildiği durumun varyans analizi tablosu.

Kaynak	Serbestlik Derecesi	Adj SS	Adj MS	F Değeri	P Değeri
Regresyon	18	40375,1	2243,06	138226,36	0,000
R	1	0,4	0,35	21,72	0,000
k	1	2,2	2,18	134,22	0,000
P	1	39,9	39,91	249,60	0,000
Tasarım	1	0,0	0,00	0,01	0,944
R×R	1	2,1	2,11	130,26	0,000
k×k	1	2,6	2,62	161,19	0,000
P×P	1	1,5	1,46	90,00	0,000
R×k	1	0,0	0,00	0,00	0,978
R×P	1	24,6	24,64	1518,21	0,000
k×P	1	1,1	1,15	70,79	0,000
R×Tasarım	1	0,0	0,00	0,14	0,707
k×Tasarım	1	0,0	0,00	0,05	0,826
P×Tasarım	1	2,8	2,77	170,42	0,000
R×k×P	1	0,0	0,00	0,3	0,589
R×k×Tasarım	1	0,0	0,00	0,13	0,716
R×P×Tasarım	1	0,0	0,02	1,48	0,230
k×P×Tasarım	1	0,8	0,85	52,34	0,000
R×k×P×Tasarım	1	0,0	0,00	0,04	0,836
Hata	47	0,8	0,02		
Toplam	65	40375,9			
	S	R <sup>2</sup>	R <sup>2</sup> (ayarlanmış)	R <sup>2</sup> (tahmin)	
	0,127387	% 100,00	% 100,00	% 100,00	

$$\begin{aligned}
\text{Isı borulu} \quad T_{maks} = & 40,43 + 3557 \times R - 0,09940 \times \\
& k + 0,30105 \times P - 1888970 \times R \times R + 0,000265 \times k \times k - \\
& 0,000135 \times P \times P + 0,11 \times R \times k + 170,86 \times R \times P - \\
& 0,000188 \times k \times P + 0,013 \times R \times k \times P
\end{aligned} \quad (5.1)$$

$$\begin{aligned}
\text{Sadece kanatlı} \quad T_{maks} = & 40,36 + 3179 \times R - 0,09830 \times \\
& k + 0,37680 \times P - 1888970 \times R \times R + 0,000265 \times k \times k - \\
& 0,000135 \times P \times P + 1,88 \times R \times k + 163,33 \times R \times P - \\
& 0,000416 \times k \times P + 0,0200 \times R \times k \times P
\end{aligned} \quad (5.2)$$

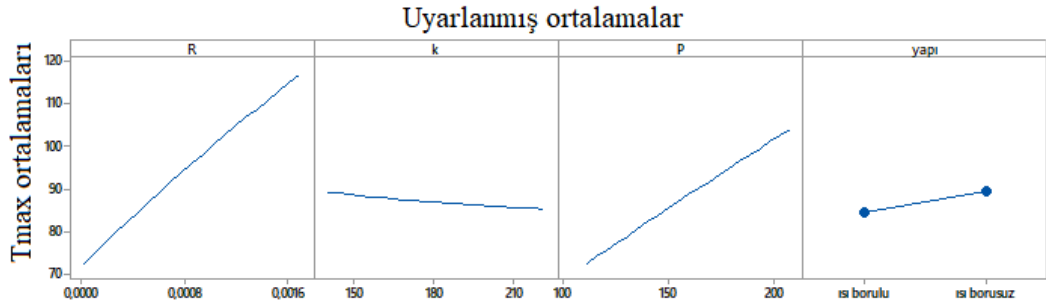
$T_{maks}$  için residual (artık) grafikleri Şekil 5.9'da görülmektedir. Şekilden de görüldüğü gibi (a) artıkların normal olasılık grafiği yaklaşık olarak düz bir çizgiyi takip etmektedir, (b) noktalar sıfır (0) çizgisinin iki tarafında rasgele bir şekilde yer almaktadır, (c) artıkların histogramı normal dağılıma çok yakındır, (d) grafik bir desen izlememektedir. Regresyonun uyumunun bir göstergesi olan artık grafikleri değerlendirildiğinde, grafiklerin sağlaması gereken kriterlere uygun olduğu görülmektedir.



**Şekil 5.9** : Isı borulu ve kanatlı sistemlerin birlikte değerlendirildiği durumun artık grafikleri.

Temel etki grafikleri ve ikili etkileşim grafikleri de Şekil 5.10 ve Şekil 5.11'de verilmektedir. Şekil 5.10'da etkilerin değişimlerine göre ortalama  $T_{maks}$  değişimleri görülmektedir. Bu grafiklerin yataya yakın, diğer bir deyişle x eksenine paralel olması temel etkinin olmadığını, yatay olmaması ise temel etki olduğunu gösterir. Temel etki grafikleri, ikili etkileşimlerin olduğu yerlerde bu etkileşimlerle birlikte değerlendirilmelidir. Şekil 5.10'da; R, macun ısıl direncini; k, soğutucu malzemesinin

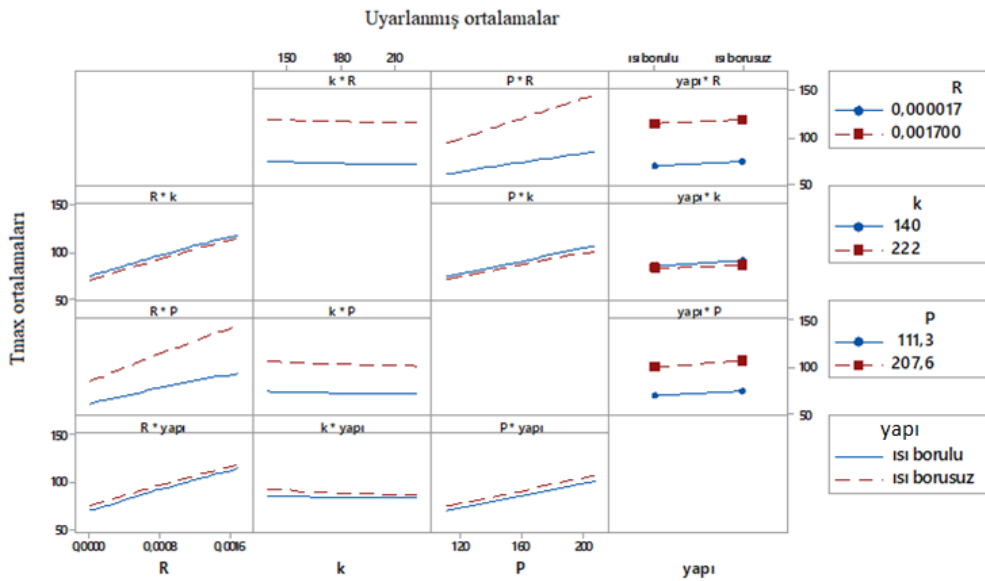
ısı iletkenliğini, P ısı gücü, yapı ise soğutma sisteminin ısı borulu ya da ısı borusuz olduğunu temsil etmektedir.



Şekil 5.10 : Temel etki grafikleri.

İkili etkileşim grafiklerinde çizgiler etkileşimlerin değerlendirilmesinde kullanılırlar. Grafikteki iki çizginin birbirine paralel olması etkileşimin olmadığını, paralel olmaması ise etkileşimin olduğunu gösterir.

Şekil 5.11'deki ikili etkileşim grafikleri incelendiğinde en kuvvetli etkileşimin ısı güç ve termal macun ısı direncinin birbiriyle etkileşimi olduğu görülmektedir. Artan ısı güç ile birlikte termal macun ısı direncinin etkisi de belirginleşmektedir. Özellikle yüksek güçlü uygulamalarda, yapının maksimum sıcaklığında düşük güçlerdeki göre daha fazla artışa sebep olacağından, ısı direnci yüksek bir macun kullanılması, tercih edilmemelidir. Ayrıca yine ANOVA tablosundan ısı güç-tasarım (yapı) ve soğutucu malzemesinin ısı iletkenliği-ısı güç etkileşimlerinin de etkili olduğu görülmektedir.



Şekil 5.11 : İkili etkileşim grafikleri.

Şu ana kadar yapılan değerlendirmelerde, prototip eldesindeki parametreler değiştirilip yapılan ısı analizler sonucunda bulunan maksimum sıcaklık değerleri kullanılarak her iki soğutma sistemi için regresyon denklemleri elde edilmiştir (Eşitlik 5.1 ve 5.2). Bu denklemler kullanılarak ısı analizlere gereksinim duyulmadan değişen parametrelere göre her iki sistem için maksimum sıcaklıklar elde edilip, iki sistem birbiriyle karşılaştırılabilir. Çizelge 5.9’da her iki soğutma sistemi için regresyon denklemleri kullanılarak elde edilen maksimum sıcaklık değerleri görülmektedir. Çizelgede “P” ısı (termal) gücü, “R” macun ısı direncini, “k” ise soğutucu malzemesinin ısı iletkenliğini göstermektedir. İlk üç sıradaki kombinasyonlar analizler ile elde edilmiş olanların içinden seçilmiştir. Bu üç kombinasyondaki maksimum sıcaklık değerleri Çizelge 5.5’teki simülasyon değerleri ile karşılaştırıldığında regresyon denklemlerinin doğru sonuç verdiği kanıtlanmaktadır. Diğer beş adet ısı güç, direnç ve ısı iletkenlik kombinasyonu ise analizlerde olmayan kombinasyonlardır. Bunlar regresyon denklemleri ile elde edilmiş ve iki sistem arasındaki sıcaklık farkı bulunmuştur. Sonuç olarak, regresyon denklemleri yapılması gereken analiz sayısını azaltmaktadır. Bu denklemler ile parametreler istenilen aralıklarla değiştirilerek maksimum sıcaklığa olan etkileri değerlendirilebilmektedir.

**Çizelge 5.9 :** Regresyon denklemleri ile elde edilen sonuçlar.

Sıra	P	R	k	Tmaks Isı Borulu [°C]	Tmaks Isı Borusuz [°C]	Fark [%]
1	111,3	0,000017	160	60,18	64,65	6,9
2	156,9	0,0017	181	116,52	120,29	3,1
3	207,6	0,00017	140	89,57	98,50	9,1
4	170	0,0006	200	91,20	95,83	4,8
5	200	0,001	170	115,91	122,08	5,1
6	130	0,0005	140	77,68	82,97	6,4
7	190	0,00002	160	78,65	86,19	8,7
8	115	0,0002	210	64,17	67,40	4,8

Regresyon denklemlerinin kullanılması ile yapılması gereken analiz sayısının azalması, hesaplama maliyetlerinin ve iş gücünün daha verimli kullanılmasını sağlamaktadır. Tasarım aşamasında etkili parametrelerin belirlenmesi ve regresyon denkleminin elde edilmesi tasarımcıya analiz yükü getirmeden çok sayıda parametrik değişikliğin sonucunu görme olanağı sağlayacaktır.

Elde edilecek regresyon denklemleri ile yapılabilecek karşılaştırmaların armatür üreticileri için de önemi büyüktür. Soğutma sistemi seçimi ve diğer parametrelerin

karşılaştırmaları yapılarak maliyet-etkin en optimum sistem belirlenip üretimlere bu doğrultuda yön verilebilir. Bu aşamada üreticinin maliyet etkenlerini de göz önüne alması yapılacak seçimlerin nihai ürünlerde uygulanabilirliği açısından önemlidir.





## 6. SONUÇ VE ÖNERİLER

Literatür çalışması sırasında LED ışık kaynaklarının verimlerinin (optik gücün elektriksel güce oranı) yaklaşık olarak kabul edilip tasarım ve ısıl analizlerin yapıldığı gözlemlenmiştir. Bu belirsizliği önlemek amacıyla çalışmanın ilk adımı olarak; LED ışık kaynaklarının ışık akısı, etkinlik faktörü, optik güç ve renk özelliklerinin sıcaklık değişiminden etkilenme karakteristiklerinin belirlenebilmesi için 24 adet yüksek güçlü LED ışık kaynağının nominal sürüş akımı kademelerinde ve farklı sıcaklık basamaklarında sıcaklık kontrollü Ulbricht küresi yardımıyla ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Bu ölçümlerden, yüksek güçlü LED'lerin özelliklerinin sıcaklık artışından farklı oranlarda etkilendiği görülmüştür. Bu durum LED ışık kaynaklı armatür tasarımında kullanılacak LED'in kalitesinin önemini ortaya koymaktadır. Ayrıca LED'lerin farklı sıcaklıktaki özelliklerinin ölçümlerle belirlenmesinin, tasarım aşamasında belirlenen ışık akısı, etkinlik faktörü gibi hedeflere ulaşılabilmesi için gerekli olduğu da görülmektedir.

LED'lerin özelliklerinin sıcaklıktan olumsuz etkilenmesinin önüne geçilebilmesi amacıyla bu ışık kaynağının kullanıldığı aydınlatma armatürlerinin ısıl yönetimlerinin sürekli ve düzgün bir biçimde yapılması gerekmektedir. Özellikle COB LED ışık kaynaklı armatürlerde ısıl yönetim daha da önem kazanmaktadır. Bu durum, açığa çıkan ısıl gücün, soğutucunun COB LED'lerin yerleştirildiği küçük bir bölgesinde yoğunlaşması ve buradan soğutucunun diğer bölümlerine yayılmaya çalışmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle tez çalışmasında, yüksek ışık akısı hedeflenen armatürlerde az sayıda ışık kaynağı ile hedeflenen değerlere ulaşılabilmesine olanak veren COB LED kullanımına karar verilmiştir.

LED ışık kaynaklı armatürlerin soğutulmasında kullanılabilecek yöntemler ile ilgili literatürde mevcut çok sayıda çalışma incelenmiştir. Bu incelemeler sonucunda yapılan üstünlük - zayıflık değerlendirmesine göre seçilen sadece soğutucu kanatların kullanıldığı ve ısı boruları ile kanatların birlikte kullanıldığı pasif soğutma sistemlerinin, üretilecek bir armatür prototipi üzerinde ısıl simülasyon ve deneysel

irdelemelerle karşılaştırılmasına, sağlanabilecek faydaların belirlenmesine karar verilmiştir.

Bu amaçla önce sadece kanatların kullanıldığı soğutma sisteminin tasarım, ısıl analiz, prototip üretimi ve deneysel irdelemeleri yapılmış, ardından aynı işlemler ısı boruları ile kanatların birlikte kullanıldığı soğutma sistemi için gerçekleştirilmiştir. Her iki soğutma sistemi için de ısıl simülasyon sonuçları ile deneysel ölçüm sonuçları karşılaştırılarak ısıl simülasyonlar doğrulanmıştır. Çalışma sonucunda, prototip tasarımında belirlenen şartlar için sadece kanatların kullanıldığı soğutma sistemi ile ısı boruları ile kanatların birlikte kullanıldığı soğutma sisteminin soğutucu plakaları üzerinde karşılaştırma amaçlı ele alınan bölgedeki ortalama sıcaklıklar arasındaki farkın yalnızca 3,3 °C olduğu görülmüştür. Bu değer ışık akısı olarak 253 lümene karşılık gelmektedir. Ele alınan durum için kanatlı soğutma sistemi ile ısı borulu-kanatlı soğutma sistemine sahip iki prototip arasında ışık akısı olarak % 0,6'lık bir fark gözlemlenebilmiştir. Kullanılan COB LED'in kalitesi yüksek olduğu için, karakteristik özellikleri sıcaklıktan daha düşük kalitedeki LED'lere göre daha az etkilenmektedir. Diğer yandan, iki sistem arasındaki farkın bu kadar az olmasının önemli bir nedeni de, tasarım aşamasında soğutucunun boyutsal özelliklerinin ve malzeme seçiminin ısı geçişini mümkün olduğunca olumlu etkileyecek şekilde yapılmış olmasıdır.

Farklı değişkenlerin, tasarlanan kanatlı ve ısı borulu-kanatlı soğutma sistemlerine sahip armatür prototibindeki maksimum sıcaklıklara etkisinin belirlenmesi amacıyla parametrik irdelemeler gerçekleştirilmiştir. Isıl güç, termal macunun ısıl direnci, yapının sadece kanatlı ya da ısı borulu-kanatlı olması ve soğutucu malzemesinin ısıl iletkenlik katsayısı gibi parametreler ele alınarak etki değerlendirmeleri yapılmıştır. Isıl güç, soğutucu malzemesinin ısıl iletkenliği ve termal macun ısıl direncinin istatistiksel olarak anlamlı parametreler olduğu, tasarımın ısı borulu ya da ısı borusuz olmasının ise yalnız başına etkili olmadığı, ancak farklı değişkenlerle ikili ve üçlü etkileşimlerinin önemli olabildiği sonucuna varılmıştır.

Sadece kanatlı ve ısı borulu-kanatlı sistemlerin maksimum sıcaklıkları arasındaki en yüksek yüzdesel fark, analiz amaçlı seçilen kademelerdeki en yüksek ısıl gücün, en düşük soğutucu ısıl iletkenliğinin ve en düşük termal macun ısıl direncinin olduğu durumda %10,1 olarak gerçekleşmiştir. Bu sıcaklık farkı, özellikle COB LED ışık kaynaklarının ömürleri açısından fark yaratabilecek boyuttadır. Diğer yandan ısı

borulu-kanatlı ve sadece kanatlı sistemler karşılaştırıldığında, maksimum sıcaklıklar arasındaki en düşük yüzdesel fark; en küçük ısı gücün, en yüksek soğutucu ısı iletkenliğinin ve en yüksek termal macun ısı direncinin olduğu durumda %2,1 olarak gerçekleşmiştir. Elde edilen bulgular, soğutucu sistem seçimine karar verilmeden önce sistemde kullanılacak diğer elemanlar da ısı analizlere dahil edilerek sonuçların karşılaştırılması gerekliliğini ortaya koymaktadır. Bazı durumlarda, seçilecek sistem bileşenleri değiştirilerek ek olarak gelecek ısı borusu maliyetlerinden kaçınılabileceği ve sadece kanatların kullanıldığı soğutma sisteminin tercih edilebileceği gözlemlenmiştir.

Tez çalışmasında, detaylı regresyon analizleri sonucunda her iki soğutma sistemi için regresyon denklemleri elde edilmiştir. Bu denklemler kullanılarak ilave ısı analizler yapılmadan da maksimum sıcaklık değerleri elde edilerek soğutma sistemlerinin karşılaştırılması olanaklı hale getirilmiştir. Benzer değerlendirmelerin armatür üreticisi tarafından da yapılması optimuma en yakın maliyet-etkin tasarımın elde edilebilmesine katkı sağlayacaktır. Bu tezde uygulanan sistematik ilerleyiş biçimi, tasarımcı ve üreticiye hedeflerine ulaşması açısından bir yaklaşım yöntemi oluşturması yönüyle önemlidir.

Sonuç olarak tezin, farklı soğutma sistemlerinin bir endüstriyel armatür prototibine uygulanması ve performans açısından karşılaştırılması hedefi gerçekleştirilmiştir. Simülasyon ve deneysel ölçümlerin doğrulanması için kullanılan sistem kombinasyonunda ışık akısı ve ortalama sıcaklıklar açısından büyük bir fark olmadığı gözlemlenmiştir. Öte yandan ilave simülasyonlarda farklı parametre kombinasyonlarında iki soğutma sisteminin maksimum sıcaklıkları arasındaki farkın %10,1'e kadar çıkabildiği görülmüştür. Bu sıcaklık farkı değeri LED'lerin uzun dönemli çalışmada ömür süresine etki edebilecek boyuttadır. Elde edilen bu bulgular soğutma sistemi seçiminin çok yönlü bir değerlendirmeye belirlenmesi gerektiğini ortaya koymaktadır.

Bundan sonraki araştırmalarda bu tez kapsamında yüksek ışık akılı endüstriyel armatür özelinde yapılan çalışmanın, aydınlatmanın farklı uygulama alanlarında kullanılan değişik özellikli armatürler için de uygulanarak, soğutma sistemlerinin farklı alanlardaki performanslarının irdelenmesi yararlı olacaktır. Ayrıca LED ömürlerinin sıcaklıktan etkilenme durumlarının da değerlendirmeye dahil edilerek, soğutma sistemi performansının bu koşullara uygun olarak analiz edilmesi gerekmektedir. Bu

tez kapsamında yüksek kaliteli bileşenler seçilerek yapılan analizlerin piyasa koşullarında kullanılan bileşenler dikkate alınarak genişletilmesi de soğutucu seçimi açısından uygun yaklaşımlar geliştirilmesinde yarar sağlayacaktır.



## KAYNAKLAR

- Arık, M. ve Setlur, A.** (2010). Environmental and economical impact of LED lighting systems and effect of thermal management, *International Journal of Energy Research*, **34**, 1195-1204.
- Arık, M. ve Utturkar, Y.** (2008). Interaction of a synthetic jet with an actively cooled heat sink, *Thermal and Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems*, IThERM 2008, 374-379.
- Ateş, S., Yurtseven, M. B. ve Onaygil, S.** (2019). Design of a Chip on Board (COB) LED Based Industrial Luminaire with Thermal Simulations, *Light & Engineering*, **27(2)**, 78-87.
- Cree.** (2014). Cree First to Break 300 Lumens-Per-Watt Barrier. *Cree*. Erişim tarihi: 22.04.2016, alındığı yer: [www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier](http://www.cree.com/News-and-Events/Cree-News/Press-Releases/2014/March/300LPW-LED-barrier).
- Deng, Y. ve Liu, J.** (2010). A liquid metal cooling system for the thermal management of high power LEDs, *International Communications in Heat and Mass Transfer*, **37**, 788-791.
- Elektrik Lambaları ve Aydınlatma Armatürlerinin Enerji Etiketlemesine Dair Tebliğ (SGM-2015/9).** (2015). *T. C. Resmi Gazete*, 29267, 14 Şubat 2015.
- Faghri, A.** (1995). *Heat Pipe Science and Technology*, Taylor&Francis, USA.
- Faghri, A.** (2014). Heat Pipes: Review, Opportunities And Challenges, *Frontiers in Heat Pipes (FHP)*, **5(1)**, 1-48.
- Huaiyu, Y., Koh, S., Zeijl, H. van, Gielen, A. W. J. ve Guoqi, Z.** (2011). A Review Of Passive Thermal Management of LED Module, *Journal of Semiconductors*, **32(1)**, 1-4.
- IES TM-21-11** (2011). Projecting Long Term Lumen Maintenance of LED Light Sources: IESNA.
- Kim, L., Choi, J., H., Jang, S., H., Shin ve M., W.** (2007). Thermal analysis of LED array system with heat pipe, *Thermochimica Acta*, **455(1-2)**, 21-25.
- Lee, H. S.** (2010). *Thermal design: heat sinks, thermoelectrics, heat pipes, compact heat exchangers, and solar cells*, John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, NJ, USA.
- Li, J., Ma, B., Wang, R. ve Han, L.** (2011). Study on a cooling system based on thermoelectric cooler for thermal management of high-power LEDs, *Microelectronics Reliability*, **51**, 2210-2215.
- Li, J., Lin, F., Wang, D. ve Tian, W.** (2013). A loop-heat-pipe heat sink with parallel condensers for high-power integrated LED chips, *Applied Thermal Engineering*, **56(1-2)**, 18-26.

- Lin M. T., Chang, C. C., Horng, R. H., Huang, D. S. ve Lai, C. M.** (2009). Heat Dissipation Performance for the Application of Light Emitting Diode, *2009 Symposium on Design, Test, Integration & Packaging of MEMS/MOEMS, MEMS/MOEMS '09*, Rome: April.
- Liu, L., Zhang, G., Q., Yang, D., Pan, K., Zhong, H. Ve Hou, F.** (2010). Thermal Analysis and Comparison of Heat Dissipation Methods on High-Power LEDs, *11th International Conference on Electronic Packaging Technology and High Density Packaging*, Wi'an.
- LM-80-08** (2008). Approved Method: Measuring Lumen Maintenance of LED Light Sources: IESNA.
- Lu, X., Y., Hua, T., C. ve Wang, Y., P.** (2011). Thermal analysis of high power LED package with heat pipe heat sink, *Microelectronics Journal*, **42(11)**, 1257-1262.
- Majahan, R.** (2004). Thermal Interface Materials: A Brief Review of Design Characteristics and Materials. *Electronics Cooling*. Erişim tarihi:13.12.2017, alındığı yer: <https://www.electronics-cooling.com/2004/02/thermal-interface-materials-a-brief-review-of-design-characteristics-and-materials/#>
- Miron, R.** (2016). The Basics of Chip on Board (COB) LEDs. *Digi-Key Electronics*. Erişim tarihi:25.10.2020, alındığı yer: <https://www.digikey.com/en/articles/the-basics-of-chip-on-board-cob-leds>
- Moffat, R.** (1988). Describing the Uncertainties in Experimental Results, *Experimental Thermal and Fluid Science*, **1(1)**, 3-17.
- Onaygil, S.** (2013). LED'li Yol Aydınlatması ve Enerji Verimliliği, Alındığı yer: [http://www.emo.org.tr/ekler/33f1f537d75889f\\_ek.pdf](http://www.emo.org.tr/ekler/33f1f537d75889f_ek.pdf), erişim tarihi: 15.08.2019.
- Onaygil, S.,** (2016). Aydınlatma Tekniği, Verimlilik, Planlama ve Yönetim, Aydınlatmada Planlama Ve Yönetimin Önemi Semineri, 26 Şubat 2016, Gaziantep, Alındığı yer: [http://www.emo.org.tr/ekler/da88bfd57b5f39e\\_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=12](http://www.emo.org.tr/ekler/da88bfd57b5f39e_ek.pdf?tipi=2&turu=X&sube=12), erişim tarihi: 26.11.2019.
- Özkaya, M. ve Tüfekçi, T.** (2011). *Aydınlatma Tekniği*. İstanbul: Birsen Yayınevi Ltd. Şti.
- Petroski, J.** (2006). Thermal Challenges In LED Cooling. *Electronics Cooling*. Erişim tarihi: 06.08.2019, alındığı yer: <https://www.electronics-cooling.com/2006/11/thermal-challenges-in-led-cooling/>.
- Petroski, J., Arik, M. ve Gursoy, M.** (2010). Optimization of piezoelectric oscillating fan-cooled heat sinks for electronics cooling, *IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies*, **33(1)**, 25-31.
- Recktenwald, G.** (2006). Uncertainty Estimation and Calculation, Alındığı yer: <http://web.iitd.ac.in/~pmvs/courses/mel705/uncertainty2.pdf>, erişim tarihi: 05.05.2019.

- Reay, D. A., McGlen, R. ve Kew, P.** (2014). *Heat Pipes: theory, design and applications (Sixth Edition)*. Kidlington, Oxford, UK : Butterworth-Heinemann, an imprint of Elsevier.
- Salem, T., K. , Khosroshahi, F., S., Arık, M., Hamdan, M., O. ve Budaklı, M.** (2019). Numerical and experimental analysis of a heatpipe-embedded printed circuit board for solid state lighting applications, *Experimental Heat Transfer*, **32(1)**, 1-13.
- Saums, D., L.** (2014) Advances in Thermal Interface Materials for PowerLED Applications. In C.J.M., Lasance, A. Poppe (Eds.), *Thermal Management for LED Applications*, New York: Springer.
- Tang, Y., Ding, X., Yu, B., Li, Z. ve Liu, B.** (2014a). A high power LED device with chips directly mounted on heat pipes, *Applied Thermal Engineering*, **66(1–2)**, 632-639.
- Tang, H., Zhao, J., Li, B., Leung, Y., Y., Yuan, C., C., A. ve Zhang, G., Q.** (2014b). Thermal Performance of Embedded Heat Pipe in High Power Density LED Streetlight Module, *15th International Conference on Thermal, Mechanical and Multi-Physics Simulation and Experiments in Microelectronics and Microsystems*, Ghent: April 7-9.
- Url-1** <<https://www.samsung.com/led/lighting/led-modules/downlight-module/round-gen3/>>, Erişim: 07.08.2019.
- Url-2** <<https://www.newegg.ca/p/22B-002G-00062>>, Erişim: 07.08.2019.
- Url-3** <[www.opticsledlens.com/UploadFile/2015091279495257.jpg](http://www.opticsledlens.com/UploadFile/2015091279495257.jpg)>, Erişim: 25.04.2016
- Url-4** <<https://www.ledil.com/product-landing/reflectors/ANGELA/#start>>, Erişim: 07.08.2019
- Url-5** <<https://enerji.itu.edu.tr/arastirma/laboratuvarlar/enerji-verimlilik-ve-aydinlatma-teknigi-laboratuvari>>, Erişim: 07.08.2019
- Url-6** <[www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/ASSIST-LEDLife-revised2007.pdf](http://www.lrc.rpi.edu/programs/solidstate/assist/pdf/ASSIST-LEDLife-revised2007.pdf)>, Erişim: 07.08.2019
- Url-7** <[https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/thermal\\_led\\_feb07\\_2.pdf](https://www1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/thermal_led_feb07_2.pdf)>, Erişim: 16.06.2017.
- Url-8** <<https://dammedia.osram.info/media/resource/hires/osram-dam-2496678/PCB%20technologies%20for%20LED%20applications.pdf>>, Erişim: 24.08.2019.
- Url-9** <[http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLamp\\_PCB\\_Thermal.pdf](http://www.cree.com/led-components/media/documents/XLamp_PCB_Thermal.pdf)>, erişim tarihi:05.12.2017.
- Url-10** <[www.kerafol.com/fileadmin/user\\_upload/Thermalmanagement/downloads/2017/Kerafol\\_Katalog\\_Keratherm\\_FINAL.pdf](http://www.kerafol.com/fileadmin/user_upload/Thermalmanagement/downloads/2017/Kerafol_Katalog_Keratherm_FINAL.pdf)>, erişim tarihi: 13.12.2017.
- Url-11** <<https://multimedia.3m.com/mws/media/1222680/characteristics-of-thermal-interface-materials.pdf>>, erişim tarihi:25.10.2020.
- Url-12** <<https://www.mouser.com/datasheet/2/1/TC-2810%20TDS-475518.pdf>>, erişim tarihi:02.04.2020.

- Url-13** <<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/supporting-topics/basics/basics-of-stepwise-regression/>> , erişim tarihi:26.12.2018.
- Url-14** <<https://support.minitab.com/en-us/minitab/18/help-and-how-to/modeling-statistics/regression/how-to/fit-regression-model/interpret-the-results/all-statistics-and-graphs/residual-plots/#normal-probability-plot-of-residuals>> , erişim tarihi:26.12.2018.
- Wang, J., Cai, Y., X., Zhao, X., J. ve Zhang. C.** (2014). Thermal design and simulation of automotive headlamps using white LEDs, *Microelectronics Journal*, **45(2)**, 249-255.
- 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.
- Ye, H., Li, B., Tang, H., Zhao, J., Yuan, C. ve Zhang, G.** (2014). Design of vertical fin arrays with heat pipes used for high-power light-emitting diodes, *Microelectronics Reliability*, **54(11)**, 2448-2455.
- Ye, H., Mihailovic, M., Wong, C. K. Y., Zeijl, H. W. van, Gielen, A. W. J., Zhang, G. Q. ve Sarro, P. M.** (2013). Two-phase cooling of light emitting diode for higher light output and increased efficiency, *Applied Thermal Engineering*, **52**, 353-359.
- Yi-bing, L.** (2012). On Thermal Structure Optimization of Power LED Lighting, *Procedia Engineering*, **29**, 2765-2769.
- Zissis, G.** (2009). Light-emitting Diodes: Principles and Challenges. In P. Mottier (Ed.), *LEDs for Lighting Applications*, USA: John Wiley and Sons, Inc.

## ÖZGEÇMİŞ

**Ad-Soyad** : Seher ATEŞ

**Doğum Tarihi ve Yeri** :

**E-posta** :

### ÖĞRENİM DURUMU:

- **Lisans** : 2009, Yıldız Teknik Üniversitesi, Makine Fakültesi, Makine Mühendisliği
- **Yüksek lisans** : 2012, İstanbul Teknik Üniversitesi, Makine Mühendisliği Anabilim Dalı, Isı Akışkan Programı

### MESLEKİ DENEYİM VE ÖDÜLLER:

- 2019- devam Uzman Araştırmacı-TÜBİTAK SAGE
- 2010-2018 Araştırma Görevlisi- İTÜ, Enerji Enstitüsü, Enerji Planlaması ve Yönetimi Anabilim Dalı

### DOKTORA TEZİNDEN TÜRETİLEN YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:

- **Ateş, S., Yurtseven, M.B. ve Onaygil, S.** (2019). Design of a Chip on Board (COB) LED Based Industrial Luminaire with Thermal Simulations, *Light & Engineering*, **27(2)**, 78-87.
- **Ateş, S., Yurtseven, M.B. ve Onaygil, S.** (2017). COB LED’li Yüksek Tavan Endüstriyel Armatür Tasarım Analizi, *11. Ulusal Aydınlatma Kongresi*, İstanbul: 21-22 Eylül.
- 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**, 943-965.

- **Mete, S.**, Yurtseven, M.B. ve Onaygil, S. (2015). Investigation of the Effects of Different Passive Cooling Systems on the Performance of High Power LEDs, *Balkan Light*, Atina: 16-19 Eylül.
- **Mete, S. ve Onaygil, S.** (2015). Yüksek Güçlü LED Işık Kaynaklı Aydınlatma Armatürlerinin Soğutmasında Isı Borusu Kullanımı, VIII. *Ulusal Aydınlatma Sempozyumu*, İzmir: 21-22 Eylül.
- Yurtseven, M.B., **Mete, S.** ve Onaygil, S. (2015). Sıcaklık ve Sürüş Akımının LED'lerin Karakteristik Özelliklerine Etkisinin İncelenmesi, *10. Ulusal Aydınlatma Kongresi*, İstanbul:16-18 April.
- Yurtseven, M. B., **Mete, S. ve Onaygil, S.** (2014). The Effect of Temperature on the Color Characteristics of Light Emitting Diodes, *BulLight 2014*, Sozopol: 10-13 Haziran.

#### **DİĞER YAYINLAR, SUNUMLAR VE PATENTLER:**

- Acuner, E., **Ates, S.**, Yurtseven, M. B. ve Onaygil, S. (2016). How Does Energy Efficiency Work? Shopping Malls in Istanbul, *9th International Conference Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings and Smart Communities (IEECB&SC'16)*, Frankfurt: March 2016.
- Yurtseven, M. B., Erkin, E., Acuner, E., **Mete, S.** ve Onaygil, S. (2014). An Experimental Investigation of Energy Saving Potentials for Room Type Variable-speed Air Conditioners in Public Offices: A case study from Istanbul, *Energy and Buildings*, **68**, 165-171.
- Acuner, E., Yurtseven, M. B., **Mete, S.**, Erkin, E. ve Onaygil, S. (2014). Is EER Enough? Investigation of Energy Saving Potential for a Room Type Air Conditioner- a case of an office building in Istanbul, *8th International Conference Improving Energy Efficiency in Commercial Buildings (IEECB'14)*, Frankfurt: 1-3 April.
- **Mete, S.** ve Derbentli, T. (2013). Kömür Yakıtlı, Buhar Çevrimli Bir Bileşik Isı-Güç Sisteminin Termoekonomik İncelemesi, *19. Ulusal Isı Bilimi ve Tekniği Kongresi*, Samsun: 9-12 Eylül.