

**OTOMOTİV AYDINLATMA
SİSTEMLERİNDE KULLANILAN LED'Lİ
ELEKTRONİK DEVRE KARTLARININ
HESAPLAMALI ISIL ANALİZİ**

İbrahim ÖZDİL



T.C.

ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**OTOMOTİV AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN LED'Lİ
ELEKTRONİK DEVRE KARTLARININ HESAPLAMALI ISIL ANALİZİ**

İbrahim ÖZDİL

Yrd. Doç. Dr. Erhan PULAT
(Danışman)

Yüksek Lisans Tezi
MAKİNE MÜHENDİSLİĞİ
ENERJİ ANABİLİM DALI

BURSA - 2015

Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

İbrahim ÖZDİL tarafından hazırlanan “Otomotiv Aydınlatma Sistemlerinde Kullanılan LED’li Elektronik Devre Kartlarının Hesaplamalı Isıl Analizi” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği/oy çokluğu ile Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Makina Mühendisliği / Enerji Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Yrd. Doç. Dr. Erhan PULAT

Başkan :	Prof. Dr. Abdülvahap YİĞİT Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye :	Prof. Dr. Güneş YILMAZ Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza
Üye :	Yrd. Doç. Dr. Erhan PULAT Uludağ Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Makina Mühendisliği Anabilim Dalı	İmza

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Ali Osman DEMİR

Enstitü Müdürü

.. /.. /....

U.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, tez yazım kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmada;

- tez içindeki bütün bilgi ve belgeleri akademik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi,
- görsel, işitsel ve yazılı tüm bilgi ve sonuçları bilimsel ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu,
- başkalarının eserlerinden yararlanılması durumunda ilgili eserlere bilimsel normlara uygun olarak atıfta bulunduğumu,
- atıfta bulunduğum eserlerin tümünü kaynak olarak gösterdiğimi,
- kullanılan verilerde herhangi bir tahrifat yapmadığımı,
- ve bu tezin herhangi bir bölümünü bu üniversite veya başka bir üniversitede başka bir tez çalışması olarak sunmadığımı **beyan ederim.**

.././....

İmza

İbrahim ÖZDİL

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

OTOMOTİV AYDINLATMA SİSTEMLERİNDE KULLANILAN LED'Lİ
ELEKTRONİK DEVRE KARTLARININ HESAPLAMALI ISIL ANALİZİ

İbrahim ÖZDİL

Uludağ Üniversitesi

Fen Bilimleri Enstitüsü

Makina Müh. Anabilim Dalı

Danışman: Yrd. Doç. Dr. Erhan PULAT

Bu tezin kapsamında, günümüzde otomotiv aydınlatma ve genel aydınlatma sistemlerinde yoğun şekilde kullanılan LED'ler ve LED'li elektronik devre kartlarının hesaplamalı termal analizleri ve testleri gerçekleştirilmiştir. Yapılan simülasyon ve testlerin uyumluluğu kontrol edilmiş ve LED'lerin elektronik, termal ve optik davranışları araştırılarak LED'ler için termal yönetimin önemi ortaya konmuştur. Ayrıca LED'ler ve elektronik devre kartlarının soğutulmaları amacıyla sıkça kullanılan kanatçıklar üzerindeki artırılmış yüzey geometrilerinin termal davranışları analitik metodlar ve hesaplamalı termal analizler yardımıyla incelenmiştir.

Anahtar Kelimeler: LED, PCB, Artırılmış yüzeyler, Kanatçık, Kanatçık verimi, Kanatçık etkenliği, Hesaplamalı ısı analiz, Isıl test

2015, xv + 154 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

COMPUTATIONAL THERMAL ANALYSIS OF LED PRINTED CIRCUIT BOARDS FOR AUTOMOTIVE LIGHTING SYSTEMS

İbrahim ÖZDİL

Uludağ University

Graduate School of Natural and Applied Sciences

Department of Mechanical Engineering

Supervisor: Assistant Associate Professor Erhan PULAT

In the content of this thesis study, computational thermal simulations and tests were implemented for LEDs and LED electronic circuits which densely used in automotive lighting and general lighting applications. Compatibility of tests and thermal simulations were examined and electronical, thermal and optical behaviors of LEDs also investigated, therefore the importance of thermal management of LEDs were demonstrated. Furthermore, some heatsink geometries which used in LED cooling applications were investigated with analytical and computational methods in terms of their thermal performance.

Key words: LED, PCB, Extended surfaces, Fin, Fin efficiency, Fin effectiveness, Computational thermal analysis, Thermal test

2015, xv + 154 pages.

ÖNSÖZ VE TEŞEKKÜR

Günümüzde gelişen teknoloji sayesinde yeni ışık kaynakları keşfedilmiş ve bunlar eski teknolojilerin yerini almaya başlamıştır. Bu yeni ve gelişen teknolojilerden bir tanesi de LED aydınlatma teknolojisidir. LED'lerin kullanımı genel aydınlatma ve araç aydınlatması alanında verimlilik ve ömür açısından halojen ampullere göre sahip olduğu büyük avantajlar nedeniyle artık çok daha fazla tercih edilmektedir. Bu nedenle bu tez kapsamında LED'ler ve LED'lerin termal yönetimi ve bu amaçla kullanılan kanatçıkların termal performansları üzerinde çalışılmıştır.

Günümüzde birçok farklı fiziksel problem bilgisayar yazılımları yardımıyla modellenerek çözülmekte ve bu şekilde gerekli prototip sayısı minimum sayıya indirilebilmektedir. Bu tez kapsamında iki ayrı LED'li ürünün termal simülasyonları FloEFD V5 yazılımı yardımıyla gerçekleştirilmiş ve termal performansı detaylı şekilde incelenmiştir. Yapılan simülasyonlar ve testlerin sonuçlarının kıyaslanması yoluyla günümüzde artık endüstride birçok fiziksel problemin çözümünde kullanılan nümerik simülasyon yöntemlerinin LED'lerin termal yönetimi alanında da çok etkin şekilde kullanılabileceğinin gösterilmesi amaçlanmıştır.

Bu tezin hazırlanması aşamasında vermiş olduğu teorik bilgi desteği ve yönlendirmeleri nedeniyle hocam Yrd. Doç. Dr. Erhan PULAT'a teşekkür ederim.

Tezin yapılması aşamasında incelenen PCB'lerin elektronik ile ilgili tüm bilgilerinin sağlanması konusunda çok yardımcı olan elektronik mühendisi ve değerli arkadaşım Mesut RÜSTEMOĞLU'na çok teşekkür ederim.

Tez kapsamında kullanılan ve incelenen tüm ürünlere ait materyalleri temin eden FARBA A.Ş.'ye teşekkürlerimi bir borç bilirim.

Son olarak, bu tezin hazırlanması sırasında bana maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan değerli Annem, Babam ve Eşim'e her şey için çok teşekkür ederim.

İbrahim ÖZDİL

..../.../....

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
ÖZET	i
ABSTRACT.....	ii
ÖNSÖZ ve TEŞEKKÜR	iii
İÇİNDEKİLER.....	iv
SİMGE ve KISALTMALAR DİZİNİ	vii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ÇİZELGELER DİZİNİ.....	xv
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
3. KURAMSAL TEMELLER.....	13
3.1. LED'ler ve Çalışma Mantığı.....	13
3.2. LED'lerin Elektriksel Davranışı.....	17
3.3. LED'lerin Termal Davranışı.....	21
3.4. LED'lerin Isı Transfer Mekanizması ve Diğer Işık Kaynakları ile Kıyaslanması	24
3.5. LED'lerin Verimliliği ve Diğer Işık Kaynakları ile Kıyaslanması	27
3.6. LED'lerin Soğutulması ve Kanatçıklar.....	29
3.7. LED'lerin Ömrü ve Işık Bozulması Davranışı.....	31
3.8. LED'lerin Otomotiv Endüstrisinde Kullanımı.....	33
3.8.1. Stil esnekliği açısından kullanım	33
3.8.2. Boyutsal esneklik açıdan kullanım avantajı	35
3.8.3. Enerji verimliliği	35
3.8.4. Güvenlik	36
3.9. LED'lerin Avantaj ve Dezavantajları.....	36
3.9.1. LED'lerin Avantajları.....	36
3.9.2. LED'lerin Dezavantajları.....	38
4. MATERYAL VE YÖNTEM	40
4.1. Tezin Amacı.....	40
4.2. Tezin Önemi.....	40
4.3. Materyal.....	44
4.4. Yöntem.....	47
4.5. Ağ Yapısından Bağımsız Çözüm Elde Etmeyi Sağlayan Hücre Boyutlarının Tespit Edilmesi Çalışması.....	50
4.6. Artırılmış Yüzeyler Arası Optimum Açıklık Değerinin Hesaplanması.....	54
5. BULGULAR VE TARTIŞMA.....	70
5.1. Kanatçık Tiplerinin Isı Transfer Performanslarının Artırılmış Yüzeyler Arası Mesafe Değerlerine Göre Kıyaslanması ve İncelenmesi.....	70
5.1.1. Yapılan analizlerde uygulanan sınır şartlarının açıklanması.....	70
5.1.2. Karşılaştırılan kanatçık artırılmış yüzey geometrilerinin tanıtılması.....	71
5.1.2.1. Dikdörtgen kesitli sıralı paralel artırılmış yüzey yapısı.....	71
5.1.2.2. Dairesel kesitli pin (pin fin) artırılmış yüzey yapısı.....	73 75
5.1.2.3. Kare kesitli pin (pin fin) artırılmış yüzey yapısı.....	77
5.1.2.4. Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzey yapısı.....	79

5.1.3. Yapılan Analizlerde Bulunan Sonuçların Kanatçıklar Üzerindeki Artırılmış Yüzey Tiplerine Göre Kıyaslanması ve Performans Analizi.....	80
5.1.3.1. Isı transferinin yapıldığı toplam artırılmış yüzey alanı.....	81
5.1.3.2. Artırılmış yüzeylerde hesaplanan ortalama ısı transfer katsayısı.....	83
5.1.3.3. Artırılmış yüzeylerden ortama net olarak aktarılan ışıma ısı akısı.....	84
5.1.3.4. Artırılmış yüzeyler üzerinden doğal taşınım yoluyla transfer edilen toplam termal güç.....	86
5.1.3.5. Kanatçıklar üzerindeki artırılmış yüzeylerden ışıma yoluyla ortama transfer edilen net termal güç.....	87
5.1.4. Artırılmış Yüzey Verimliliği Değerlerinin Artırılmış Yüzey Tiplerine Göre Hesaplanması ve Kıyaslanması.....	96
5.1.5. Artırılmış Yüzey Etkenliği Değerlerinin Artırılmış Yüzey Tiplerine Göre Hesaplanması ve Kıyaslanması.....	98
5.2. Uygulama Örneği 1: LED'li DRL Termal Simülasyonu ve Test Sonuçları.....	99
5.2.1. Termal simülasyon için yapılan kabuller ve uygulanan sınır koşulları.....	100
5.2.2. Kanatçık ve MCPCB'nin tanıtılması.....	101
5.2.2.1. Kanatçığa ait bilgiler.....	101
5.2.2.2. MCPCB'ye ait bilgiler.....	103
5.2.2.3. PCB üzerindeki bakır tabakaya ait bilgiler.....	107
5.2.3. Simülasyon inputları.....	108
5.2.3.1. Sürme akımı ve ortam sıcaklığı.....	110
5.2.3.2. Çip güç değerlerinin hesaplanması.....	113
5.2.3.3. Yüzey neşretme katsayısı (emissivity) değerleri.....	115
5.2.3.4. Sonlu hacimler ağı görünümü.....	118
5.2.4. Simülasyon sonuçları.....	122
5.2.4.1. MCPCB üzerindeki sıcaklık dağılımı.....	125
5.2.4.2. MCPCB ve kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı.....	126
5.2.4.3. Doğal taşınım yüzey ısı.....	128

akısı.....					142
5.2.4.4.	Net	ışınım	yüzey	ısı	143
akısı.....					147
5.2.5. Test sonuçları.....					150
5.2.5.1.	Deney	düzeneği		ve	153
şeması.....					154
5.2.5.2.		Sıcaklık		ölçüm	
lokasyonları.....					
5.2.5.3.	Test	ve	simülasyon	sonuçlarının	
kıyaslanması.....					
5.3. Uygulama Örneği 2: DRL Ürün Termal Simülasyon Çalışması.....					
5.3.1. Termal kamera görüntüsü ve simülasyon sonuçlarının sıcaklık dağılımı olarak kıyaslanması.....					
5.3.2. Ölçüm noktalarının termal kamera yoluyla tespit edilmesi ve termokupl konumları.....					
5.3.3. PCB komponentleri tarafından tüketilen elektriksel güç değerleri.....					
5.3.4. LED'ler tarafından üretilen termal güç değerleri.....					
5.3.5. PCB komponentleri tarafından tüketilen elektriksel güç ve üretilen termal güç değerleri.....					
5.3.6. Transistör modellemesi.....					
5.3.7. Ölçüm koşullarının tanımlanması.....					
5.3.8. Simülasyonda yapılan kabuller ve ihmaller.....					
5.3.9. DRL ürünün tanıtılması.....					
5.3.10. DRL PCB'si ve komponentler.....					
5.3.11. PCB üzerindeki bakır tabaka kalınlıkları ve vialar.....					
5.3.12. Ürünü oluşturan alt parçalar ve malzeme özellikleri.....					
5.3.13. Test ve simülasyon sonuçlarının kıyaslanması.....					
5.3.14. Simülasyon sonuçlarının incelenmesi.....					
6. SONUÇ.....					
KAYNAKLAR.....					
ÖZGEÇMİŞ.....					
Tez Çoğaltma ve Elektronik Yayımlama İzin Formu.....					

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
C_p	Akışkanın özgül ısısı (J/KgK)
μ	Akışkanın dinamik vizkozitesi (Ns/m^2)
ν	Akışkanın kinematik vizkozitesi (m^2/s)
ρ	Akışkanının yoğunluğu (kg/m^3)
atm	Atmosfer basıncı

Q	Bir kesit üzerinden birim zamanda iletilen ısı enerjisi miktarı (Fourier kanunu) (W)
A_k	Bir artırılmış yüzey elemanına ait toplam yüzey alanı (artırılmış yüzey elemanının kesiti sabittir) (m^2)
T_g	Camsı geçiş sıcaklığı (FR4 malzemesine ait)
M_c	Düzeltilmiş artırılmış yüzey elemanı uzunluğu (artırılmış yüzey verimi hesabı) (m)
D	Dairesel kesitli artırılmış yüzey elemanının çapı (artırılmış yüzey elemanı kesiti sabittir) (m)
P_q	Elektronik devre benzetiminde akıma karşılık gelen ve iki yüzey arasında aktarılan termal güç (W)
T_f	Film sıcaklığı (K)
g	Gram
$R_{\text{heatsink-ambient}}$	Kanatçık ile ortam akışkanı arasındaki termal direnç ($^{\circ}C/W$)
L	Kanatçık üzerindeki artırılmış yüzeylerin yüksekliği (artırılmış yüzeyler arası optimum mesafe hesaplamalarında kullanılmıştır) (m)
H	Kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanlarının uzunluğu (m)
F	Kanatçığın genişliği (m)
T_s	Kanatçık artırılmış yüzey sıcaklığı (sabit yüzey sıcaklığı) ($^{\circ}C$)
Q_f	Kanatçık üzerindeki artırılmış yüzeyler üzerinden doğal taşınım yoluyla transfer edilen termal güç (W)
T_b	Kanatçık taban sıcaklığı ($^{\circ}C$)
k	Isı iletim katsayısı (W/mK)
b	Artırılmış yüzey elemanlarının yüzeyleri arasındaki mesafe (m)
b_{opt}	Artırılmış yüzeyler arası optimum mesafe (m)
t	Artırılmış yüzey elemanının kalınlığı (kanatçık kesiti sabit) (m)
N_f	Artırılmış yüzey elemanı sayısı
h_k	Artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısı değeri (W/m^2K)
h_b	Artırılmış yüzeylerin olmadığı düşünüldüğü durumda farazi artırılmış yüzey dip noktasındaki kesit alanı üzerinde hesaplanan ortalama ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
p	Artırılmış yüzey elemanı kesitinin çevre uzunluğu (kesit sabit) (m)
M	Artırılmış yüzey elemanı uzunluğu (verim hesabı) (m)
μ	Artırılmış yüzey elemanı verimi
$\epsilon_{\text{artırılmış yüzey}}$	Artırılmış yüzey elemanı etkenliği
A_b	Artırılmış yüzey elemanı taban kesit alanı (m^2)
R_s	LED iç direnci (Ohm)
V_0	LED üzerinde akımın oluşmaya başlaması için geçilmesi gereken potansiyel fark eşik değeri (V)
I	LED üzerinden akan akım (mA)
V	LED üzerindeki potansiyel fark (V)
dV	LED üzerindeki potansiyel fark değişimi (V)
dI	LED üzerinden geçen akım değişimi (mA)
G	LED sıcaklık katsayısı (temperature coefficient) ($V/^{\circ}C$)
R_{j-c}	LED çipi ile LED lehim ayağı arasındaki termal direnç ($^{\circ}C/W$)
R_{c-b}	LED lehim ayağı ile PCB arasındaki termal direnç ($^{\circ}C/W$)
ΔT_j	LED çip sıcaklığındaki değişim miktarı

P_H	LED çipi tarafından üretilen termal güç (heat generation rate) (W)
Φ_e	LED çipi tarafından üretilen toplam ışık gücü (optical power rate - radiant Flux)
V_F	LED çalışma voltajı (V)
S_{VF}	LED voltaj duyarlılık katsayısı (LED voltage sensitivity)
S_{ϕ_e}	LED ışık çıkışı duyarlılık katsayısı (LED radiant flux sensitivity)
T_0	LED çipi referans sıcaklığı (junction reference temperature) ($^{\circ}C$)
T_{th}	PCB üzerinde oluşan LED dip noktasındaki sıcaklık ($^{\circ}C$)
R_{J-Th}	LED dip noktası ve LED çipi arasındaki termal direnç değeri ($^{\circ}C/W$)
mm	Milimetre
Ra	Ortalama Rayleigh sayısı
Nu	Ortalama Nusselt sayısı
Gr	Ortalama Grashof sayısı
$T_a, T_{ambient}$	Ortamda bulunan akışkanın sıcaklığı, ortam sıcaklığı ($^{\circ}C$)
h	Ortalama ısı transfer katsayısı (W/m^2K)
R_{b-tim}	PCB ile termal arayüz malzemesi arasındaki termal direnç ($^{\circ}C/W$)
Pr	Prandtl sayısı
V_{F0}	Sabit akım ve referans sıcaklık değerinde ölçülmüş ve FloEFD kütüphanesine işlenmiş olan LED üzerindeki voltaj değeri (referans sıcaklığın üstündeki ve altındaki LED voltaj değerleri bu değer yardımıyla hesaplanır) (V)
I_F	Sabit LED çalışma akımı (mA)
ΔT	Sıcaklık farkı
T_1-T_2	Termal gücün iletiildiği kesitin iki tarafındaki sıcaklık farkı (Fourier kanunu) ($^{\circ}C$)
A_c	Termal gücün iletiildiği doğrultuya dik düzlemdeki kesit yüzey alanı (Fourier kanunu), artırılmış yüzeyin kanatçık tabanıyla birleştiği düzlemdeki kesit alanı (kesit sabit) (m^2)
l	Termal gücün iletiildiği kesitin iki tarafındaki yüzeyler arasındaki uzaklık (Fourier kanunu) (m)
$R_{tim-heatsink}$	Termal arayüz malzemesi ile kanatçık arasındaki ısı direnç ($^{\circ}C/W$)
$\Phi(T_1)$	T_1 sıcaklığındaki LED çipinin ürettiği ışık akısı
$\lambda_d(T_1)$	T_1 sıcaklığındaki LED çipinin yaydığı baskın dalga boyu (nm)
$\Phi(T_2)$	T_2 sıcaklığındaki LED çipinin ürettiği ışık akısı
$\lambda_d(T_2)$	T_2 sıcaklığındaki LED çipinin yaydığı baskın dalga boyu (nm)
$T_j, T_{junction}$	Yarı iletken tabanlı elektronik komponentlerin çip sıcaklığı ($^{\circ}C$)
g_c	Yerçekim ivmesi (m/s^2)
β	$1/T_f$ (1/K)
Kısaltmalar	Açıklama
CHMSL	Center High Mount Stop Lamp (Üçüncü fren lambası)
DRL	Daytime Running Lamp (Gündüz yanan lamba)
DOE	Design of Experiment
DBC	Direct Bond Copper
FR4	Flame Retardant 4
HID	High Intensity Discharge
LED	Light Emitting Diode (Işık yayan diyot)
MCPCB	Metal Core Printed Circuit Board

ŞEKİLLER DİZİNİ

	Sayfa
Şekil 1.1. LED çipini oluşturan N-Doped ve P-Doped yarı iletken tabakalar.....	13
Şekil 1.2. LED çipi üzerinde ışık üretme mekanizmasının gösterilmesi.....	14
Şekil 1.3. LED çipini oluşturan katmanların görünümü.....	15
Şekil 1.4. Çipte ışık oluşumu ve ısıya dönüşen kafes	16

Şekil 1.5.	titreşimleri.....	17
Şekil 1.6.	LED'e uygulanan akım ve LED'in ürettiği ışık miktarı.....	17
Şekil 1.7.	LED'in basit elektriksel modelinin	18
Şekil 1.8.	gösterilmesi.....	19
Şekil 1.9.	LED'lerin akım ve voltaj davranışının görünümü.....	21
Şekil 1.10.	Forward Voltage ve Reverse Voltage davranışının görünümü.....	22
Şekil 1.11.	Al-In-Ga-P ve In-Ga-N tabanlı LED'lerin karakteristiklerinin kıyaslanması.....	23
Şekil 1.12.	Al-In-Ga-P tabanlı LED'lerin artan sıcaklık etkisi ile ürettikleri göreceli ışık miktarının düşmesi.....	24
Şekil 1.13.	düşmesi.....	25
Şekil 1.14.	In-Ga-N tabanlı LED'lerin artan sıcaklık etkisi ile ürettikleri göreceli ışık miktarının düşmesi.....	26
Şekil 1.15.	düşmesi.....	27
Şekil 1.16.	Farklı ışık kaynaklarının ısı transfer mekanizmalarının kıyaslanması.....	28
Şekil 1.17.	Fourier kanununa göre ısı iletimi.....	29
Şekil 1.18.	LED'lerin elektriksel direnç şeklinde gösterimi.....	30
Şekil 1.19.	LED'lerin çipleri ile lehim ayakları arasındaki termal direnç değerleri ve LED'lerin bu açıdan gösterdiği	30
Şekil 1.20.	gelişim.....	
Şekil 1.21.	Işık etkenliğinin yıllara göre farklı tiplerdeki ışık kaynakları için gelişimi ve değişimi.....	31
Şekil 1.22.	Işık etkenliğinin kanatçık hacmi üzerindeki etkisi.....	32
Şekil 1.23.	Kanatçıkların görünümü.....	33
Şekil 1.24.	Otomotiv endüstrisinde kullanılan LED'li elektronik devre kartları	34
Şekil 1.25.	ve bunları soğutma görevi üstlenen kanatçıkların	34
Şekil 1.26.	görünümü.....	
Şekil 1.27.	Fan ve kanatçıklar yardımıyla soğutulan bir LED'li far mekanizmasının görünümü.....	35
Şekil 2.1.	İlk geliştirilen LED'ler, akkor ampuller ve günümüzdeki LED'lerin kullanım sırasında gösterdikleri ışık	39
Şekil 2.2.	azalması.....	40
Şekil 2.3.	Luxeon K2 LED'ine ait akıma göre farklılık gösteren çip sıcaklığı-ömür grafiği.....	41
Şekil 2.4.	BMW araçlarına ait LED'li arka stop ürünlerin görünümü.....	42
Şekil 2.5.	AUDI R8 aracına ait LED içeren bir far görünümü.....	43
Şekil 2.6.	AUDI R8 aracına ait LED'li arka stop ürünün görünümü.....	44
Şekil 2.7.	LED ve ampul ile geliştirilmiş CHMSL ürünlerin boyutsal olarak kıyaslanması.....	45
Şekil 2.8.	Bir LED'li farda lens üzerinde oluşabilecek olan buz tabakası ve buğunun ortadan kaldırılması için izlenen yöntem.....	46
Şekil 2.9.	Bir LED'in kesit görünümü.....	47
	AUDI marka otomobil farındaki DRL ünitesinin görünümü.....	49

Şekil 2.10.	Artan ortam sıcaklığının LED ışık akısı üzerindeki izafi etkisi.....	51
Şekil 2.11.	Camsı geçiş sıcaklığı ve termal genleşme katsayısının sıcaklıkla değişim grafiği.....	53
Şekil 2.12.	Graphtec GL820 Midi Logger görünümü.....	54
Şekil 2.13.	K tipi termokupl örneği.....	57
Şekil 2.14.	Örnek bir sonlu hacimler ağ yapısının görünümü..... Termokupllar ile üzerindeki sıcaklık değerleri ölçülen bir PCB ve LED sistemi.....	58
Şekil 2.15.	Ortamdaki havaya doğal taşınım yoluyla transfer edilen toplam ısı gücün tespit edildiği ve bu değer farklı ağ yapısı geometrileri için kıyaslandığı seçilmiş yüzeyler.....	61
Şekil 2.16.	Seçilmiş yüzeylerden ortamdaki havaya doğal taşınım yoluyla transfer edilen toplam ısı gücün farklı mesh derecelerine göre değişimi..... Dik yerleştirilmiş doğal taşınım kanatçığı.....	62
Şekil 2.17.	Kanatçık ve artırılmış yüzeylere ait teknik resim.....	63
Şekil 2.18.	Artırılmış yüzeyler üzerine uygulanan sabit 80°C yüzey sıcaklığı sınır koşulu ve FloEFD simülasyonunda kullanılan sonlu hacimler ağı kesit görüntüsü.....	63
Şekil 2.19.	Aynı koşullarda simüle edilen 8mm ve 4mm artırılmış yüzey elemanları arası mesafe değerlerine sahip iki kanatçığın kesit sıcaklık dağılımı görüntüsü.....	66
Şekil 2.20.	Artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısının artırılmış yüzeyler arası mesafenin artışıyla değişimi (Elenbaas Formülasyonu).....	67
Şekil 2.21.	Artırılmış yüzeyler üzerinde hesaplanan Nusselt sayısının artırılmış yüzeyler arası mesafe değerinin artmasıyla değişimi (Elenbaas Formülasyonu).....	68
Şekil 2.22.	Artırılmış yüzeyler üzerindeki toplam ısı transfer gücünün artırılmış yüzeyler arasındaki mesafenin artışıyla değişimi (Elenbaas Formülasyonu).....	68
Şekil 2.23.	Artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısının artırılmış yüzeyler arası mesafenin artışıyla değişimi (Bar Kohen – Rohsenow Formülasyonu).....	69
Şekil 3.1.	Artırılmış yüzeyler üzerinde hesaplanan Nusselt sayısının artırılmış yüzeyler arası mesafenin artmasıyla değişimi (Bar Kohen – Rohsenow Formülasyonu).....	70
Şekil 3.2.	Artırılmış yüzeyler üzerindeki toplam ısı transfer gücünün artırılmış yüzeyler arasındaki mesafenin artışıyla değişimi (Bar Kohen – Rohsenow Formülasyonu).....	72
Şekil 3.3.	Artırılmış yüzeyler üzerindeki toplam ısı transfer gücünün artırılmış yüzeyler arasındaki mesafenin artışıyla değişimi (Bar Kohen – Rohsenow Formülasyonu).....	72
Şekil 3.4.	Artırılmış yüzeyler üzerindeki toplam ısı transfer gücünün artırılmış yüzeyler arasındaki mesafenin artışıyla değişimi (Bar Kohen – Rohsenow Formülasyonu).....	72

	Formülasyonu).....	73
Şekil 3.5.	Üç farklı yöntem ile hesaplanan artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısının artırılmış yüzeyler arası mesafenin artışıyla değişimi.....	74
Şekil 3.6.	Üç farklı yöntem ile hesaplanan artırılmış yüzeyler üzerindeki Nusselt sayısının artırılmış yüzeyler arası mesafenin artmasıyla değişimi.....	74
Şekil 3.7.	Üç farklı yöntem ile hesaplanan artırılmış yüzeyler üzerindeki toplam ısı transfer gücünün artırılmış yüzeyler arasındaki mesafenin artışıyla değişimi.....	75
Şekil 3.8.	Sabit sıcaklık sınır koşulunun uygulandığı taban yüzeyinin görünümü.....	76
Şekil 3.9.	Dikdörtgen kesitli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahipkanatçığın geometrik ölçüleri (üst görünüş).....	77
Şekil 3.10.	Dikdörtgen kesitli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahipkanatçığın geometrik ölçüleri ve yerçekim ivmesinin yönü (ön görünüş).....	78
Şekil 3.11.	Dikdörtgen kesitli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahipkanatçık geometrisi üzerinde sonuçların okunduğu ve diğer kanatçık geometrileriyle kıyaslamamanın yapıldığı seçilmiş yüzeyler.....	79
Şekil 3.12.	Dairesel kesitli şaşırtmalı (staggered) pin artırılmış yüzey yapılı kanatçığın ölçüleri (ön görünüş) ve yerçekim ivmesinin yönü.....	80
Şekil 3.13.	Dairesel kesitli şaşırtmalı (staggered) pin artırılmış yüzey yapılı kanatçığın ölçüleri (üst görünüş).....	81
Şekil 3.14.	Dairesel kesitli şaşırtmalı (staggered) pin artırılmış yüzey yapılı kanatçığın üzerinde sonuçların okunduğu ve diğer kanatçık geometrileriyle kıyaslamamanın yapıldığı seçilmiş yüzeyler.....	83
Şekil 3.15.	Kare kesitli şaşırtmalı (staggered) pin artırılmış yüzey yapılı kanatçığın ölçüleri (ön görünüş) ve yerçekim ivmesinin yönü.....	85
Şekil 3.16.	Kare kesitli şaşırtmalı (staggered) pin artırılmış yüzey yapılı kanatçığın ölçüleri (üst görünüş).....	86
Şekil 3.17.	Kare kesitli şaşırtmalı (staggered) pin artırılmış yüzey yapılı kanatçığın üzerinde sonuçların okunduğu ve diğer kanatçık geometrileriyle kıyaslamamanın yapıldığı seçilmiş yüzeyler.....	88
Şekil 3.18.	Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahipkanatçığın geometrik ölçüleri (üst görünüş).....	90
Şekil 3.19.	Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahipkanatçığın geometrik ölçüleri (üst görünüş).....	
Şekil 3.20.	Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahipkanatçığın geometrik ölçüleri (üst görünüş).....	
Şekil 3.21.	Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahipkanatçığın geometrik ölçüleri (üst görünüş).....	

	görünüş).....	92
Şekil 3.22.	Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahip kanatçık üzerinde sonuçların okunduğu ve diğer kanatçık geometrileriyle kıyaslamaların yapıldığı yüzeyler.....	94
Şekil 3.23.	Kanatçıklar üzerindeki toplam artırılmış yüzey alanının, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve tipine göre değişim grafiği.....	96
Şekil 3.24.	Kanatçıklar üzerinde bulunan artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısının, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve tipine göre değişim grafiği.....	97
Şekil 3.25.	Artırılmış yüzeylerden ışınma yoluyla transfer edilen ortalama net ışınma akısının, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve kanatçık tipine göre değişim grafiği.....	98
Şekil 3.26.	Artırılmış yüzeylerden doğal taşınım yoluyla transfer edilen termal gücünün, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve tipine göre değişim grafiği.....	100
Şekil 3.27.	Artırılmış yüzeylerden ışınma yoluyla ortama transfer edilen net ışınma termal gücünün, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki mesafe ve tipine göre değişim grafiği.....	101
Şekil 3.28.	Dikdörtgen, üçgen ve parabolik kesitli artırılmış yüzeylerin verimlerine ait diyagram.....	102
Şekil 3.29.	Artırılmış yüzeylere ait ortalama veriminin, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve tipine göre değişim grafiği.....	104
Şekil 3.30.	Artırılmış yüzeylere ait ortalama veriminin, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve tipine göre değişim grafiği.....	106
Şekil 3.31.	Taban sıcaklığı 100°C olan, merkezleri arasında 12 mm boşluk bulduran dairesel kesitli pin yapılı artırılmış yüzeylerden oluşan kanatçığa ait ısı iletim katsayısının değiştirilmesi durumunda elde edilen artırılmış yüzey elemanı veriminin ısı iletim katsayısına göre değişimi grafiği.....	107
Şekil 3.32.	Artırılmış yüzeyleri olmayarak kanatçığın simülasyon sınır koşullarının gösterilmesi ve üst yüzeyi üzerindeki ısı transfer katsayısı dağılımı.....	109
Şekil 3.33.	Artırılmış yüzey elemanlarına ait ortalama etkenliğinin, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve tipine göre değişim grafiği.....	110
Şekil 3.34.	Bir otobüse ait farın DRL fonksiyonuna ait PCB ve soğutucu.....	111
Şekil 3.35.	Simülasyonda kullanılan LED'lere ait geometrinin görünümü.....	111
Şekil 3.36.	MCPCB, alüminyum alaşımı soğutucu ve kullanılan LED'in görünümü.....	111
Şekil 3.37.	Simülasyon modeli ve modelin etrafındaki hesaplama domaininin görünümü.....	113
Şekil 3.38.	Simülasyonda LED'lere uygulanan akım değerleri ve simülasyon	114
Şekil 3.39.		114
Şekil 3.40.		115
Şekil 3.41.		116
Şekil 3.42.		117
Şekil 3.43.		117
Şekil 3.44.		118

Şekil 3.45.	sonucunda ortaya çıkan LED çip sıcaklıklarının görünümü.....	119	
Şekil 3.46.	FloEFD V5 LED modülü içerisinde mevcut olan sıcaklığa bağlı	119	
Şekil 3.47.	elektriksel ve optik davranış parametrelerinin akıma göre değişim grafiklerinin görünümü.....	120	
Şekil 3.48.	FloEFD V5 LED modülü içerisinde mevcut olan sıcaklığa bağlı	121	
Şekil 3.49.	elektriksel ve optik davranış parametrelerinin akıma karşılık gelen	121	
Şekil 3.50.	değerleri.....	123	
Şekil 3.51.	Simülasyon sonucunda hesaplanan LED çipi sıcaklığı, LED'in	124	
Şekil 3.52.	ürettiği termal güç ve ışık akısı.....	125	
Şekil 3.53.	Simülasyonda yüzey emissivite değerlerinin tanımlandığı	125	
Şekil 3.54.	yüzeylerin görünümü.....	126	
Şekil 3.55.	Bir LED çipinin merkezine yerleştirilmiş olan kesit düzlemi	126	
Şekil 3.56.	üzerindeki sonlu hacimler ağ yapısının görünümü.....	127	
Şekil 3.57.	Hesaplama domaini üzerinden alınmış mesh yapısı görüntüsü.....	127	
Şekil 3.58.	MCPCB üzerinde hesaplanmış olan sıcaklık dağılımı görünümü... LED çip sıcaklığı değeri ve MCPCB üzerindeki LED dip sıcaklığı	130	
Şekil 3.59.	değerlerinin görünümü.....	131	
Şekil 3.60.	Test sırasında termokupullar ile MCPCB üzerinde sıcaklık ölçümü	133	
Şekil 3.61.	yapılan noktalarda simülasyon sonucunda hesaplanan sıcaklık	134	
Şekil 3.62.	değerlerinin görünümü.....	134	
Şekil 3.63.	Test sırasında termokupullar ile kanatçık üzerinde sıcaklık ölçümü	136	
Şekil 3.64.	yapılan noktalarda simülasyon sonucunda hesaplanan sıcaklık	136	
Şekil 3.65.	değerlerinin görünümü.....	137	
Şekil 3.66.	Simülasyon sonucunda hesaplanan LED çip sıcaklığı, LED'lerin	137	
Şekil 3.67.	ürettiği ısı güç ve ışık miktarı değerleri.....	138	
Şekil 3.68.	Simülasyon sonucunda hesaplanan kanatçık yüzeylerindeki doğal	139	
Şekil 3.69.	taşınım ısı akısı değerleri.....	141	
Şekil 3.70.	Simülasyon sonucunda hesaplanan kanatçık yüzeylerindeki net	141	
Şekil 3.71.	ışınım	ısı	akısı
Şekil 3.72.	değerleri.....	141	
Şekil 3.73.	Sabit voltaj sağlayabilen GwINSTEK SPS-606 güç kaynağı ve	143	
Şekil 3.74.	sıcaklık ölçümü için kullanılan data toplama cihazı Graphtec	143	
Şekil 3.75.	GL820 Midi Data Logger ürünlerin görünümü.....	144	
Şekil 3.76.	Deney	düzeneğinin	144
Şekil 3.77.	görünümü.....	145	
Şekil 3.78.	Deney düzeneğinde kullanılan cihazlar ve teknik özellikleri.....	146	
Şekil 3.79.	Deney	düzeneğinin	146
Şekil 3.80.	görünümü.....	146	
Şekil 3.81.	Deney	şemasının	146
Şekil 3.82.	görünümü.....	146	
Şekil 3.83.	LED'lere sabit akım sağlayabilmek için kullanılan BUCKPUCK	146	
Şekil 3.84.	LED	sürücü	cihazın
Şekil 3.85.	görünümü.....	146	
Şekil 3.86.	MCPCB üzerinde sıcaklığı ölçülen noktaların	146	
Şekil 3.87.	görünümü.....	146	
Şekil 3.88.	Kanatçık üzerinde sıcaklığı ölçülen noktaların	146	
Şekil 3.89.	görünümü.....	146	
Şekil 3.90.	Ürüne ait PCB'nin dijital görüntüsü.....	146	

Ürüne ait termal simülasyon ve termal kamera görünümü.....	
DRL ürüne ait PCB'nin termal kamera görüntüsü ve PCB üzerine yerleştirilmiş olan termokuplların görünümü.....	
DRL ürüne ait PCB üzerindeki termokupl ölçüm noktalarının ve ölçüm numaralarının gösterilmesi.....	
DRL ürüne ait PCB'nin ALTIUM yazılımında tasarlanmış olan elektronik devre şeması ve güç değerlerinin görünümü.....	
PCB üzerindeki LED'ler ve ürettikleri yaklaşık termal güç miktarlarının farklı ortam sıcaklığı durumlarına göre gösterilmesi..	
PCB üzerindeki komponentler ve ürettikleri termal güç miktarları..	
Simülasyon çalışmasında kullanılan transistörün yapısı.....	
DRL ürünün fırın içine yerleştirilmiş konumdaki görünümü.....	
DRL ürünün test edildiği sabit sıcaklık ortam sınır koşulunu sağlayan fırın ve test düzeneğinin görünümü.....	
DRL ürünün önden görünüşü.....	
DRL ürünün patlatılmış görüntüsü.....	
PCB üzerindeki komponentlerin görünümü.....	
PCB üzerindeki bakır plakaların görünümü.....	
FR4 PCB üzerindeki via deliklerinin görünümü.....	
Stainless Steel 321 malzemeye ait sıcaklığa bağımlı termofiziksel bilgilerin görünümü.....	
Bakır malzemeye ait sıcaklığa bağımlı termofiziksel bilgilerin görünümü.....	
80°C ortam sıcaklığı sınır şartı ile yapılan simülasyon sonucunda PCB üzerinde hesaplanan sıcaklık değerleri.....	
80°C ortam sıcaklığı sınır şartı ile yapılan simülasyon sonucunda PCB üzerinde hesaplanan sıcaklık değerleri.....	
Alüminyum alaşımı gövde üzerindeki sıcaklık dağılımı görünümü.	
PC lens üzerindeki sıcaklık dağılımı.....	

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge1.1. Al-In-Ga-P ve In-Ga-N tabanlı LED'lerin karakteristiklerinin kıyaslanması.....	20
Çizelge 2.1. Seçilmiş yüzeylerden transfer edilen toplam ısı güç ve ortalama ısı akısının 9,6 mm hücre boyutu ile elde edilmiş simülasyon sonuçları baz alınarak kıyaslandığı çizelge.....	52
Çizelge 3.1. Taban sıcaklığı 100°C olan, merkezleri arasında 12 mm boşluk bulunduran dairesel kesitli pin yapıları artırılmış yüzeylerden oluşan kanatçığa ait ısı iletim katsayısının değiştirilmesi durumunda elde edilen m , $m \cdot M_c$ ve artırılmış yüzey alanı verimi (η) değerlerinin değişim çizelgesi.....	91

Çizelge 3.2.	MCPCB kenarındaki kesim yüzeyleri ve alüminyum alaşımı kanatçığa ait yüzeyler için uygulanan emissivite değerlerine ait çizelge.....	108
	Philips Luxeon Rebel DS58 LED ürüne ait teknik bilgilerin görünümü.....	112
Çizelge 3.3.	Hesaplanan ve ölçülen sıcaklıklar arasındaki hata oranlarının görünümü.....	122
Çizelge 3.4.	PCB üzerindeki LED'lerin dip noktalarındaki sıcaklık değerlerine karşılık gelen voltaj, elektriksel güç ve ürettikleri termal güç miktarlarının gösterimi.....	128
Çizelge 3.5.	PCB üzerindeki LED'lerin dip noktalarında ölçülen sıcaklık değerlerine karşılık gelen voltaj, elektriksel güç ve ürettikleri termal güç miktarları çizelgesi.....	129
	30°C, 50°C ve 80°C ortam sıcaklıklarında yapılan testler sonucunda ürün içerisindeki LED dip noktalarında ölçülen sıcaklıklar.....	130
Çizelge 3.6.	DRL üründe kullanılan alt parçalar ve malzemeler listesi.....	140
	DRL üründe kullanılan alt parça malzemelerinin ısı iletim katsayısı ve özgül ısı değerleri listesi.....	140
Çizelge 3.7.	Yapılan testler ve simülasyonlar sonucunda elde edilen sonuçların birbiriyle kıyaslanması durumunda ortaya çıkan hata oranları.....	142
Çizelge 3.8.		
Çizelge 3.9.		
Çizelge 3.10.		

1.GİRİŞ

Bu tezin araştırma konusu, otomotiv aydınlatma endüstrisinde kullanılan LED’li (Light Emitting Diode – Işık Yayan Diyot) ürünler ve bunların kullanıldığı ürünlerin termal açıdan yakından incelenmesidir. Bölüm 2’deki kaynak araştırması kısmında LED’lerin ve LED’li ürünlerin termal davranışları, LED’leri soğutmaya yönelik farklı yöntemler, LED’lerin diğer ışık kaynaklarıyla kıyaslanması vb. konular hakkında birçok bilimsel makaleden bilgiler özetlenmiştir. Söz konusu makaleler yardımıyla bir LED’in genel manada termal davranışı ve LED’leri soğutma yöntemleri hakkında genel bilgiler elde edilebilir. Bölüm 3’te ise LED’lerin çalışma mantığı, elektriksel ve termal davranışları hakkında detaylı bilgiler verilmiş ve ısı üretim ve ısı yayma mekanizmaları detaylı şekilde açıklanmıştır. LED’lerin verimi, LED’ler için sıcaklığın önemi açıklanmış ve LED’lerin sıcaklığını kontrol etmeye yönelik olarak kullanılan bazı kanatçıklardan bahsedilmiştir. Ayrıca bu bölümde LED’lerin otomotiv endüstrisindeki kullanım alanlarından ve diğer ışık kaynaklarına göre sağladığı avantajlardan bahsedilmiştir. Bölüm sonunda ise LED’lerin genel avantajları ve dezavantajları listelenmiştir. Bölüm 4’te ise bu tezin gerçekleştirilmesi sırasında takip edilecek genel yöntem ve kullanılacak ekipmanlar hakkında genel bilgiler verilmiştir. Bölüm 4.6’da dikdörtgen kesitli paralel sıralı artırılmış yüzey elemanlarına sahip kanatçıkların optimum artırılmış yüzeyler arası mesafe değerlerine yönelik hesaplamalar hakkında bilgi verilmiş ve FloEFD yazılımı yardımıyla yapılan simülasyonlar ile analitik hesaplamalar kıyaslanmıştır. Bölüm 2’den Bölüm 4’e kadar genel olarak LED’ler hakkında bilgiler ve tezin yapılması sırasında izlenecek yöntemlere dair ön bilgiler verilirken Bölüm 5.1’de ise dört farklı tipte artırılmış yüzey elemanı geometrisine sahip kanatçıklar termal simülasyonlar ile detaylı şekilde incelenmiş ve birbirlerine göre kıyaslanmıştır. Bu şekilde LED’lerin soğutulması aşamasında sıkça kullanılacak olan kanatçıklar hakkında kapsamlı teorik bilgi edinilmiş ve kanatçık tasarımı sırasında göz önünde bulundurulabilecek temel performans kriterleri ortaya çıkarılmıştır. Bölüm 5.2’de ise bir farın DRL (Daytime Running Lamp - Gündüz Yanan Lamba) fonksiyonuna ait alüminyum PCB (Printed Circuit Board – Baskı Devre Kartı) ve alüminyum alaşımından üretilmiş kanatçık bileşenleri üzerinde doğrulama çalışması yapılmıştır. Bu çalışma sırasında FloEFD LED modülü kullanılmıştır ve bu ürünlerdeki LED’lerin davranışları bu yazılımın kütüphanesindeki

mevcut LED modeli ile simüle edilmiştir. FloEFD LED modülünün hesaplama mantığı da yapılan uygulamalar ile açıklanmıştır. Bu ürün üzerinde yapılan testler ve simülasyonlar sonucunda ortaya çıkan sonuçlar birbiriyle kıyaslanmış, hata oranları tespit edilmiş ve bu şekilde FloEFD yazılımının doğrulanmasına yönelik bir çalışma gerçekleştirilmiştir. Bölüm 5.3'te ise farklı bir DRL ürünün termal simülasyon çalışmaları FloEFD yazılımında gerçekleştirilmiştir ancak FloEFD kapsamındaki LED modülü bu çalışmada kullanılmamıştır. FloEFD LED modülünde dört çeşit LED'e ait teknik bilgiler ücretsiz olarak mevcut iken özel ölçümlerle bu sayı artırılabilen ve istenen herhangi bir LED için kütüphaneye teknik bilgilerin eklenmesi ve söz konusu kütüphanenin genişletilmesi mümkün olabilmektedir. Bu nedenle LED modülü kullanmak yerine her LED için standart olarak kullanılabilen bir yöntem ile termal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. DRL ürün üzerinde yapılan termal test ve simülasyon sonuçları birbiriyle kıyaslanmış ve hata oranları tespit edilmiştir. Böylece tez, LED'ler hakkında detaylı ön teknik bilgiler, LED'leri soğutmaya yönelik teorik ve uygulamalı bilgiler ve LED'lerin kullanıldığı ürünlerin termal simülasyon çalışmalarına dair uygulamaları ve sonuçlarını içermektedir.

2.KAYNAK ARAŞTIRMASI

Arik ve Weaver (2004), bir LED paketindeki bumphların LED'in termal stabilitesi üzerindeki etkilerini araştırmışlardır. Bahsedilen bumphlar LED'in PCB'ye monte edilmesini ve aynı zamanda LED çipinde üretilen ısının PCB'ye iletilmesini sağlayan bileşenlerdir. Söz konusu bumphlardaki kusurların LED çipinde üretilen ısının dengeli şekilde PCB'ye aktarılmasını engellediği için LED üzerinde asimetrik sıcaklık dağılımı oluşturduğu görülmüştür. Oluşan sıcaklık farklılıklarının LED'in farklı bölgelerinde farklı oranlarda genişmeye sebep olarak özellikle çip ve epoksi kapsül açısından LED'in kararlılığını ve ömrünü azaltan bir faktör olduğu tespit edilmiştir. Bu çalışmada bump hatalarının LED'ler üzerindeki sıcaklık dağılımına olan etkisi sonlu eleman hesaplama yazılımı olan ANSYS yazılımı yardımıyla incelenmiştir. Ayrıca çipin altında bulunan paket malzemesinin safir ve SiC (silikon karbür) olması durumlarında LED üzerindeki sıcaklık dağılımı ve bu durumda bump hatalarının etkisi de incelenmiştir. Bump hatalarına sahip olmayan bir LED çipi üzerindeki sıcaklık dağılımı termal kamera ile gözlemlenmiş ve simülasyon sonuçları ile kıyaslamak için girdi olarak kullanılmıştır. Çip üzerinde köşegen boyunca ölçülen sıcaklık değişimleri grafikler halinde gösterilmiş ve simülasyon sonuçları da aynı metodoloji ile değerlendirilmiştir. Termal kamera ile kusurlu bumphlara sahip safir paket malzemesinden oluşan bir LED üzerinde yapılan sıcaklık ölçümlerinde çip köşegeni üzerindeki sıcaklık farkının 43°C'ye kadar çıkabildiği görülmüştür. LED paket içindeki bumphların kusurlu üretilmesinin bu nedenlerden dolayı önemli termal ve mekanik problemlere sebep olabileceği tespit edilmiştir. Bu çalışmaların yanında LED paket alt tabaka (substrate) malzemesinin termal iletkenlik katsayısının çip sıcaklık dağılımı üzerindeki etkisi de incelenmiş ve çip üzerindeki sıcaklık değişim grafikleri verilmiştir. Yapılan testler ile etkisi ölçülen bump hatalarının etkisini simülasyon yoluyla da teyit etmek için simülasyon modelinde kusurlu bumphlar oluşturulmuş ve elde edilen köşegen üzerindeki sıcaklık değişimlerinin test verileriyle uyumluluk gösterdiği tespit edilmiştir. Ayrıca LED paket alt malzemesi olarak SiC (400 W/mK ısı iletim katsayısı) gibi yüksek ısı iletim katsayısına sahip malzemelerin kullanılması durumunda ortaya çıkan bump hatalarının etkisinin safir (30 W/mK ısı iletim katsayısı) gibi düşük termal iletkenliğe sahip malzemeler kullanılması durumunda ortaya çıkan bump hatalarının etkisine oranla çok daha az olduğu görülmüş

ve ip üzerindeki sıcaklık farklarının göreceli olarak çok daha az olduğu tespit edilmiştir.

Kim ve ark. (2006)zdeş çipler kullanarak LED paketi üzerinde herhangi bir değişiklik yapmadan, sadece paket üzerindeki ip sayısını bir, iki ve dört olmak üzere üç farklı kombinasyon şeklinde tasarlayarak elde ettiği yeni LED ürünü termal testlere tabi tutmuş ve ürünün termal direnç davranışlarını tespit etmiştir. Çalışma sayesinde paket üzerinde kullanılan ip sayısının artmasının ip ile LED paketi içindeki ısı atacağı arasındaki termal direnci orantılı olarak dşrdğu tespit edilmiş ve teorik olarak bu ilişki ifade edilmiştir. Teorik olarak elde edilen formülasyonlar kullanılarak, ip sayısının artışıyla LED paket termal direncinin değişimini gösteren grafikler oluşturulmuş ve bu yöntemin etkin olduğu şartlar belirlenmiştir. Yaptığı çalışmanın etkinliği için en önemli n koşulun ip ile ısı atacağı arasındaki termal direnç ile ısı atacağı ve ortam akışkanı arasındaki termal direnç oranının bir civarında veya birden büyük olmasının gerektiğidir. Yaptıkları alışma “Thermal Resistance Analysis of High Power LEDs with Multi-chip Package” isimli makale ile yayınlanmıştır.

Kim ve ark. (2006) ise ip sıcaklığının değişimi, ortam akışkanının sıcaklığı, akışkanın hızı ve ısı borusunun tasarıma etkisi gibi parametreleri incelemiştir ve söz konusu ip sıcaklıklarının ve termal direnç değerlerinin artan ortam sıcaklığı ve g girdisiyle artarken artan ortam akışkan hızı ile azaldığını tespit etmiştir. alışmasında birincisi sadece altı tane LED ve LED’lerin üzerinde oturduğu MCPCB’den (Metal Core Printed Circuit Board) oluşan model ve ikincisi ise bu sisteme 1,27 cm çapında ve 30 cm uzunluğunda ısı borusu (heatpipe) eklenerek elde edilen iki ayrı modeli incelemiştir. Her iki modeli farklı ortam sıcaklıkları ve ortam akışkanı hızlarında T3ster isimli cihaz (Bir yapının içindeki termal direnç haritasını belirlemek için kullanılır) ile test etmiş ve birbiriyle termal performans açısından kıyaslamıştır.çalışma sonucunda ortam akışkan hızının 2 m/s üzerindeki hızlarda sistem termal direnci üzerindeki etkisinin ciddi oranda azaldığını görmüş ve modele ısı borusu eklenmesinin sistemin total termal direncini ciddi oranda dşrdğun tespit etmiştir. Yaptıkları alışma “Thermal Analysis of LED array system with heatpipe” isimli makale ile yayınlanmıştır.

Lai ve Cordero (2006), LED'lerden oluşan bir otomobil farının termal optimizasyonu üzerine çalışmışlardır. Toplam 40,5 W güç üreten ve 15 LED'den oluşan bu sistemin, far içindeki kısıtlı hacimden dolayı hava ile doğal taşınım mekanizmasını kullanarak soğutulamayacağını tespit etmişlerdir. Fan ile soğutmanın ise farın hacim kısıtlaması nedeniyle uygulanabilir olmadığı belirtilmiştir. Çalışma kapsamında LED'lerin arkasına yerleştirilen kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanlarının sayısının, kalınlığının, uzunluğunun ve boyutlarının termal performans üzerindeki etkisi incelenmiştir. Sistem doğal taşınım ile çalıştığında artırılmış yüzey elemanı sayısının belirli bir sayıya kadar artması kanatçığın termal performansını olumlu yönde etkilerken bu çalışmadaki koşullara göre simülasyonlarla bulunmuş olan belirli bir artırılmış yüzey elemanı sayısından sonra ise busayının artışının ısı transfer performansını kötü yönde etkilediği tespit edilmiştir. Bu problemin artırılmış yüzeyler arasındaki uzaklığın azalması ile kanatlar arasındaki hava akışının zorlaşmasından dolayı olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca çalışma kapsamında artırılmış yüzey uzunluğunun ve kanatçık taban boyutunun da kanatçık termal performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir. Artırılmış yüzey uzunluğu ve kanatçık taban alanı parametrelerindeki artışın diğer parametrelere göre kanatçık termal performansı üzerinde daha fazla etkisi olduğu tespit edilmiştir. Far içinde doğal taşınım mekanizması ile hava soğutma sistemi kullanıldığında LED çipi üzerinde maksimum 200 °C sıcaklık oluşmuştur. Bu nedenle sıvı ile soğutma sistemi tercih edilmiştir ve sisteme pompa eklenerek kapalı sistem içindeki su 4,5 m/s hızla hareket ettirilmiştir. Bu durumda aynı kanatçık yapısı kullanılması durumunda LED çiplerindeki sıcaklığın 90 °C azalarak 110 °C ye düştüğü görülmüştür.

Yang ve ark. (2006), LED paket dolgu malzemesi olarak epoksi malzemesi yerine daha yüksek termal iletkenlik, mekanik ve kimyasal dayanım özelliğine sahip olan seramik malzemeyi seçmiş ve seramik ile gümüş termal vialardan oluşan bir LED paket tasarımı üzerinde çalışmıştır. Çalışma kapsamında üç ayrı prototip model tasarlamış ve bu modellerin performansını simülasyon ve testler yardımıyla belirlemeye çalışmışlardır. Birinci model 1,47 mm çapında bir termal via (Elektronik kartlar üzerinde farklı düzlemlerde bulunan bakır plakaların birbirlerine elektrik ve ısı iletebilmesini sağlayan ek bakır katmandır) ile seramik dolgudan oluşmaktadır. İkinci modelde kullanılan paket ise 0,43 mm çapa sahip 16 tane gümüş termal via ve seramik dolgu malzemesinden

oluşmaktadır. Üçüncü paket ise iki tabakadan oluşmakta ve üst tabaka 16 tane 0,26 mm çapında gümüş termal via içerirken, alt tabaka 9 tane 0,5 mm çapında gümüş termal via içermektedir. Bu iki tabaka arasında ise 0,02 mm kalınlığında gümüş plaka bulunmaktadır. Yaptıkları testlerde sırasıyla tüm bu modellerin 48,9 °C/W, 61,8 °C/W ve 58,5 °C/W termal dirence sahip oldukları ölçülmüş ve yapılan simülasyonlarla testler arasında bazı uyumsuzlukların, temas yüzeylerindeki pürüzlülüğün kaynaklandığına atıfta bulunmuşlardır. Ayrıca çip altındaki ısıyı taşıyan bileşen ile çipin etkin yüzey alanı oranının artmasının termal direnci etkin şekilde düşürdüğünü tespit etmişlerdir.

Amerika Birleşik Devletleri Enerji Departmanının yaptığı çalışmada (Anonim 2007) çeşitli ışık kaynaklarının verimlilikleri kıyaslanmış ve LED ışık kaynaklarının diğer ışık kaynaklarına göre farklılığı ortaya konmuştur. Yapılan çalışmaya göre, ışık kaynaklarının görülebilir ışık açısından enerji verimlilikleri incelendiğinde, akkor ampullerin %8, floresan lambaların %21, metal halide lambaların %27 ve LED'lerin %15-25 arasında verimliliğe sahip olduğu bildirilmiştir. Akkor ampuller kullandıkları elektriksel gücün yaklaşık olarak %81'ini radyasyon enerjisi olarak ortama yayarken toplam gücün sadece %8'ini görülebilir ışık olarak yayarlar ve %73'ünü kızılötesi ışınlar olarak ortama bırakırlar. Kalan %19 oranındaki enerji ise iletim ve taşınım mekanizmaları yardımıyla ortamdaki akışkana ısı olarak aktarılmaktadır. LED'ler ise kızılötesi ve morötesi ışın hemen hemen hiç yaymazlar ve %15-25 arasındaki elektriksel gücü görülebilir ışığa dönüştürürler. Geriye kalan %75-85 arasındaki elektriksel güç ise çoğunlukla iletim yoluyla olmak üzere iletim ve taşınım yoluyla ortama ısı olarak bırakılmaktadır. Çalışmada kıyaslanan ışık kaynakları arasında en yüksek görülebilir ışık performansına sahip ürünler metal halide lambalar olmasına rağmen (%27 görülebilir ışık verimliliği) bu ürünler %19 oranında morötesi ışınlar da yaymaktadırlar. Morötesi ışınların sağlığa zararlı oldukları bilinmektedir. Bu nedenle tüm bu ürünler arasından LED'ler hem yüksek ışık verimlilikler hem de sağlık açısından en tercih edilen ürünler olmaktadır. Ayrıca çalışma kapsamında sıcaklığın LED'ler üzerindeki etkilerinden de bahsedilmiştir. Bu etkiler kısa vadeli ve uzun vadeli etkiler şeklinde sınıflandırılmıştır. LED çipindeki sıcaklık artışının, LED'in ışık çıkışını düşürmesi ve dalga boyu aralığının kaydırması kısa vadeli etkilerdir ve LED'in ömrünün artan çip sıcaklığıyla hızla azalması ise uzun vadeli bir etkidir. LED çip sıcaklığı artışına en

duyarlı LED'lerin turuncu (amber) renkli LED'ler iken en duyarsız LED'lerin ise mavi renkli LED'ler olduğu belirtilmiştir. Çalışma kapsamında LED çip sıcaklık artışının LED'in ömrü üzerindeki etkisini gösteren bir çalışma da yapılmıştır ve bu çalışmaya göre 11 °C çip sıcaklık artışının (ışık çıkışının başlangıçtaki miktarın %70'ine düşmesi kabulüne göre) LED'in ömrünü %57 civarında düşürdüğü tespit edilmiştir. Bu nedenle termal yönetim işleminin LED'ler için mutlaka göz önüne alınması gereken bir durum olduğu belirtilmiştir.

Adrian Plesca (2008), dört katmanlı bir FR4 PCB üründe kullanılan termal viaların PCB termal direnci üzerindeki etkilerini incelemiştir. Çalışma kapsamında termal viaların sayısının ve dizilim geometrilerinin kıyaslaması yapılmış ve bu parametrelerin termal direnç üzerindeki etkileri tespit edilmiştir. Termal viaların lineer ve diagonal şekilde dizilmeleri durumunda bu iki durum arasında termal performans açısından fark edilebilir bir etki olduğu görülmezken termal viaların sayısının termal performans üzerinde çok büyük etkiye sahip olduğu görülmüştür. Ayrıca çalışma kapsamında termal viaların arasındaki uzaklık değerlerinin termal direnç üzerindeki etkileri de incelenmiştir ve termal direncin bu uzaklık değeriyle doğru orantılı olarak arttığı tespit edilmiştir. Bunun yanında termal viaların lokasyonunun çok önemli olduğu ve PCB üzerindeki ısı kaynağından uzaklaştığında termal viaların etkinliklerinin çok azaldığı belirtilmiştir.

Huber (2008) ise çalışmasını bir LED ve PCB sisteminde LED ürün dışındaki ürünlerin tasarım parametrelerinin etkilerini tespit etmek amacıyla yapmıştır. Çalışma kapsamında standart LED ürün, alüminyum MCPCB, FR4 PCB, LED ile PCB arasındaki ara yüz dolgu malzemesi, MCPCB ile kanatçık uygulaması gibi çalışmalar yapmış ve bu uygulamaların sistem termal direnci üzerindeki etkilerini kıyaslamıştır. Yaptığı bu çalışmalarda MCPCB ile oluşturulan sistemin FR4 ile oluşturulan sistemlere oranla %30 daha performanslı çalıştığını tespit etmiştir. Bu çalışmaların ardından MCPCB'ye monte edilen bir alüminyum plakanın yatay olarak ve dikey olarak çalışması durumlarını doğal taşınım koşullarında incelemiştir ve dikey olarak konumlandırılan sistemin devre kartı ile ortam havası arasındaki termal direncinin yatay

konumlanmış olan sistemden yaklaşık %15 kadar daha az olduğunu gözlemlemiştir. Ayrıca bu sistemin fan ile soğutulması durumunda devre kartı ile ortam havası arasındaki termal direncin %40 oranında düştüğünü belirtmiştir.

Jang ve Shin (2008), MCPCB üzerine yerleştirilmiş 30W gücündeki bir LED far sisteminin soğutma sisteminin fizibilite çalışmasını yapmıştır. Araç hareket halinde iken farın kenarlarından toplanan hava akımı LED'lerin soğutulması için kullanılmıştır ve aracın farklı hızları için bu simülasyonlar tekrarlanmıştır. Çalışma sonucunda aracın hareket halinde olması durumunda farın kenarından gelen hava akımının LED'lerin etkin şekilde soğutulması için uygun olduğuna karar verilmiştir ama aracın durgun haldeki konumu için ek çalışma yapılması gerektiği kararlaştırılmıştır.

Lai ve ark. (2008), bir otomobil farında ışık kaynağı olarak sadece LED'lerin kullanılması durumunda bu sistemin soğutulmasına yönelik yöntemler üzerinde çalışmışlardır. Farın içine uzun ve kısa hüzmeye fonksiyonlarını sağlamak üzere 15 tane LED yerleştirilmiştir ve bu sistem toplam 40,5 W güç üretmektedir. Çalışma kapsamında ayrıca bu sistemin hava ile soğutulması ve pasif sıvı ile soğutulması durumları üzerinde de çalışılmış ama bu iki yöntemin soğutma performansı ve ürün tasarımı açısından uygun olmadığı tespit edilmiştir. Hava ile soğutma yöntemi kullanıldığında sistem içerisindeki kısıtlı hacmin yeterli boyutlarda kanatçık kullanmaya elverişli olmadığı ve güçlü fanlar gerektirdiği görülmüştür. Ayrıca pasif sıvı soğutma uygulamaları (kapalı sistem ve ısı borusu yöntemleri) ile yeterli termal performansın elde edildiği simülasyonlarla tespit edilmiş olmasına rağmen bu durumda soğutucunun hem LED'lerin üst kısmında bulunması zorunluluğundan dolayı hem de yüksek maliyetinden dolayı bu yöntemin kullanılmasının maliyet ve tasarım kısıtlamaları nedeniyle mümkün olmadığı görülmüştür. Bu nedenle en uygun yöntem olarak bu sistemin zorlanmış sıvı soğutma yöntemiyle soğutulmasına karar verilmiştir. Bu çalışmada yalın haldeki LED çipleri temin edilmiş ve bu çipler 200 W/mK termal iletim katsayısına sahip Alüminyum Nitrit malzeme ile paketlenmiştir. Bu şekilde çok düşük termal dirence sahip LED ürünler oluşturulmuş (LED ile AlN paketin alt noktası arasındaki termal direnç değeri 2 °C/W'ın altında bulunmuştur) ve MCPCB üzerine

yerleştirilerek testlerde kullanılmıştır. Bu sistemde sadece LED'ler kullanıldığı için farın ön lens kısmının halojen lambalı farlara göre çok daha az ısındığı ve bu nedenle lens üzerinde oluşan buzlanmanın problem olacağı tespit edilmiştir. Aksi takdirde lens üzerindeki buz fardan çıkan ışık miktarını azaltacaktır. Bu nedenle bu çalışma sırasında lensin üzerinde oluşan buzlanmanın ve yoğuşmanın da giderilmesi için de çalışma yapılmıştır. LED'leri soğutan sıvının soğutulması için kullanılacak olan kanatçıklar lensin alt arka kısmına yerleştirilmiş ve bu şekilde lens üzerindeki buzlanmanın giderilebildiği görülmüştür. Soğutucu akışkan olarak antifrizli su kullanılmıştır ve suyun kapalı sistem içerisinde hareket ettirilmesi için pompa ve su deposu mevcuttur. Isınan akışkanın soğutulması için ise lensin arka tarafına yerleştirilen bir kanatçık kullanılmıştır. Soğutucu akışkanın ilk LED soğutucu haznesine girişi sırasında sahip olduğu sıcaklık ile son LED soğutucu haznesinden çıktığında sahip olduğu sıcaklıklar arasında maksimum 5 °C sıcaklık farkı olduğu görülmüştür. Yapılan test ve simülasyonlarda sistem içinde dolaşan akışkan debisinin 0,12 lt/s değerine kadar artmasıyla LED'lerin sıcaklığının hızla düştüğü görülmüştür. Yapılan çalışma kapsamında ayrıca ısınan akışkanın soğutulması için kullanılan kanatçık detaylı olarak incelenmiş ve kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanları arası mesafe, artırılmış yüzey elemanlarının kalınlığı, uzunluğu ve sayısının soğutma performansı üzerindeki etkileri incelenmiştir ve 800 g civarında ağırlığa sahip bir kanatçık tasarlanmıştır. 30 °C ortam sıcaklığında yapılan testler ve simülasyonlar arasında yüksek uyumluluk tespit edilmiş ve tasarlanan aktif sıvı soğutma sisteminin hem pratik ve uygulanabilir ve hem de diğer yöntemlere göre uygun maliyetli olduğu görülmüştür.

Todorov ve Kapisazov (2008), LED'lerin en önemli performans parametresinin çip ile lehim noktası arasındaki termal direnç olduğunu tespit etmişlerdir. Artan çip sıcaklığının renk kayması, voltaj değişimi, ömür ve ışık düşümü üzerindeki olası etkilerini incelemişlerdir. Ayrıca farklı bir soğutma cihazı olan ve türbülanslı hava akımları üreten Synjet ürününü incelemişlerdir.

Weng (2009), sonlu elemanlar yöntemi ile modellenmiş olan bir LED ve PCB modelinin termal simülasyon çalışmasını yapmış ve farklı PCB boyutları ile ortam

akışkanı olan havanın durgun ve hareketli olması durumlarında LED çipinde oluşan sıcaklıkları incelemiştir. Ortam akışkanı olan havanın akış hızını simülasyonlarda durgun halden 10 m/s hıza kadar kademeli olarak artırmış ve bunun sistem termal direnci üzerinde nasıl bir etki oluşturacağını incelemiştir. Yapılan ölçümlerden elde edilen termal direnç değerlerinin hava hızına göre değişim grafiğini çıkarmış ve bu grafiğe eğri uydurma çalışması yaparak sistem termal direncini (çip ile ortam akışkanı arasındaki termal direnç) hava hızının fonksiyonu olarak tanımlamıştır. Hava hızının artmasıyla sistem termal direncinin düştüğünü tespit etmiştir.

Yang ve ark. (2009), bir LED paketi tasarımı üzerinde çalışmış ve LED paketi ile kanatçıktan oluşan bir sistemin termal direnç değerlerini ölçerek ayırtmış ve böylece tasarım sırasında yapılan modifikasyonların termal dirençleri nasıl etkilediğini incelemiştir. İlk tasarımlarında LED paketi içinde termal via kullanmamış ve bu durumda sistemdeki en büyük termal direnç değerinin LED paketinin oluşturduğu termal direnç olduğunu tespit etmişlerdir. Ardından LED paket içine termal vialar yerleştirip LED paket termal direnç değerlerinin ciddi düşüş gösterdiğini ve kanatçık termal etkinliğinin arttığını gözlemlemiştir. Ayrıca LED paket içindeki termal viaları içi dolu olarak modellediklerinde bunun olumlu katkısının olduğunu tespit etmişlerdir. LED paket içindeki termal via miktarının artırılmasıyla belirli bir noktadan sonra sistemdeki kritik bölgenin kanatçık olduğu ve kanatçığın termal direncinin sistemdeki baskın termal direnç değeri haline geldiğini fark etmişlerdir.

Cree firması (Anonim 2010)yaptığı araştırmada ise düşük maliyetli FR4 devre kartlarında kullanılan termal viaların optimizasyonu üzerinde çalışmıştır. Termal via içermeyen bir FR4 plaka aynı kalınlıktaki bir MCPCB'ye oranla yaklaşık 6 kat büyük total termal dirence sahip olmasına rağmen termal viaların FR4 PCB'ye dahil edilmesi ile bu fark büyük ölçüde ortadan kaldırılabilmektedir. Termal viaların kalınlıkları ve içlerinin lehim ve bakır ile ayrı ayrı dolu olup olmaması gibi durumlar kıyaslanmış ve içi dolu ve daha kalın viaların termal açıdan daha yüksek performans gösterdiği tespit edilmiştir. Çalışma sonucunda PCB üzerindeki viaların uygun yerleşimi, çapı ve

aralarındaki boşluklar teknik resim halinde gösterilmiş ve optimum çözüm kullanıcıya tarif edilmiştir.

Deng ve Liu (2010), 100W'lık LED ısı kaynağının soğutulması için sıvı metal GaIn20 (Galyum %80 + İndiyum %20) ve su kullanmıştır ve bu iki ayrı sistemi termal performans açısından kıyaslamıştır. Yaptıkları çalışmalarda sıvı metal ile soğutma yönteminin hem mümkün hem de çok güçlü bir soğutma yöntemi olduğu görülmüştür. GaIn20'nin erime sıcaklığı 16°C'dir ve düşük buhar basıncına sahiptir. Çalışma sonucunda su ile soğutmadan sıvı metal ile soğutmaya geçildiğinde değişen en etkin parametrenin sistemdeki taşınım direnci olduğu görülmüştür. Suyun taşınım direnci sıvı metalin taşınım direncinden çok daha yüksektir ve bu nedenle sıvı metalden daha düşük termal verim sağlamaktadır.

Kailin ve ark. (2011), bir kanatçık üzerinde iki LED'i termal performans açısından incelemiştir ve tüm LED'ler içerisinde dört tane GaN tabanlı çip bulunmaktadır. Bu sistemin total termal direncini analitik olarak teorik yöntem ile hesaplamıştır. Yaptığı analitik yaklaşım ile bulduğu maksimum çip sıcaklığı ve toplam termal direnç değerleri, 77,2 °C ve 6,53 K/W iken, simülasyon ile bulduğu maksimum çip sıcaklığı ve toplam termal direnç değerleri 82,12 °C ve 7,14 K/W olmuştur. Sistemin toplam termal direncini, kanatçığın termal direnci, iletim termal direnci, taşınım termal direnci ve yayılım termal direnci olarak ayırarak analitik olarak hesaplamıştır. Yapılan simülasyonlar sırasında ortogonal bir DOE (Design of Experiment) tablosu oluşturmuş ve parametreleri tablodan seçmiştir. Bu çalışma sırasında beş parametreyi kontrol etmiştir ve her parametrenin dört tane değişkeni bulunmaktadır. Çalışma sonucunda beş parametrenin en optimum değişkenlerini belirlemiştir.

Chen ve ark. (2012), uzun ve kısa hüzmeleri içerisinde barındıran bir far tasarımında LED çipleri kullanarak optik ve termal testleri gerçekleştirmiştir. 2x5 diziliminde olmak üzere toplam 10 tane mavi ışık veren LED çipini bir araya getirerek dikdörtgen şeklinde bir çip demeti oluşturmuş ve bu LED çiplerini DBC (Direct Bond Copper) elektronik

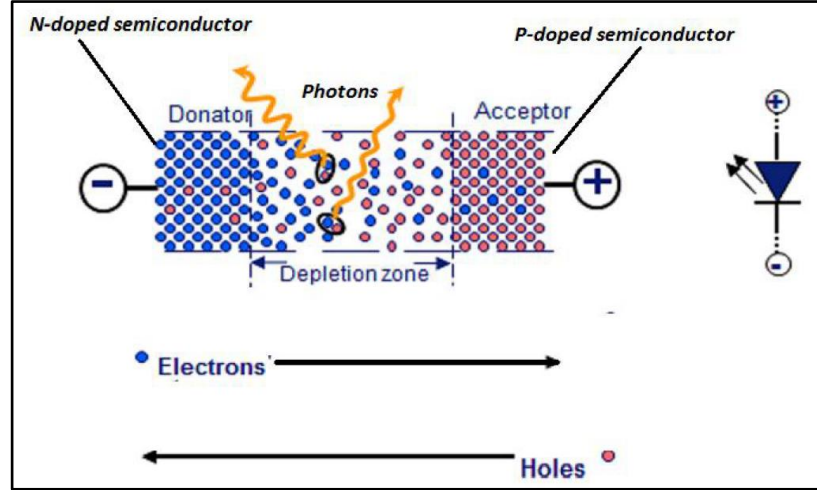
devre kartı üzerine monte etmiştir. DBC devre kartının bileşenleri olan seramik ve bakır plaka kalınlıkları ayrıca incelenerek optimize edilmiş ve uygun termal direnç değerleri sağlanmıştır. Beyaz ışık elde edebilmek için çiplerin üzerini fosfor ile kaplamıştır. Oluşturulan bu tasarımın optik ve termal testlerini 85 °C ortam sıcaklığında gerçekleştirmiş ve ürünün 1100 lümen ışık verebildiğini tespit etmiştir. LED'lerin soğutulması için kanatçık üzerindeki artırılmış yüzeylere hava üfleyen fan kullanmış ve 5000 W/m²K eşdeğer ısı transfer katsayısı sağlandığında LED paket termal direncinin 1,3 K/W altında kalabildiğini görmüştür. Elde edilen farın optik performansı ölçmeye yönelik uygulanan testleri geçerek ECE regülasyonlarına uygunluğunu kanıtlamıştır. Ayrıca oluşturduğu ürünün halojen ve HID ampullerden oluşan far ürünler ile rekabet edebileceğini belirtmiştir.

Ling (2012) 1,2W gücünde bir AVAGOMarkalı LED'i bir MCPCB ve çift katmanlı FR4 PCB üzerine ayrı ayrı yerleştirmiş ve bir kanatçığı bu PCB'lerin arka yüzüne monte ederek iki ayrı model oluşturmuştur. Bu iki ayrı modeli hem FLOTHERM CFD yazılımı kullanarak simüle etmiş hem de teste tabi tutarak LED lehim noktası ile ortam akışkanı arasındaki termal direnci ölçmüştür. Yaptığı simülasyonlarda radyasyon ile ısı transferi mekanizmasını, %2-3 civarında etkisi olacağı düşüncesiyle ihmal ederek hesaplamalara dahil etmemiştir ve malzeme özelliklerini sıcaklıktan bağımsız olarak kabul etmiştir. Yaptığı testlerde MCPCB ile oluşturulmuş olan modelde termal direnç değerini 25 °C/W olarak ölçerken, FR4 çift katmanlı PCB ile kurulmuş olan modelde termal direnç değerini 37 °C/W olarak ölçmüştür. Simülasyonlar ile test sonuçları arasında her iki model için de %8 hata tespit etmiş ve test ile bulunan termal direnç değerlerinin hep simülasyon ile bulunan termal direnç değerlerinden daha büyük olduğunu fark etmiştir. Ayrıca çalışmanın sonunda bazı çıkarımlar yaparak LED'ler ile devre bileşenlerini aynı PCB üzerinde kullanmamayı ve yüksek termal iletkenlik değerine sahip ara yüz dolgu malzemeleri kullanmayı tavsiye etmiştir.

3.KURAMSAL TEMELLER

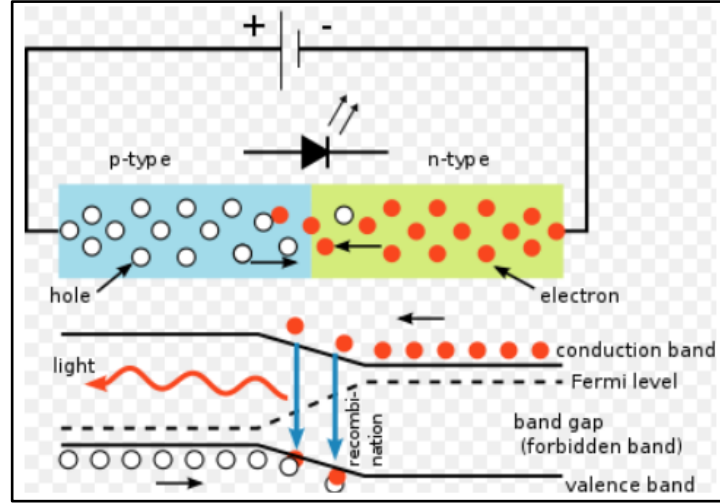
3.1.LED'ler ve Çalışma Mantığı

LED'ler ışık yayan diyotlar olarak tanımlanır ve LED kelimesi İngilizcedeki "Light Emitting Diode" kelimelerinin baş harflerinden türemiş bir kelimedir. LED'ler farklı yarı iletken malzemelerin birleşiminden üretilmiş bir çipten oluşmaktadır. Şekil 1.1'de gösterilmiş olduğu gibi ışık veren çip N-Doped ve P-Doped yarı iletken malzemelerin birleştirilmesi sonucunda oluşturulmuştur. N-Doped yarı iletken malzeme içerisinde aşırı miktarda fazlalık yüksek enerjili elektronlar bulunmakta iken P-Doped malzeme içerisinde ise eksik elektronlar ve elektron boşlukları bulunmaktadır. Bu nedenle bu malzemeler uyarılmış ve yüklü durumdadırlar. N-Doped ve P-Doped malzemelerin üretilmeleri laboratuvar koşullarında çok hassas işlemler sonucunda gerçekleştirilebilmektedir. LED çipi ise bu şekilde uyarılmış iki ayrı ince yarı iletken tabakanın birleştirilmesi sonucunda oluşturulmuştur (p-n junction).



Şekil 1.1.LED çipini oluşturan N-Doped ve P-Doped yarı iletken tabakalar (Schäfer 2012)

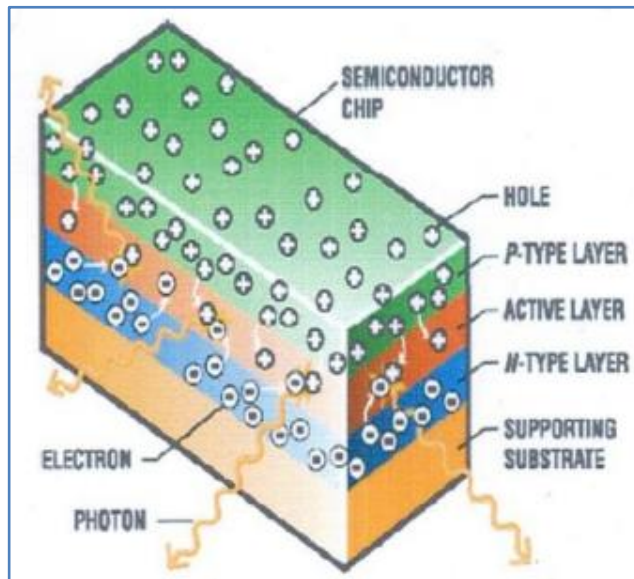
Şekil 1.2’de gösterildiği gibi pozitif ve negatif yüklü yarı iletken kutuplara uygulanan elektriksel potansiyel fark, N-Doped malzeme tarafındaki yüksek enerjili elektronların P-Doped malzeme tarafındaki düşük enerjili elektron boşluklarına yerleşmesine ve bu nedenle elektronların yüksek enerjili konumdan düşük enerjili konuma geçmelerine sebep olmaktadır. Oluşan bu enerji farkı ise elektronlar tarafından foton olarak dışarı salıverilmektedir (Schäfer 2012). Şekil 1.1’de görüldüğü gibi ışığın oluşmasını sağlayan mekanizma, bu iki uyarılmış yarı iletken katmanın birleştiği bölge olan “Depletion zone” bölgesinde gerçekleşmektedir. Pozitif ve negatif yüklü kutuplara yeterli potansiyel farkın uygulanmaya devam edilmesi, söz konusu N-Doped ve P-Doped malzemelerdeki fazlalık elektronların ve elektron boşluklarının sürekli olarak tekrar üretilmesini ve bu sayede fotonların oluşturulmasını sağlamaktadır. LED çipi içerisinde oluşturulan bu yapıya literatürde “P-N Junction” denir.



Şekil 1.2.LED çipi üzerinde ışık üretme mekanizmasının gösterilmesi (Anonim 2014a)

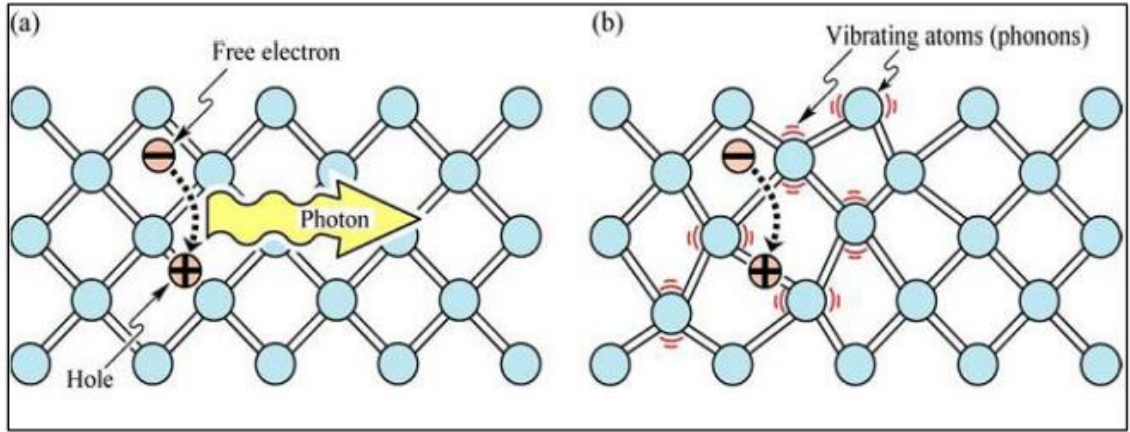
Şekil 1.2’de görüldüğü gibi N-Doped malzeme üzerindeki yüksek enerjili fazlalık elektronların P-Doped malzeme üzerindeki elektron boşluklarına yerleşmesi ve düşük enerjili konuma ulaşarak ışık vermeye başlaması için N-Doped malzeme tarafındaki fazlalık elektronların hareketini başlatmaya yeterli potansiyel farkın uygulanması gereklidir (Forward Voltage Operation). Bu nedenle LED’ler, pozitif ve negatif yüklü kutuplara uygulanan potansiyel farkın belirli bir değerin altında olması durumunda elektronların iletim bandından (Conduction Band) birleşme bandına (Valance Band) geçişini sağlayamayacağından dolayı ışık oluşturamazlar. İlk elektron hareketinin başlaması ve sürekli hale gelebilmesi için uygulanan potansiyel farkın mutlaka belirli bir sınır değeri aşması gereklidir(Schäfer 2012).Görüldüğü gibi elektronların iletim bandından (conduction band) birleşme bandına (valance band) aktarılabilmesi için geçilmesi gereken belirli bir eşik enerji değeri vardır ve bu enerji pozitif ve negatif yüklü kutuplara dışarıdan uygulanan potansiyel fark ile sağlanmaktadır (Band gap). LED çipinden salıverilen ışığın dalga boyu ve rengi iletim bandı ile birleşme bandı arasındaki aşılması gereken eşik enerji seviyesine bağlıdır. Bu eşik enerji seviyesi ise N-Doped ve P-Doped malzemelerin oluşturulmasında kullanılan yarı iletken malzemelerin çeşitleriyle sağlanabilmektedir. Çünkü P-N junction oluşturabilen farklı yarı iletken malzeme çiftlerinin birleştirilmesiyle farklı band eşik enerji değerleri elde edilebilir ve bu şekilde salınan ışığın dalga boyu ve rengi değiştirilebilir. Nitekim endüstride üretilen

farklı renkli LED çiplerinin üretilmesinde kullanılan yarı iletken malzemeler birbirlerinden farklılık göstermektedir. Endüstride şu an kullanılan LED'ler için görülebilir ışık yayan band enerji aralığına denk gelen potansiyel fark değeri 2V ile 4V arasındadır. Farklı renklerdeki tüm LED'ler bu potansiyel fark değerleri ile çalışabilmektedirler. Şekil 1.3'te LED çipini oluşturan katmanlar görülmektedir. Görüldüğü gibi katmanlar N-Doped katmanı (N-Type Layer), P-Doped katmanı (P-Type Layer) ve aktif katmandan (Depletion zone - Active Layer) oluşmaktadır.



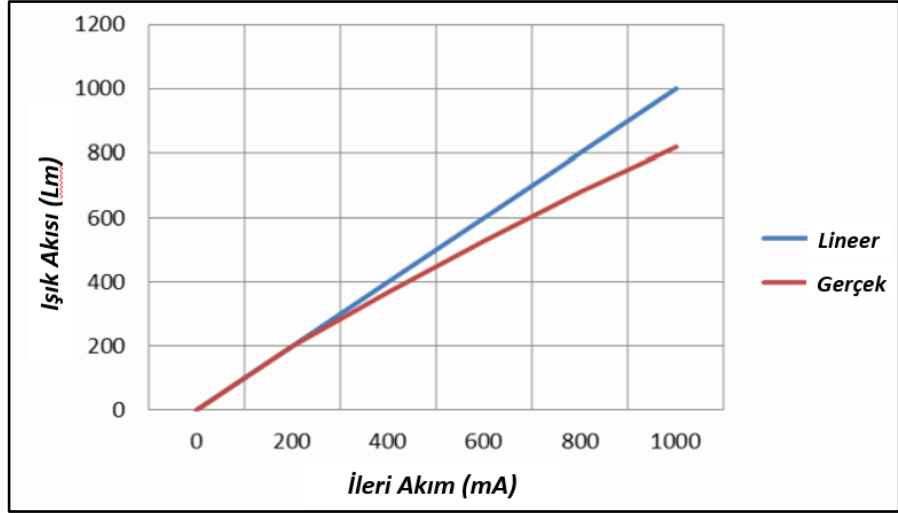
Şekil 1.3.LED çipini oluşturan katmanların görünümü (Schäfer 2012)

Ayrıca LED çipinde hareket eden elektronlar, elektron boşluklarına yerleşerek fotonları oluştururken bu sırada kafes yapısındaki atomları da titreştirerek enerjinin bir kısmının ısıya dönüşmesine neden olur. Şekil 1.4'te gösterildiği gibi titreşen atomlar ısı oluşturur ve çipin ısınmasına sebep olurlar. Isıya dönüşen enerjinin artışı LED'in verimini düşürmektedir.



Şekil 1.4.Çipte ışık oluşumu ve ısıya dönüşen kafes titreşimleri (Schäfer 2012)

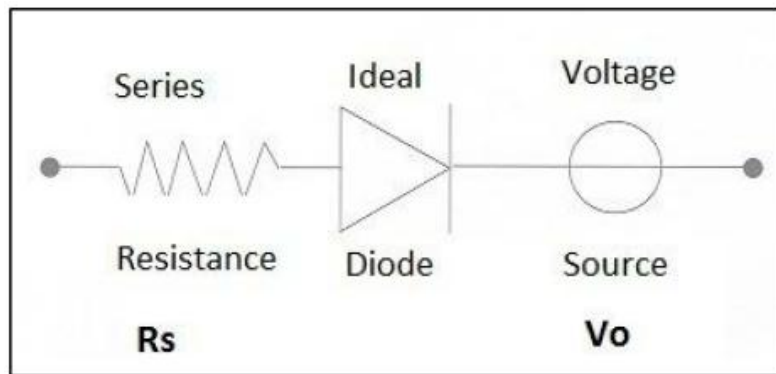
Şekil 1.5'te görüldüğü gibi düşük LED akımlarında, uygulanan akımın artmasına oranla üretilen ışık miktarı hemen hemen doğrusal olarak artarken yüksek akım değerlerinde üretilen ışık miktarındaki artış akıma oranla daha azdır. Yüksek akım değerlerinde yarı iletken malzemelerin kafes yapılarındaki atom titreşimlerinin etkileri daha çok artmakta ve bu durum ısıya dönüşen enerjinin oranını artırarak ışık verimini düşürmektedir. Şekil 1.5'te görüldüğü gibi 300 mA üzerindeki akım değerleri genelde ışık veriminin daha fazla düşmeye başladığı ve ısıya dönüşen enerji oranının daha da arttığı akım değerleri olmaktadır (Schäfer 2012). Bu akım değeri LED'lerin normal çalışma akımlarına göre ayrıcalık gösterir ve tüm LED'ler için aynı akım değeri geçerli değildir.



Şekil 1.5.LED'e uygulanan akım ve LED'in ürettiği ışık miktarı (Schäfer 2012)

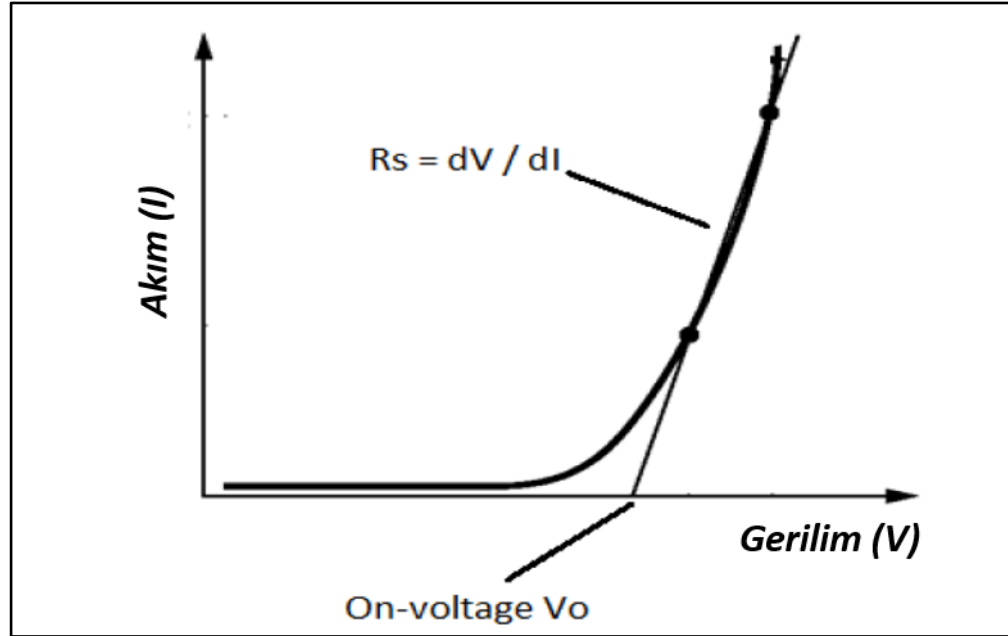
3.2.LED'lerin Elektriksel Davranışı

Akkor veya halojen ampuller gibi geleneksel ışık kaynaklarında ışık çıkışı genellikle uygulanan sabit potansiyel farkile kontrol edilirken LED'lerdeki ışık çıkışı kontrolü akım ile ayarlanır.Şekil 1.6'da bir LED'in basit elektriksel gösterimi bulunmaktadır ve bu gösterime göre LED bir iç direnç (R_s), ideal diyot ve potansiyel farktan (V_0) meydana gelmektedir.



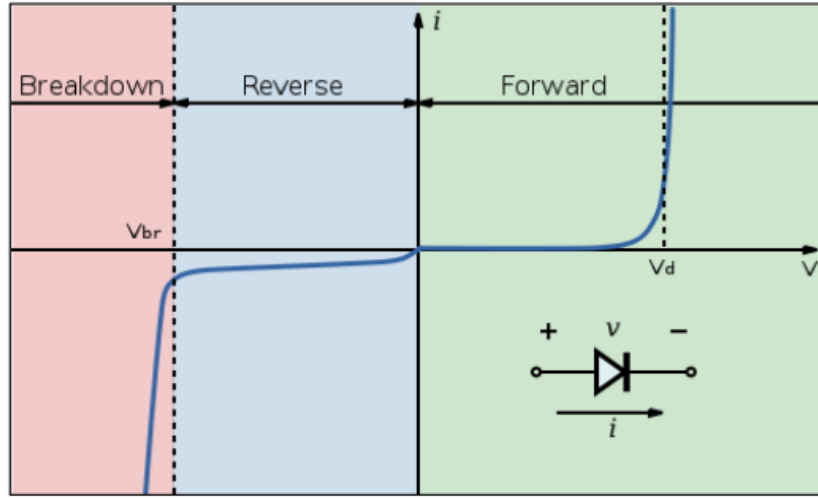
Şekil 1.6.LED'in basit elektriksel modelinin gösterilmesi (Schäfer 2012)

LED'ler doğrudan bir voltaj kaynağı ile çalıştırılmamalıdır ve bunun yerine mutlaka elektriksel sürücü devreler ile akım kontrolü sağlanmalıdır. Aksi takdirde ışık çıkışının kontrol edilmesi mümkün değildir. Şekil 1.7'de görüldüğü gibi LED'lere uygulanan voltajın artırılması LED'in üzerinden geçen akımın hızlı şekilde artmasına ve ışık çıkışının hızlı şekilde değişmesine sebep olabilmektedir. Ayrıca LED çipinin sıcaklığının artışı da sabit akım koşulu altında çip üzerindeki voltajın bir miktar düşmesine ve bu nedenle sabit voltaj koşulu altında akımın değişkenlik göstermesine sebep olacaktır. Bu nedenle sabit voltaj uygulaması yoluyla LED'lerden sabit ışık çıkışı elde etmek verimli bir yöntem değildir. Şekil 1.7'de gösterildiği gibi R_s iç direnci dV/dI bağıntısından kolaylıkla bulunabilir. LED'lerin ışık üretmeye başlayabilmesi için belirli bir eşik enerji değerinin aşılması ve bu nedenle belirli bir ön voltajın uygulanması gerekmektedir. Şekil 1.7'de görüldüğü gibi LED üzerindeki voltaj V_0 değerine ulaşmadıkça LED üzerinde akım oluşmaz ve ışık üretimi gerçekleşmez. LED'lerin bu karakteristik özelliğine "On Voltage" potansiyel fark denir. R_s ve V_0 karakteristik özellikleri üretilen LED'lerin bilgilerini içeren teknik dokümanlarda mevcuttur.



Şekil 1.7.LED'lerin akım ve voltaj davranışının görünümü (Schäfer 2012)

Ayrıca LED'lerin bir karakteristik özelliği de "Reverse Voltage" davranışdır. LED'lere uygulanan potansiyel fark ters yönlü olursa LED üzerinde belirli bir voltaj değerine kadar çok az akım oluşur ve ışık üretilmez ama belirli bir voltaj değeri aşıldıktan sonra akım çok hızlı şekilde artarak çipe geri dönülmez biçimde zarar verebilir. Günümüzde kullanılan LED'lerin çoğu bu olguya karşı koruma içermektedir. "Reverse Voltage" karakteristik özelliği üretilen LED'lerin bilgilerini içeren teknik dokümanlarda mevcuttur.Şekil 1.8'de LED'lerin sergilediği "Forward Voltage" ve "Reverse Voltage" davranışları voltaj-akım eğrisi üzerinde gösterilmiştir.



Şekil 1.8.Forward Voltage ve Reverse Voltage davranışının görünümü (Schäfer 2012)

LED'lerin çip sıcaklığı arttıkça elektronların iletim bandından (conduction band) birleşme bandına (valance band) atlaması ve elektron boşluklarını doldurması kolaylaşmaktadır. Bu nedenle sabit akım koşulunda LED çipi üzerindeki sıcaklık artışı, LED voltajının azalmasına neden olmaktadır. Sabit akım koşulu altında, LED voltajının değişimi ile sıcaklık değişimi arasında doğrusal bir oran mevcuttur. Bu orana sıcaklık katsayısı (Temperature Coefficient) denmektedir. Sıcaklık artışı voltajın düşmesine sebep olduğu için negatif bir katsayıdır. Bu çalışmada sıcaklık katsayısı G ile gösterilmiştir. Sıcaklık katsayısı karakteristik özelliği üretilen LED'lerin bilgilerini içeren teknik dokümanlarda mevcuttur.

Yukarıda tanımlanmış olan karakteristik bilgiler yardımıyla bir LED'in çip sıcaklığının 25°C ve daha yüksek sıcaklıklarda olması durumundaki voltaj değerleri hesaplanabilir. Aşağıda ilgili formülasyonlar gösterilmiştir.

$$V=V_0+I*Rs(1.1)$$

$$V=V_0+Rs*I+G*(T_j- 25^{\circ}C)(1.2)$$

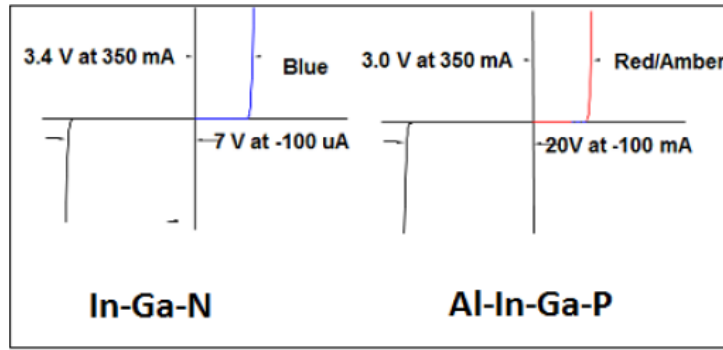
(1.1) numaralı denklem çip sıcaklığının 25°C olması durumunda çip üzerindeki voltajın hesaplanması için kullanılırken (1.2) numaralı denklem ise çip sıcaklığının T_j sıcaklığına ulaşması durumunda oluşan voltajın hesaplanması için kullanılmaktadır. Söz konusu LED'e ait karakteristik bilgiler biliniyor ise istenen akım ve sıcaklıkta çip üzerindeki voltaj değeri ve dolayısıyla güç kolaylıkla hesaplanabilir. LED'lerin çiplerinde kullanılan farklı tiplerdeki yarı iletken çiftleri, iletim bandı ile birleşme bandı arasındaki enerji bandının niteliğini belirlediği için dolayısıyla söz konusu LED'in karakteristik özellikleri, üreteceği ışığın dalga boyu ve rengi de çipin yapısındaki yarı iletken çiftlerine kuvvetle bağlıdır. Günümüzde mavi ve beyaz renkli ışık üreten LED'lerin çipleri In-Ga-N tabanlı iken kırmızı ve turuncu renkli ışık üreten LED'ler ise Al-In-Ga-P tabanlı çiplerden oluşmaktadır. Çizelge 1.1'de bu LED çeşitleri birbiriyle kıyaslanmıştır.

Çizelge1.1.Al-In-Ga-P ve In-Ga-N tabanlı LED'lerin karakteristiklerinin kıyaslanması (Schäfer 2012)

LED Tipi	On-Voltage (Vo)	İç Direnç(Rs)	Ters Gerilim (Reverse Voltage)	Sıcaklık Katsayısı(G)
Al-In-Ga-P	2,6 Volt	1,3 Ohm	20 Volt	-2 mV/°C
In-Ga-N	3,4 Volt	0,5 Ohm	7 Volt	-3 mV/°C

Çizelge 1.1 ve Şekil 1.9'da görüldüğü gibi Al-In-Ga-P (kırmızı/turuncu) tabanlı LED'lerin V_0 değeri 2,6V civarında iken In-Ga-N (mavi/beyaz) tabanlı LED'lerin V_0

değeri 3,4V civarındadır. Al-In-Ga-P tabanlı LED'lerin iç direnç(R_s) ve ters voltaj değerleri (reverse voltage) In-Ga-N tabanlı LED'lerin değerlerinden daha fazladır. Bu nedenle In-Ga-N tabanlı LED'lerin çalıştırılması durumunda uygulanan voltajın ters olmaması konusunda daha dikkatli olunmalıdır. Aksi takdirde LED'in zarar görmesi ihtimali Al-In-Ga-P tabanlı LED'lere oranla çok daha yüksektir. Ayrıca In-Ga-N tabanlı LED'lerin sıcaklık katsayısı (G-temperature coefficient) $-3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ iken Al-In-Ga-P tabanlı LED'lerin sıcaklık katsayısı değeri $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ civarındadır. Örneğin çip sıcaklığındaki 100°C sıcaklık artışı, sabit akım koşulunda mavi/beyaz renk veren LED'lerde çipin üzerindeki voltajın 0,3V düşmesine neden olurken kırmızı/turuncu renk veren LED'lerde 0,2V civarında voltaj düşmesine sebep olmaktadır (Schäfer 2012).

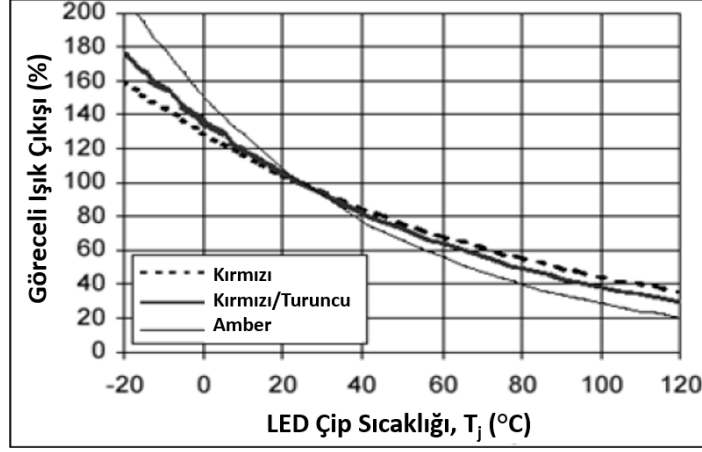


Şekil 1.9. Al-In-Ga-P ve In-Ga-N tabanlı LED'lerin karakteristiklerinin kıyaslanması (Schäfer 2012)

3.3.LED'lerin Termal Davranışı

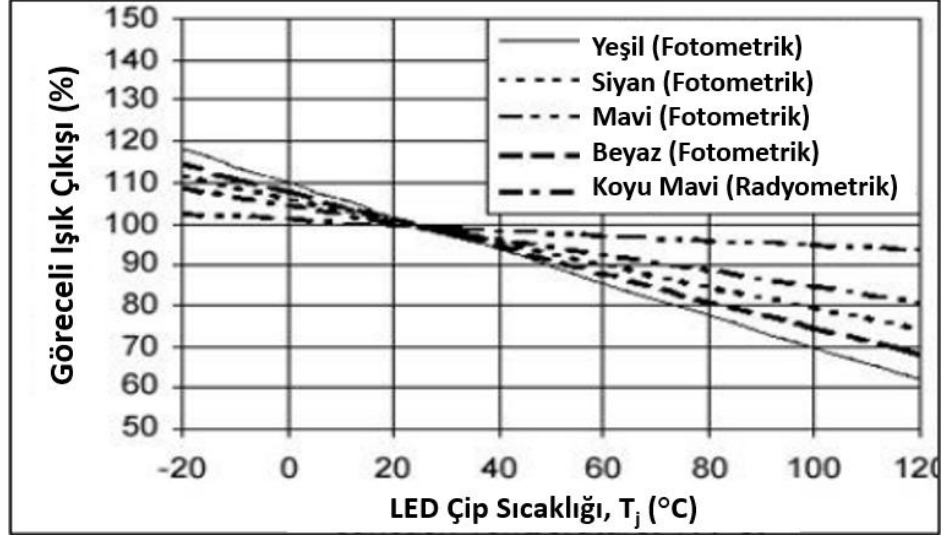
LED'lerin ışık üreten çipleri yarı iletken çiftlerinden oluştuğu için davranışları sıcaklık değişimine göre farklılık göstermektedir. Artan çip sıcaklığı ve dolayısıyla termal enerji, iletim bandından (conduction band) birleşme bandına (valance band) atlayan yüksek enerjili elektronların transfer edilmesini kolaylaştırmaktadır. Bu nedenle çipin sıcaklığının 100°C civarında artması sabit akım koşulu altında çipin üzerinde oluşan potansiyel farkın 0,2-0,3V civarında düşmesine sebep olmaktadır. Bu nedenle çip tarafından harcanan elektriksel güç artan sıcaklık ile kısmen düşme eğilimi gösterir.

Sabit akım koşulu altında, artan çip sıcaklığı ile çip voltajındaki düşüş arasında doğrusal kabul edilebilecek bir katsayı olduğu belirtilmiştir. Bu katsayıya yukarıda Çizelge 1.1’de gösterildiği gibi sıcaklık katsayısı (Temperature coefficient-G) denir ve bu parametre Al-In-Ga-P tabanlı kırmızı/turuncu renk ışık üreten LED’ler için $-2 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ civarında iken In-Ga-N tabanlı mavi/beyaz renk ışık üreten LED’ler için $-3 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ civarındadır. Bu değerlere göre In-Ga-N tabanlı LED’lerin sabit akım koşulunda sıcaklık artışıyla maruz kalacağı voltaj değişimi Al-In-Ga-P tabanlı LED’lerin maruz kalacağı voltaj değişiminden daha fazla olacaktır. Birden fazla LED kullanılan elektronik devrelerde LED’lerin birbirine paralel bağlı olması durumunda sıcaklık değişimi etkisiyle oluşacak voltaj değişimleri tüm elektronik devre üzerindeki voltaj dağılımı açısından değerlendirildiğinde ihmal edilebilecek düzeylerde olabilir. LED’lerin birbirine seri bağlanmış olması durumunda ise bu etki LED sayısı ile orantılı olarak artarak sistemdeki voltaj dağılımını yüksek miktarlarda değiştirebilecektir. Bu nedenle LED’lere ait sıcaklık katsayısı değerlerinin etkisi elektronik devrenin tasarımı ve termal açıdan değerlendirilmesi aşamasında göz önünde bulundurulmalıdır. LED’lerin ışık üretim davranışı da çipin tipi ve değişen çip sıcaklığı ile etkili biçimde değişebilmektedir. Artan çip sıcaklığı, çipin ürettiği ışık miktarının düşmesine ve baskın ışık dalga boyunun kaymasına sebep olmaktadır. Şekil 1.10’da görüldüğü gibi LED çipinin sıcaklığının yaklaşık olarak 75°C artması Al-In-Ga-P tabanlı LED’lerin ürettiği ışık miktarının, 25°C çip sıcaklığında üretilen ışık miktarına oranlayaklaşık olarak %70 düşmesine sebep olabilmektedir.



Şekil 1.10. Al-In-Ga-P tabanlı LED'lerin artan sıcaklık etkisi ile ürettikleri göreceli ışık miktarının düşmesi (Schäfer 2012)

Günümüzde otomotiv endüstrisinde ön ve arka sinyalizasyon lambalarının üretiminde kırmızı, sarı ve turuncu renkli ışık üreten LED'ler sıkça kullanılmaktadır ve bu nedenle bu ürünlerin bünyelerinde bulundurduğu LED'lerin sıcaklıktan nasıl etkileneceği ve sağlayacağı ışık performansı, ürün tasarımı aşamasında mutlaka incelenmelidir. Ayrıca bu ürünlerin de uyması gereken uluslararası optik regülasyonlar mevcut olduğu için geliştirme sürecinde bu ürünlerin LED çip sıcaklıklarının ulaşabilecekleri maksimum değerler ve üretilen ışık miktarının yeterliliği, simülasyon ve prototipler yardımı ile kontrol edilmelidir. Şekil 1.10'da görüldüğü gibi Al-In-Ga-P tabanlı LED'lerin kullanıldığı ürünlerde sıcaklık kontrolü, bu LED'lerin optik davranışları göz önünde bulundurularak gerçekleştirilmelidir. Aksi takdirde geliştirme sürecinde yapılan termal çalışmalarda sadece LED'lerin zarar göreceği sıcaklıklara ulaşmasını engellemeyi hedeflemek optik regülasyonlara uymayı sağlamayabilir. Bu nedenle bu ürünün fonksiyonelliği yeterli düzeyde gerçekleşmeyebilir. Şekil 1.11'de görüldüğü gibi LED çipinin sıcaklığının yaklaşık olarak 75°C artması In-Ga-N tabanlı LED'lerin ürettiği ışık miktarının ise 25 °C çip sıcaklığında üretilen ışık miktarına oranla yaklaşık olarak %30 düşmesine sebep olabilmektedir. Bu LED'ler otomotiv endüstrisinde genellikle DRL ve farların üretiminde kullanılmaktadır.



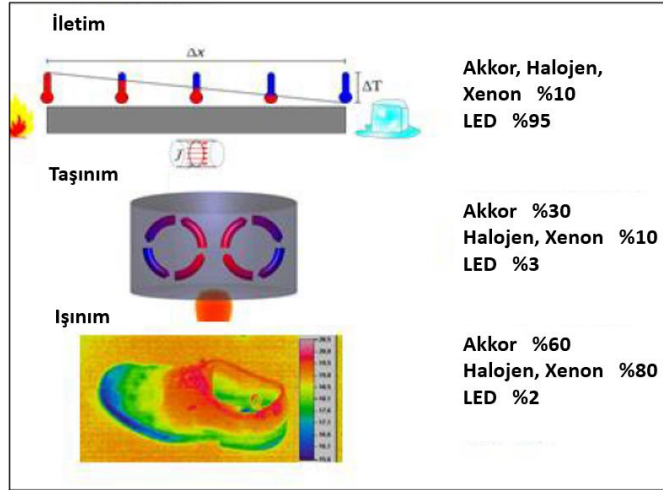
Şekil 1.11.In-Ga-N tabanlı LED'lerin artan sıcaklık etkisi ile ürettikleri göreceli ışık miktarının düşmesi (Schäfer 2012)

Fonksiyonu gereği DRL ürünler diğer aydınlatma ünitelerine göre çok daha uzun süreli olarak çalışmaktadırlar ve bu nedenle bu ürünlerde kullanılan LED'lerin ömürleri geliştirme sürecinde mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır. Bu ürünlerin de uyması gereken uluslararası optik regülasyonlar mevcut olduğu için geliştirme sürecinde bu ürünlerin LED çip sıcaklıklarının ulaşabilecekleri maksimum değerler ve üretilen ışık miktarının yeterliliği simülasyon ve prototipler yardımı ile kontrol edilmelidir. In-Ga-N tabanlı mavi/beyaz renk ışık üreten LED'lerin kullanıldığı ürünlerde sıcaklık kontrolü genellikle LED çiplerinin zarar görmesini engellemek ve ömürlerini optimum seviyelerde tutmak amacıyla gerçekleştirilir. Aksi takdirde ürünün fonksiyonelliği yeterli düzeyde gerçekleşmeyebilir (Schäfer 2012).

3.4.LED'lerin Isı Transfer Mekanizması ve Diğer Işık Kaynakları ile Kıyaslanması

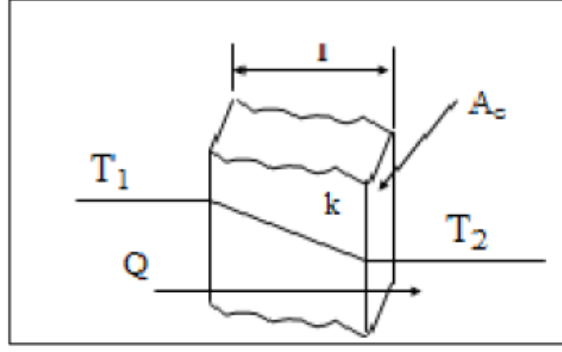
LED'lerin termal davranışlarının ve diğer ışık kaynaklarıyla aralarındaki farkların daha iyi anlaşılması için geleneksel ışık kaynakları ve LED'lerin ısı transfer mekanizmalarının (iletim, taşınım ve ışınım olarak) kıyaslanması faydalı olacaktır. Şekil

1.12’de farklı ışık kaynaklarından ısı olarak atılan enerji miktarının ısı transfer mekanizmalarına göre yaklaşık paylaşımları görülmektedir.



Şekil 1.12.Farklı ışık kaynaklarının ısı transfer mekanizmalarının kıyaslanması (Şekil sadece ısıya dönüşen enerjinin paylaşımını göstermektedir) (Schäfer 2012)

Şekil 1.12’de görüldüğü gibi akkor (Incandescent), halojen ve HID (Xenon) ampullerin ürettiği ısı enerjisinin transfer edilmesinde iletim mekanizması en az etkiye sahip ısı transfer mekanizmasıdır. Taşınım ile ısı transferi ise iletime göre daha etkilidir ama bu tür geleneksel ışık üretici komponentlerde en etkin ısı transfer mekanizması ışınım ile ısı transferidir. LED’lerin ürettikleri ısının ise sadece %2’si görülmeyen radyasyon şeklinde ışınım yoluyla transfer edilir. LED’ler ürettikleri ısı enerjisinin yaklaşık olarak %95’ini iletim yoluyla transfer ederler ve bu nedenle geleneksel ışık kaynaklarına göre farklı şekilde soğutulmaları gereklidir. LED’lerde en etkin ısı transfer mekanizması iletim olduğu için Fourier ısı iletim kanunu detaylı biçimde incelenmelidir. Fourier kanuna göre, Şekil 1.13’te görüldüğü gibi bir kesit üzerinden birim zamanda iletilen ısı enerjisi miktarı (Q), bu kesitin iki tarafındaki sıcaklık farkı ($T_1 - T_2$) ve kesit alanı (A_c) ile doğru orantılı iken bu iki yüzey arasındaki uzaklık (l) ile ters orantılıdır. Ayrıca iletilen termal güç, kesiti oluşturan malzemenin ısı iletim katsayısı (k) ile de doğru orantılıdır.

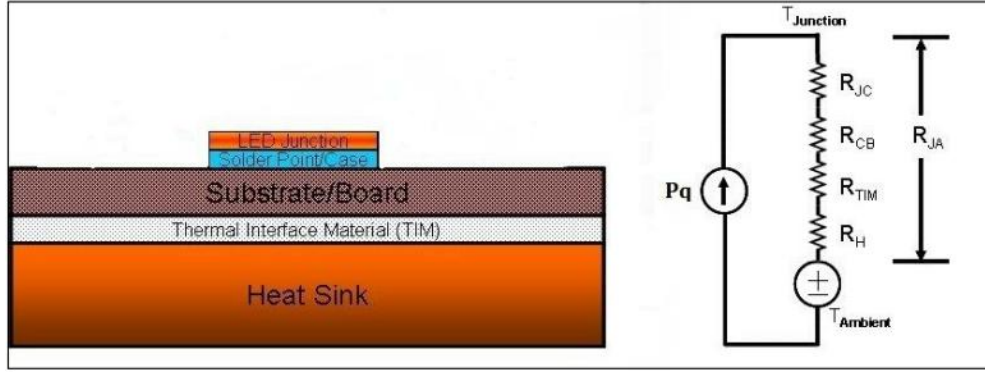


Şekil 1.13.Fourier kanununa göre ısı iletimi (Schäfer 2012)

Fourier iletim kanununa dair (2.1) nolu denklem aşağıda görülmektedir.

$$Q=k * A_c * \frac{(T_1-T_2)}{l}(2.1)$$

Fourier kanunu göz önüne alındığında tipik bir LED modelinin seri bağlı termal dirençlerden oluşan bir sistem gibi modellenebileceği görülebilir ve bu direnç, kesitin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı ile transfer edilen termal güç arasındaki oran olarak tanımlanabilir. LED'lerin termal davranışını tanımlamayı kolaylaştıran buolguya termal direnç denir ve birimi °C/W'tır. Yani kesit üzerinden birim zamanda aktarılmak istenen ısı enerjisinin ne kadar fazla olması isteniyorsa, kesitin iki yüzeyi arasındaki sıcaklık farkı da bu oranda fazla olmalıdır veya olacaktır. Örneğin LED'in çipi ile LED'in PCB'ye lehimlenen ayakları arasındaki termal direnç ve LED çipinin ürettiği termal güç değeri biliniyorsa bu durumda bu iki değerın çarpımıyla LED çipi ile LED'in PCB'ye lehimlenen ayakları arasındaki sıcaklık farkı hesaplanabilir. Böylece LED ayakları üzerinde termokupl yardımıyla ölçülen sıcaklık ile bu şekilde hesaplanarak elde edilmiş olan sıcaklık toplandığında LED çip sıcaklığı tespit edilebilir.Şekil 1.14'te görüldüğü gibi hangi iki kesit arasındaki termal direnç ve aktarılan termal güç biliniyorsa bu durumda bu iki değerın çarpılmasıyla söz konusu kesitler arasındaki sıcaklık farkı hesaplanabilir.

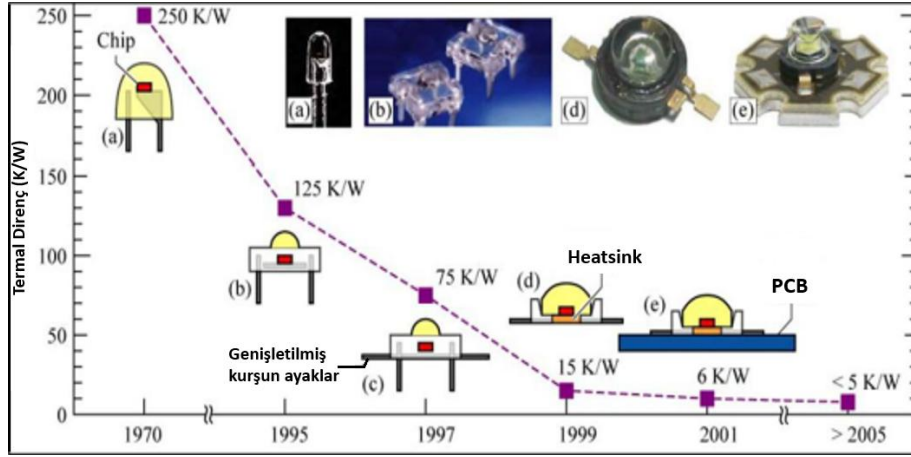


Şekil 1.14.LED'lerin elektriksek direnç şeklinde gösterimi (Schäfer 2012)

Şekil 1.14'te gösterilen P_q değeri termal güç değeridir ve elektriksel devre benzetiminde akıma karşılık gelir. Şekilde gösterildiği haliyle çip sıcaklığı (T_{junction}) ile çevre sıcaklığı (T_{ambient}) arasındaki sıcaklık farkı ise elektriksel devre benzetimindeki potansiyel farka denk gelmektedir. Bu metoda göre çip sıcaklığı (3.1) nolu ifadeye göre hesaplanabilir.

$$T_j = T_{\text{ambient}} + (R_{j-c} + R_{c-b} + R_{b-tim} + R_{tim-heatsink} + R_{heatsink-ambient}) * P_q \quad (3.1)$$

Bu formülasyonda belirtilmiş olan $R_{\text{heatsink-ambient}}$ parametresi kanatçık ile ortamdaki akışkan arasındaki termal direnç değeridir ve kanatçığın geometrisi, dizaynı, malzemesi, akışkanın hareketi, sıcaklığı, tipi gibi birçok değişkene de bağlıdır. Bu tanımlamadan da anlaşılacağı gibi termal direnç değeri her zaman birçok parametreye bağlıdır ve bu parametreler sabit olmadığından dolayı termal direnç değeri de sabit değildir. Değişen sıcaklık, termal ve fiziksel koşullar ile sürekli değişirler ama LED'lerin basitleştirilmesi ve termal davranışlarının daha kolay tanımlanabilmesi için genelde LED'lerin çipleri ile lehimleme için kullanılan ayakları arasındaki maksimum termal direnç değerleri LED'lere ait teknik dokümanlarda belirtilir. Şekil 1.15'te görüldüğü gibi LED'lerin termal direnç değerleri 1970 yılında 250 K/W civarında iken 2005 yılında 5 K/W değerinin altına kadar düşürülebilmiştir. Günümüzde 1,5 K/W termal direnç değerine sahip ve otomotiv sektöründe yüksek güçler ile çalışan farlarda kullanılan LED'ler mevcuttur ve LED üretici firmalar 2015 yılında bu değeri 1K/W değerine düşürmeyi planlamaktadır (Schäfer 2012).

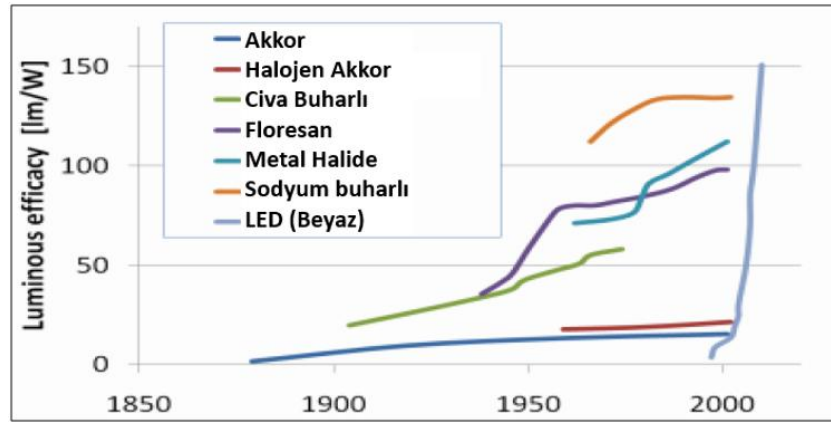


Şekil 1.15.LED'lerin çipleri ile lehim ayakları arasındaki termal direnç değerleri ve LED'lerin bu açıdan gösterdiği gelişim (Schäfer 2012)

3.5.LED'lerin Verimliliği ve Diğer Işık Kaynakları ile Kıyaslanması

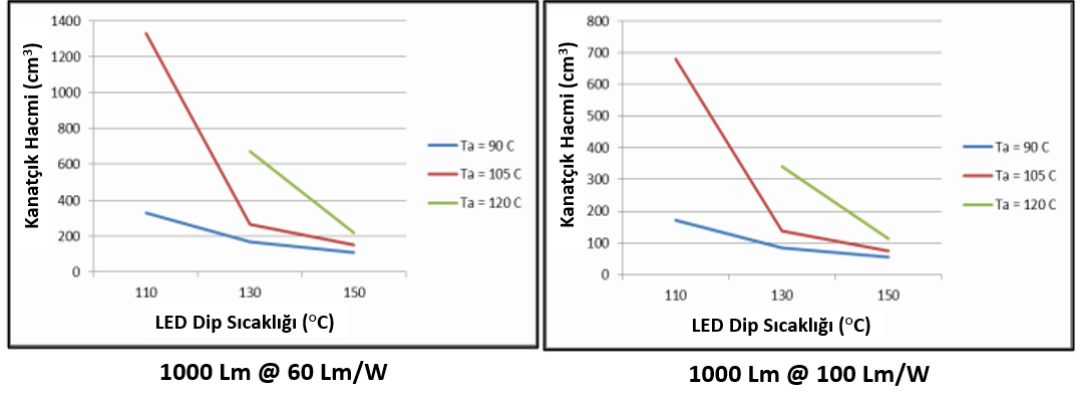
Akkor ampuller ve halojen ampuller sıcak ışık kaynaklarıdır ve filamanında fazla ışık üretebilmesi için daha yüksek sıcaklıklara ulaşmasını sağlamak gerekir. Bir halojen ampulde kullanılan tungsten filamanın tüm güçle çalışma sırasında ulaştığı sıcaklık 3000°C civarındadır. Bu tür ampullerin ışık üretim yöntemlerinin doğası gereği buldukları ortama ısı olarak bıraktıkları verimsiz enerji çok büyük orandadır. LED'ler ise soğuk ışık kaynaklarıdır ve yarı iletken teknolojisi ile ışık üretirler. Bu yönden hem akkor ve halojen ampullere göre farklı yöntem ile ışık üretirler hem de bu tür ışık kaynaklarına göre çok daha verimlidirler. Akkor ve halojen ampullerin kullandıkları elektriksel enerjiden görülebilir ışığa dönüştürdükleri enerji oranı olan ışık verimliliği %5 civarında iken LED'ler için bu değer (light efficiency) %20 civarındadır. LED teknolojisindeki gelişmeler bu oranın gün geçtikçe daha da artmasını sağlamaktadır. LED'ler için verimliliği kıyaslama açısından önemli bir diğer parametre ise ışık etkenliğidir (luminous efficacy). Bu parametrenin birimi Lm/W'tır ve üretilen görülebilir ışığı tüketilen elektriksel güce oranını ifade eder. Akkor ampuller genellikle 16 Lm/W ışık etkenliğine sahip iken bu değer kompakt floresan lambalar için 60 Lm/W civarındadır (Anonim 2014c). Ayrıca halojen ampuller 25 Lm/W, HID ampuller 90

Lm/W ve LED'ler genellikle 65-100 Lm/W ışık etkenliği değerlerine sahiptirler ve bu değer artmaya devam etmektedir. LED'lerin ışık etkenliğinin artırılması açısından halen mevcut potansiyelleri olmasına karşın sözü edilen diğer ışık kaynaklarının çoğunun ışık etkenliğinin artırılması açısından potansiyelleri tükenmiştir.Şekil 1.16'da görüldüğü gibi 2000 yılından sonra LED'lerin ışık etkenliğinde görülen yüksek artış LED'leri daha tercih edilebilir duruma getirmiştir (Fratty ve ark. 2012).



Şekil 1.16. Işık etkenliğinin (luminous efficacy) yıllara göre farklı tiplerdeki ışık kaynakları için gelişimi ve değişimi (Fratty ve ark. 2012)

Şekil 1.17'de ise bir LED'in ışık etkenliği değeri ile LED'i soğutmak için kullanılması gereken kanatçık hacmi ve bu sistemin içerisinde bulunduğu ortam sıcaklığı arasındaki ilişki gösterilmiştir.



Şekil 1.17. Işık etkenliğinin kanatçık hacmi üzerindeki etkisi (Schäfer 2012)

Görüldüğü gibi 60 Lm/W ışık etkenliğine sahip LED'i soğutmak için 105°C ortam sıcaklığı koşulunda 1300 cm³ hacminde bir kanatçık kullanılırken, 100 Lm/W ışık etkenliğine sahip LED'i aynı sıcaklığa kadar soğutmak için 105°C ortam sıcaklığı koşulunda 680 cm³ hacminde bir kanatçık kullanılmıştır. Her iki durumda da 1000 lümen ışık çıkışı elde edilmeye çalışılmıştır. Kanatçık boyutları ve hacmi ise ampirik bağıntılar ile hesaplanmıştır. Bu çalışmanın sonuçlarından da anlaşılacağı gibi LED'lere ait ışık etkenliği değerinin önemi otomotiv endüstrisinde kullanılan tasarımlarda çok yüksektir. Bu şekilde LED'leri soğutmak için gerekli kanatçık boyutları küçültülebilir ve ürünlerin ağırlıkları etkili şekilde azaltılabilmektedir.

3.6.LED'lerin Soğutulması ve Kanatçıklar

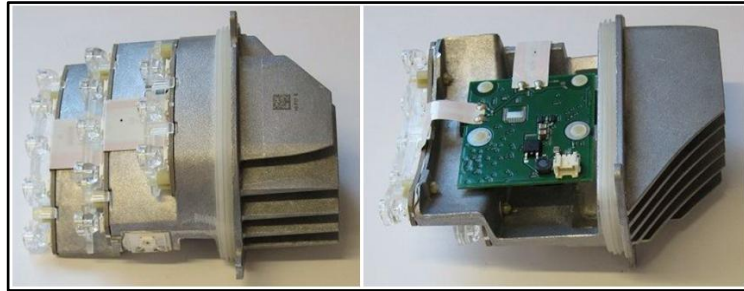
LED'lerin ürettiği ısının transferi çok büyük oranda iletim yoluyla sağlandığı için LED çipinde üretilen termal güç öncelikle LED'in üzerine monte edilmiş ve lehimlenmiş olduğu PCB üzerine aktarılır. Eğer LED'in soğutulması için oluşturulmuş olan PCB üzerindeki bakır kaplanmış alan miktarı istenen termal tasarım kriterleri açısından yeterli ise LED üzerinden gelen ısı enerjisi ortamdaki akışkana verimli şekilde aktarılır ve LED çipinin istenen sıcaklık sınırlarında çalışması sağlanabilir. Aksine termal tasarım kriterleri PCB üzerindeki bakır kaplı alanlar yardımıyla sağlanamıyorsa, bu durumda genellikle kanatçıklar yardımıyla ısı transfer yüzey alanı artırılır ve daha fazla

ısıl gücün verimli şekilde ortamdaki akışkana transfer edilmesi sağlanabilir. Bu şekilde kanatçık yardımıyla artırılan ısı transfer yüzey alanı LED'in daha düşük sıcaklıklarda ve daha verimli şekilde çalışmasını sağlar.Şekil 1.18'de piyasada sıkça kullanılan bazı farklı kanatçık geometrileri görülmektedir.



Şekil 1.18.Kanatçıkların görünümü (Schäfer 2012)

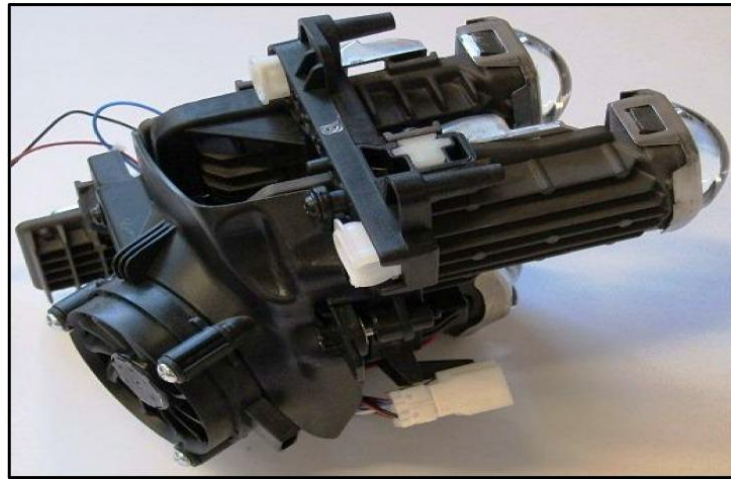
Kanatçıkların performansları, sahip oldukları artırılmış yüzey tipleri, artırılmış yüzey geometrisi, içinde buldukları ortam koşulları (akışkanın tipi, hızı, sıcaklığı vs.) ve toplam kanatçık yüzey alanı gibi birçok parametreye bağlıdır.Şekil 1.19'da otomotiv endüstrisinde kullanılan LED'li elektronik devre kartları ve bunların soğutulması için kullanılan kanatçıklar görülmektedir.



Şekil 1.19.Otomotiv endüstrisinde kullanılan LED'li elektronik devre kartları ve bunları soğutma görevi üstlenen kanatçıkların görünümü (Schäfer 2012)

Otomotiv aydınlatma endüstrisinde genellikle arka stoplar gibi arka aydınlatma ürünlerinde kullanılan düşük güç tüketimine sahip LED'li elektronik devreler, PCB üzerindeki bakır katmanlarından oluşan soğutma alanlarının yeterli olmadığı durumlarda doğal taşınım mekanizması ile çalışan kanatçıklar yardımıyla

soğutulurlar.Bu şekilde LED'lerin istenen ışık miktarı ve renk değerlerini sağlaması hedeflenir.Bunun yanı sıra otomotiv aydınlatma endüstrisinde farlar gibi ön aydınlatma ürünlerinde kullanılan yüksek güç tüketimine sahip LED'li elektronik devreler, bazı ürünlerde zorlanmış taşınım mekanizması ile çalışan kanatçıklar yardımıyla soğutulurlar.Şekil 1.20'de Hyundai Genesis aracına ait bir LED'li farın iç kısmı görülmekte ve ışık üreten LED'ler ve bunların soğutulması için kullanılan fan ve kanatçıklar kolaylıkla fark edilebilmektedir (Schäfer 2012).

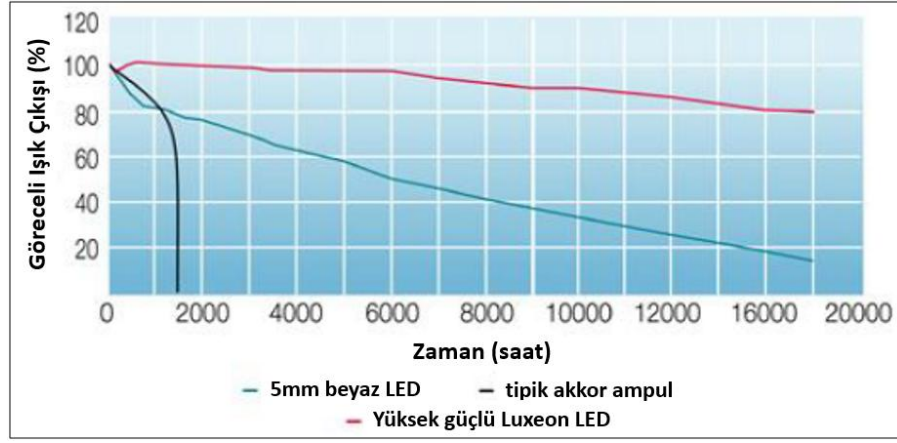


Şekil 1.20.Fan ve kanatçıklar yardımıyla soğutulan bir LED'li far mekanizmasının görünümü (Hyundai Genesis LED'li Farı) (Schäfer 2012)

3.7.LED'lerin Ömrü ve Işık Bozulması Davranışı

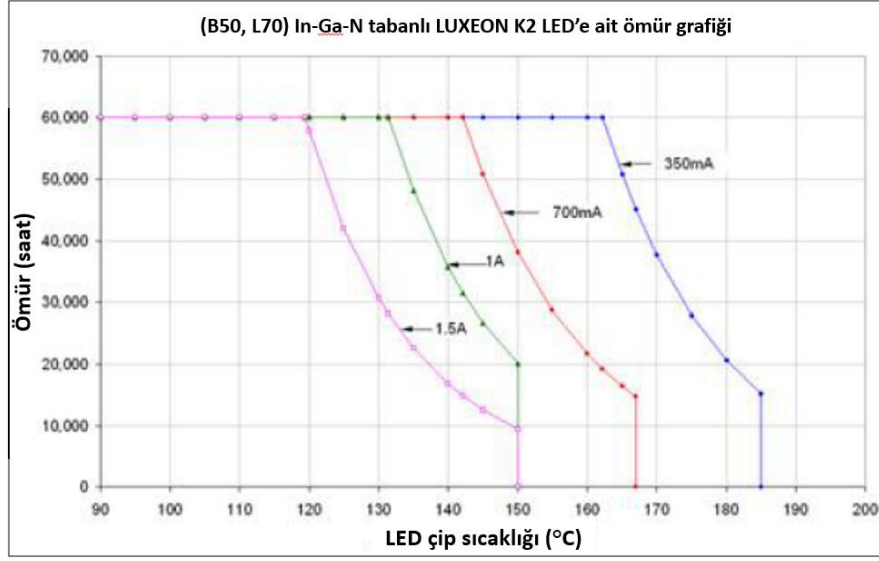
Bir akkor ampul filamanı, kendisini oluşturan malzemenin, çalışırken zamanla bozulması neticesinde işlevini yitirir ve ışık vermez hale gelir. Bu duruma ampul ölümü (bulb mortality) denir ve aynı durum tüm ışık kaynakları için de geçerlidir. Aynı şekilde LED'lerin de zamanla ürettikleri ışık miktarı ilk kullanılmaya başladıkları güne oranla azalır ve bir süre sonra kullanım ömürleri biter. Tipik akkor ampullerin ömürleri genellikle 2000 saatten az iken LED'lerin ömürleri uygun termal yönetimin ve uygun LED çip sıcaklıklarının sağlanmasıyla 100000 saate kadar çıkabilmektedir (Anonim 2014c).

1960 ve 1970 yıllarında geliştirilen LED'lerin ürettiği lümen değerleri günümüzdeki LED'lere oranla çok daha hızlı şekilde düşüş göstermekteydi. Şekil 1.21'de görüldüğü gibi, bu LED'ler (5mm White LED) 18000 saat kullanım sonucunda ilk kullanıma başladıkları zaman üretmekte oldukları lümen değerinin %20'sinden daha az ışık üretmekteydiler. Bu nedenle 2000 yılından önce eski LED'lerin aydınlatma sektöründe ve otomotiv endüstrisinde kullanımları mümkün olmamış ve LED'lerin günümüzdeki performanslarını yakalamasıyla 2000'li yıllarda gerçekleşmeye başlamıştır.



Şekil 1.21. İlk geliştirilen LED'ler, akkor ampuller ve günümüzdeki LED'lerin kullanım sırasında gösterdikleri ışık azalması (Fratty ve ark. 2009)

Günümüzdeki LED'ler ise Şekil 1.21'de görüldüğü gibi (high power Luxeon) 18000 saat kullanım sonucunda ilk kullanıma başladıkları zaman üretmekte oldukları lümen değerinin %80'i civarında ışık üretebilmektedirler. Aynı şekilde akkor ampullerin ise 1500 saat civarında kullanım ömürlerini tamamen doldurdukları görülmektedir. Bu nedenle LED'ler günümüzde hem genel aydınlatma sektöründe hem de otomotiv aydınlatma sektöründe çok yoğun şekilde kullanılmaktadır. Şekil 1.22'de görüldüğü gibi LED'lerin ömürleri çip sıcaklığı ve akım değerlerine şiddetle bağlıdır. Çip sıcaklığının 120°C üzerindeki sıcaklık ve yüksek akım değerleri ile çalışması görüldüğü gibi LED'in ömrünün hızla azalmasına sebep olmaktadır (Fratty ve ark. 2009).



Şekil 1.22.Luxeon K2 LED'ine ait akıma göre farklılık gösteren çip sıcaklığı-ömür grafiği (Fratty ve ark. 2009)

3.8.LED'lerinOtomotiv Endüstrisinde Kullanımı

3.8.1.Stil esnekliği açısından kullanım

LED'lerin far ve arka stopların geliştirilmesi ve üretilmesinde de kullanılmaya başlanması, otomotivde aydınlatma elemanlarının stil açısından çok daha etkin bir rol almasına ve araçların karakteristik özelliklerinin daha fazla ön plana çıkarılmasına imkan oluşturmuştur. Otomotiv aydınlatma ürünlerinde LED'lerin kullanılması ile çok daha kompleks ve araca özgü tasarımlar LED'lerin sağladıkları optik tasarım esnekliğive boyutları sayesinde geliştirilebilmektedir. Şekil 1.23, Şekil 1.24 ve Şekil 1.25'te günümüzde LED'lerin kullanıldığı bazı araçların görünümü yer almaktadır. Görüldüğü gibi çok kompleks tasarımlar LED'lerin yardımıyla geliştirilebilmiştir (Fratty ve ark. 2009).



Şekil 1.23.BMW araçlarına ait LED’li arka stop ürünlerin görünümü(Fratty ve ark. 2009)



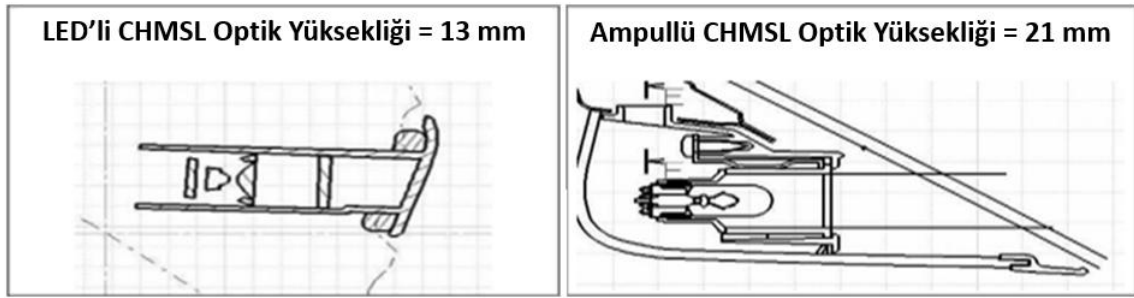
Şekil 1.24.AUDI R8 aracına ait LED içeren bir far görünümü (Anonim 2014d)



Şekil 1.25.AUDI R8 aracına ait LED’li arka stop ürünün görünümü (Anonim 2014e)

3.8.2.Boyutsal esneklik açısından kullanım avantajı

LED'lerin ampullere göre boyutsal olarak çok daha küçük olmaları, LED'lerin arka stoplar, farlar ve üçüncü fren lambalarının tasarımında tercih edilmelerine sebep olmaktadır. LED'lerin boyut farklılığının oluşturduğu en büyük avantajlar, ürünlerin yükseklik ve derinlik açısından daha küçük boyutlar ile geliştirilebilmesi ve tasarım özgürlüğünün daha yüksek olmasından dolayı ürünlere istenen özgün şekillerin daha kolaylıkla verilebilmesidir. Şekil 1.26'da bir CHMSL (Üçüncü Fren Lambası – Center High Mount Stop Lamp) ürününün ampul ve LED'ler ile geliştirilmiş çeşitleri boyutsal açıdan kıyaslanmıştır(Fratty ve ark. 2009).



Şekil 1.26.LED (solda) ve ampul (sağda) ile geliştirilmiş CHMSL ürünlerin boyutsal olarak kıyaslanması(Fratty ve ark. 2009)

3.8.3.Enerji verimliliği

Otomotiv sektöründe arka aydınlatma uygulamalarında kullanılan ampuller genelde 15W ile 21W arasında güç tüketimlerine sahip iken aynı fonksiyonu sağlayan LED'ler ve sürücü devreden oluşan komponentlerin toplam güç tüketimi 5W civarındadır. Görüldüğü gibi LED'lerin güç tüketimi ampullere oranla çok daha azdır ve otomobil aküsünden çekilmesi gereken elektriksel gücün azaltılmasına yardımcı olmaktadır(Fratty ve ark. 2009).

3.8.4.Güvenlik

LED'lerin arka aydınlatma ürünlerinde özellikle fren ünitesi olarak sinyalizasyon amaçlı kullanılması, araç sürüşü açısından güvenlik unsuru olarak ön plana çıkmaktadır. LED'lerin tepki süreleri çok kısadır ve birkaç ms civarındadır. Yani LED'lere gerekli elektrik akımı verilmesi sonrasında LED'ler birkaç ms içinde vermeleri gereken maksimum ışığı verebilmektedir. Akkor ve halojen ampullerin tepki süreleri ise LED'lere oranla çok yüksektir. Ampullerin tepki süreleri 300 ms civarındadır. Bu nedenle trafikte seyir halinde iken yüksek hızlarda kullanım durumunda 300 ms tepki süresi etkili fren mesafelerinin oluşumuna sebep olabilmektedir. LED'lerin kullanımı ile azalan tepki süresi fren mesafelerinin azalmasına ve kazaların azalmasına sebep olabilir. Bu nedenle LED'lerin sürücü güvenliği açısından da avantajları mevcuttur (Fratty ve ark. 2009).

3.9.LED'lerin Avantaj ve Dezavantajları

3.9.1.LED'lerin Avantajları

Wikipedia internet sitesinde, LED'lerin diğer ışık kaynaklarına göre sahip oldukları avantajlar detaylarıyla açıklanmıştır (Anonim 2014a).

- LED'lerin kullanılması karbon emisyonlarının düşürülebilmesini sağlar. LED'lerin ışık verimlerinin akkor ampullerin ışık verimlerine oranı yaklaşık olarak 4-5 kat civarındadır. Özellikle genel aydınlatma alanında LED'lerin kullanılması tüm dünyada karbon emisyonlarını büyük oranda düşürebilir.
- LED'lerin ışık etkenliği akkor ampullerin ışık etkenliği (light efficacy) değerlerinden çok daha fazladır. Akkor ampullerin ışık etkenliği 16 Lm/W civarında iken günümüzde kullanılan LED'lerin ışık etkenliği 65 Lm/W'ın üzerindedir ve bu değerın yükseltilmesi için çalışmalar devam etmektedir.

- LED'ler istenen renkte ışık verebilirler ve bu yüzden ışık filtreleyici komponentlere ihtiyaç duymazlar. LED'lerin çipini oluşturan yarı iletken maddelerin kompozisyonu LED'in üreteceği baskın ışık dalga boyunu da belirler.
- LED'lerin boyutları çok küçüktür ve PCB üzerine kolaylıkla yerleştirilebilirler. LED'lerin bu özelliği tasarımcılara daha özgün ve karmaşık tasarımlar geliştirebilme imkânı sunar.
- LED'lerin tepki süreleri diğer ışık üreten komponentlere göre çok daha düşüktür. Akkor ampuller elektrik akımına maruz bırakıldıktan yaklaşık 300 ms sonra maksimum ışık verebilirken LED'ler birkaç ms içerisinde maksimum ışık düzeyine ulaşabilmektedirler.
- LED'ler frekanslı çevrimler halinde uygulanan açma-kapama işlemleri için çok uygundur. Floresan lambaların ömürleri yüksek frekanslı çevrimler ile çalıştırılmaları durumunda daha çabuk tükenirken, HID ampuller ise çalıştırılmaları durdurulduktan sonra tekrar çalıştırılmaları için uzun zamana ihtiyaç duyarlar.
- LED'ler diğer ışık kaynaklarının çoğuna göre çok daha az miktarda kızıl ötesi ışın yayarlar ve bu nedenle yaydıkları radyasyonun büyük kısmı görülebilir ışıktır.
- LED'ler akkor ampullerden farklı olarak aniden bozulma yerine zamanla performanslarını kaybeder ve kullanılmaz hale gelirler. Akkor ampuller ise ömürlerini tükettiklerinde filamanları deforme olduğu için aniden bozulurlar.
- LED'ler diğer ışık kaynaklarına oranla çok daha yüksek faydalı kullanım ömrüne sahiptir. Performans kriteri göz önüne alınmadığında ömürleri 100000 saate kadar çıkabilirken faydalı kullanım ömürleri 35000 ile 50000 saat arasında olabilmektedir. Akkor ampullerin kullanım ömürleri 1000 ile 2000 saat arasındadır.
- LED'lerin şok dayanımı çok yüksektir ve akkor ampuller gibi kırılga değildirler. Akkor ampuller dış şoklar nedeniyle bozulabilirlerken LED'ler için bu risk çok azdır.
- LED paketleri ürettikleri ışığı kısmen istenen şekillerde odaklayacak kabiliyet ile tasarlanabilirler. LED'lerin çipi üzerinde bulunan şeffaf epoksi lensin farklı

şekillerde tasarlanması yoluyla çip üzerinde üretilen ışığın yönlendirilmesi mümkündür. Akkor ampullerin ürettiği ışığın belirli bir yönde odaklanması sadece reflektör gibi yardımcı parçalar ile sağlanabilmektedir. Akkor ampullerden çıkan ışığın bir reflektör ile toplanarak belirli yönde yansıtılması gereklidir.

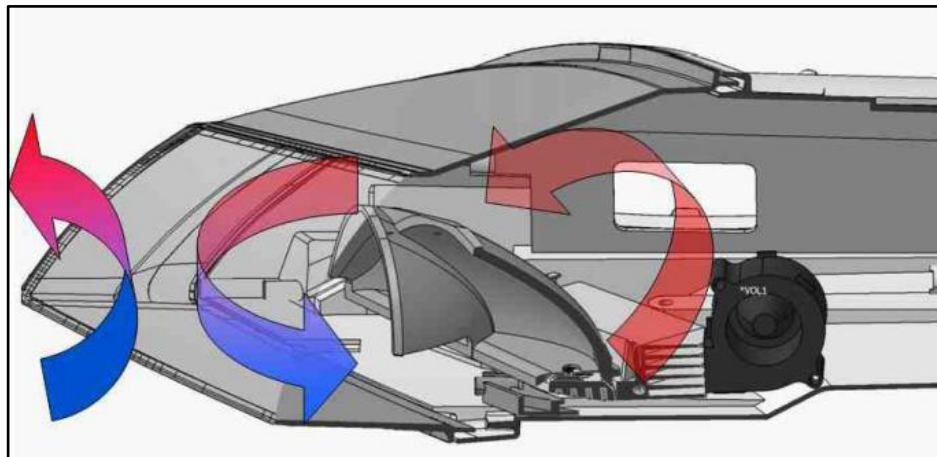
3.9.2.LED'lerin Dezavantajları

Wikipedia internet sitesinde, LED'lerin diğer ışık kaynaklarına göre sahip oldukları dezavantajlar açıklanmıştır (Anonim 2014a).

- LED'ler ürettikleri birim ışık miktarı fiyatı göz önüne alındığında akkor ampullerden daha pahalı ışık kaynaklarıdır.
- LED'lerin performansı sıcaklığa şiddetle bağlıdır. LED'lerin yüksek sıcaklıklarda çalışması LED'lerin ömür ve performanslarının azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle LED'ler, akkor ampullerden farklı olarak termal yönetime ihtiyaç duyarlar. LED'lerin ömür ve performanslarının optimum düzeyde tutulması için genellikle kanatçıklar kullanılmaktadır.
- LED'ler belirli bir eşik voltaj değeri sağlanmadan ışık üretemezler. Bu nedenle LED'e özgü eşik voltaj değerinin (On Voltage) üzerinde potansiyel fark uygulandığından emin olunmalıdır.
- LED'ler, akkor ampuller gibi sabit voltaj kontrolü ile sürülemezler. Mutlaka akım kontrolü ile çalıştırılmaları gereklidir.
- LED'ler, akkor ampuller gibi küresel ışık dağılımı sağlamazlar.LED'ler lambertiyan ışık dağılımı sağlarlar (LED'in üzerine monte edildiği PCB düzleminin normali doğrultusunda maksimum ışık akısı sağlanırken PCB düzlemi doğrultularında minimum ışık akısı sağlanmaktadır) ve küresel ışık dağılımı istenen uygulamalarda çok tercih edilmezler.
- Akkor ampullerin çalıştırılmasında elektriksel kutupların önemi yoktur. LED'ler için ise elektriksel kutuplar çok önemlidir ve kutupların ters bağlanması LED'in çalışmamasına veya zarar görmesine neden olabilir. Bu nedenle LED

kutuplarının veya besleme kutuplarının olası ters bağlanması gibi durumlara karşılık önceden önlem alınmalıdır. Bu durum ise LED sürücü devresinin maliyetini artıran bir faktördür.

- Artan elektrik akımı LED'lerin ışık etkenliğinin (light efficacy) azalmasına ve daha fazla ısınmalarına sebep olmaktadır. Bu nedenle LED'lerin genel kullanım akımı 350 mA civarındadır.
- Otomotiv sektöründe tamamen LED'lerin kullanılmasıyla üretilen farlarda karşılaşılan en büyük sorunlardan biri, soğuk ortam koşullarında farın ön kısmında oluşan buz tabakasının ve buğunun çözülmesinin zorluğudur. Halojen ve akkor ampullerin kullanılmasıyla üretilen farlarda, farın ön kısmındaki lens ampullerden çıkan radyasyon ile doğrudan etkileşim halindedir. Bu nedenle kısa sürede ışık çıkışını engelleyen ön kısımdaki buz tabakası ve buğu kolaylıkla çözülebilir. LED'lerde radyasyon olarak atılan ısı enerjisi akkor ve halojen ampullere göre çok daha az olduğu için bu tür ürünlerde farklı mekanizmalar tasarlanmalıdır. LED'ler ürettikleri ısının %95'ini iletim yoluyla transfer ederler ve bu nedenle LED'lerin lehimle sabitlendikleri bölgelerden doğrudan temas yoluyla alınan ısı enerjisi bir fan yardımı ile far içinde ısının gerekli olduğu bölgelere aktarılabilir. Şekil 1.27'de LED'lerin ürettiği ısının farın lens bölümüne zorlanmış taşınım yoluyla transfer edildiği görülmektedir (Fratty ve ark. 2012).



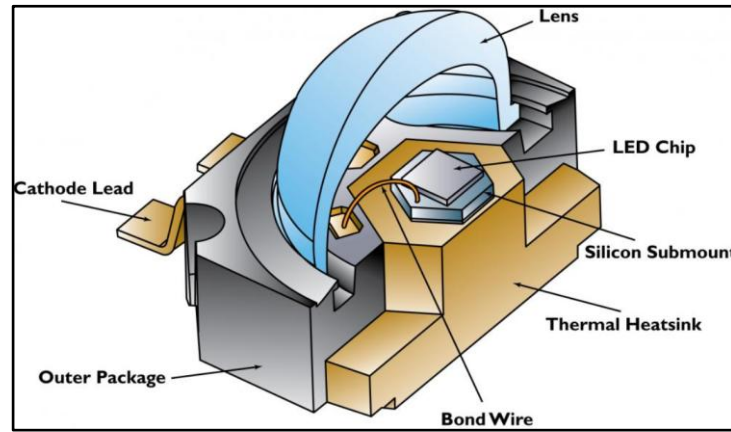
Şekil 1.27. Bir LED'li farda lens üzerinde oluşabilecek olan buz tabakası ve buğunun ortadan kaldırılması için izlenen yöntem (LED'lerden temas yoluyla alınan ısı enerjisi

fan yardımıyla farın iç kısmındaki uzak bölgelere de ulaştırılmaktadır)(Fratty ve ark. 2012)

4. MATERYAL VE YÖNTEM

4.1. Tezin Amacı

Bu tezin amacı, LED'li aydınlatma sistemleri için en önemli sınırlayıcı etken olan sıcaklık dağılımının bir sonlu hacimler hesaplama yazılımı yardımıyla simüle edilmesidir. Bu yöntemle bir LED-PCB sisteminin termal performansı incelenerek LED çip sıcaklığının değeri bulunmaya çalışılacaktır. Şekil 2.1'de bir LED'in kesit görünümü detaylı şekilde gösterilmiştir. Ardından termokupllar ile söz konusu incelenen sistem üzerinde oluşan sıcaklık değerleri ölçülecek ve nümerik yöntem ile bulunan sonuçların test verileriyle uyumluluğu kontrol edilecektir. Bu şekilde, yapılmış olan nümerik çalışmanın doğruluk derecesi tespit edilecektir.



Şekil 2.1. Bir LED'in kesit görünümü (Anonim 2014f)

4.2. Tezin Önemi

Yukarıda açıklandığı gibi LED'lerin geleneksel ampullere göre sahip oldukları birçok avantaj vardır. Boyutlarının çok küçük olması otomotiv sektöründe göze hoş gelen tasarımların daha kolay şekilde gerçekleştirilebilmesini mümkün kılmaktadır. LED'ler otomotiv sektöründe hali hazırda çoğunlukla arka stop lamba ve far üretiminde kullanılmaktadır. Bu nedenle her geçen gün LED'lerin otomotiv aydınlatma endüstrisinde kullanımı daha da yaygınlaşmaktadır. Şekil 2.2'de AUDI marka otomobilde kullanılan fardaki DRL ünitesine ait LED'ler görülmektedir.



Şekil 2.2.AUDI marka otomobil farındaki DRL ünitesinin görünümü (Anonim 2014g)

LED'lerin sahip olduğu en büyük dezavantaj ise, performanslarının büyük oranda sıcaklıkla ilişkili olmasıdır. LED'in çip sıcaklığı LED'in ışık miktarını, rengini ve voltajını etkiler. LED'in çip sıcaklığını etkileyen faktörler ise çevrenin sıcaklığı, LED'in elektriksel güç tüketimi, ışık verimliliği ve termal yönetim gibi faktörlerdir. LED'in ışık akısının sıcaklığa ($^{\circ}\text{C}$) göre değişimi, $\Phi(T_1)$ ve $\Phi(T_2)$ sırasıyla T_1 ve T_2 sıcaklıklarında çipin ürettiği ışık akısı olmak üzere (4.1) nolu ifade ile belirtilmiştir.

$$\Phi(T_2) = \Phi(T_1) * e^{-G * \Delta T_j} \quad (4.1)$$

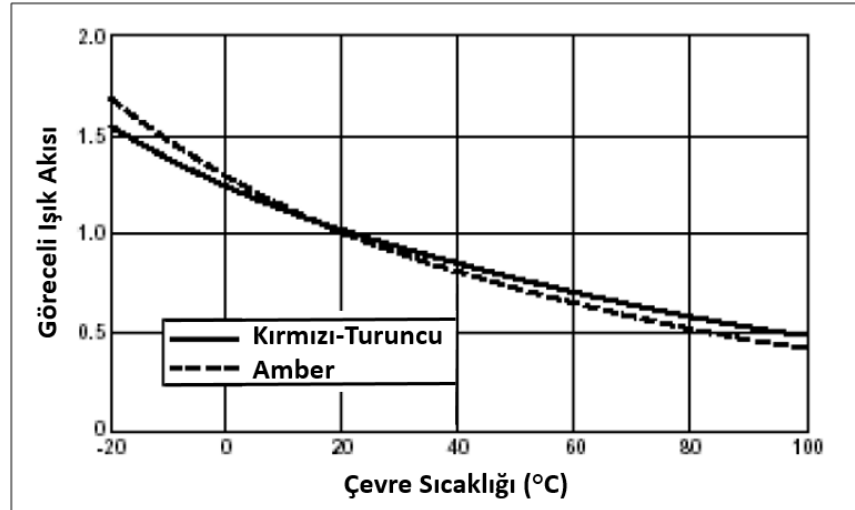
(4.1) nolu ifadede kullanılan değişkenler ve birimleri aşağıda gösterilmiştir.

$\Phi(T)$: Işık akısı (Lümen)

G: LED sıcaklık katsayısı ($V/^\circ C$)

T: Sıcaklık ($^\circ C$)

şekil 2.3'te ise artan dış ortam sıcaklığının işık akısının üzerindeki izafi etkisi gösterilmiştir.

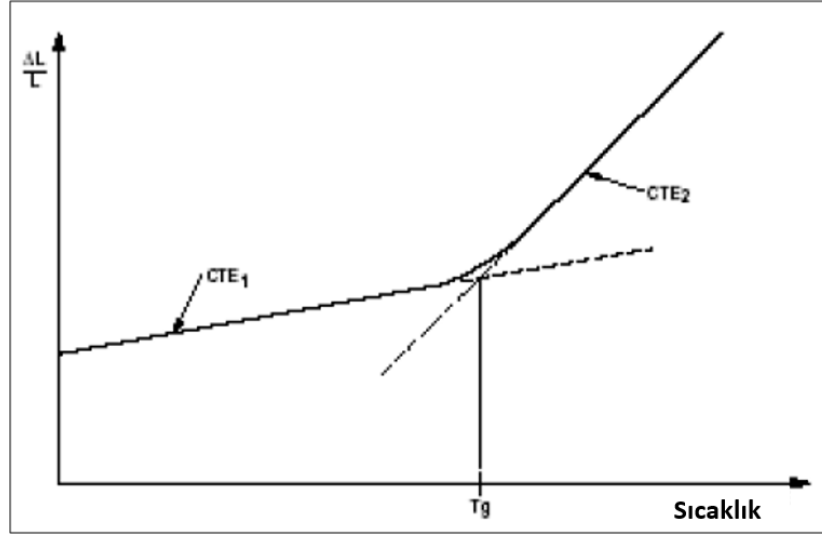


şekil 2.3. Artan ortam sıcaklığının LED işık akısı üzerindeki izafi etkisi (Anonim 2002)

Artan ip sıcaklığı, LED'in işık akısını hızlı şekilde dūřürdüęü gibi LED'in üretmekte olduğu işığın baskın dalga boyununkayarak artmasına da sebep olmaktadır. Bu durum doğrudan üretilen işığın enerjisinin ve doğrudan renginin de değişmesine sebep olmaktadır. Işığın baskın dalga boyunun ip sıcaklığına göre kabaca değişimi, $\lambda_d(T_1)$ ve $\lambda_d(T_2)$ sırasıyla T_1 ve T_2 sıcaklıklarındaki nanometre cinsinden baskın dalga boyları olmak üzere (4.2) nolu ifade ile açıklanmıştır.

$$\lambda_d(T_2) = \lambda_d(T_1) + \Delta T_j \cdot (0,1) \quad (4.2)$$

Bu ifadeye göre her 10 °C çip sıcaklığı artışının baskın dalga boyunda 1 nanometre kaymaya yol açacağı söylenebilir. Otomotivde genellikle arka sinyalizasyon ürünlerinde kullanılan kırmızı renkli ışık veren üniteler (fren, sis ve park üniteleri) için artan sıcaklıkla oluşan renk değişimi, regülasyonlar tarafından izin verilen renk aralığı çok geniş olduğu için çok kritik değilken, amber renkli sinyal lambası uygulamalarında bu tür dalga boyu kaymalarının göz önüne alınması mutlaka gereklidir. Bunların yanında artan çip sıcaklığının getirmiş olduğu ciddi mekanik sıkıntılar da mevcuttur. LED paketindeki çipin ve yansıtıcı yüzeylerin üzerini örten şeffaf epoksi dolgu malzemesi, yüksek sıcaklıklarda camsı geçiş sıcaklığı (Glass Transition Temperature) adı verilen bir davranışa sahiptir. Camsı geçiş sıcaklığından (T_g) önce cam benzeri katı bir malzeme olan şeffaf epoksi lens, geçiş sıcaklığının üzerindeki sıcaklıklarda lastik benzeri bir malzeme haline almaya baslar. Bu sırada termal genişleme katsayısında (Coefficient of Thermal Expansion - CTE) ani bir artış oluşur. Camsı geçiş sıcaklığının termal genişleme katsayısı üzerindeki etkisi Şekil 2.4'te gösterilmiştir. LED'in zarar görmesinin engellenmesi için LED çip sıcaklığı mutlaka sürekli olarak epoksi malzemenin camsı geçiş sıcaklığının (T_g) altında tutulmalıdır. Aksi takdirde T_g üzerindeki sıcaklıklarda etkili olmaya başlayan yüksek termal genişleme katsayısı LED'i sıcaklık değişimlerine çok daha duyarlı hale getirmekte ve epoksi dolgu malzemesinin daha fazla genişip büzülmesine sebep olmakta ve bu durum LED'in daha hızlı şekilde yıpranmasına sebep olmaktadır. LED'in yıpranması konusundaki en önemli husus ise artan lens genişlemesinin epoksi malzeme içerisinde bulunan çip bağlantı kablosunun (wire bond) kopmasına sebep olabilmesidir.



Şekil 2.4.Camsı geçiş sıcaklığı ve termal genleşme katsayısının sıcaklıkla değişim grafiği (Anonim 2002)

Anlaşıldığı gibi LED’ler için kontrol edilmesi gereken en önemli parametrelerden bir tanesi sıcaklıktır (Anonim 2002).

4.3. Materyal

Bu tezin hazırlanması sırasında kullanılacak materyaller, nümerik çalışma ve test ile doğrulama aşamalarında kullanılacak olan materyaller olarak ikiye ayrılabilir. Nümerik çalışma sırasında LED’in ve PCB’nin ortam akışkanı ile etkileşimi ve bu şartlar altında gerçekleşen ısı transferinin hesaplanması amacıyla Mentor Graphics FloEFD V5 paket yazılımı kullanılmıştır. Aşağıda FloEFD yazılımına dair bilgiler verilmiştir (Anonim 2014b). Mentor Graphics firmasının bir ürünü olan FloEFD, Engineering Fluid Dynamics (EFD) olarak adlandırılan yeni nesil CFD yazılımlarından biridir. FloEFD, katı bir modelin analizlerde kullanılmasına olanak sağladığı için gereksiz zaman ve efor harcanmasını önler. FloEFD, SolidWorks, Catia, Inventor, NX ve diğer popüler CAD yazılımlarının arayüzünde çalışan, çok özellikli ve genel amaçlı bir CFD yazılımıdır. FloEFD yazılımı, üzerine sonradan ek lisanslar ile eklenebilen “Elektronik Soğutma”, “Yanma” ve “HVAC” modülleri gibi farklı fiziksel problemlere hitap eden farklı modüllere sahiptir ve modüler yapısı sayesinde optimum verimlilik sağlar. FloEFD yazılımını öne çıkaran özellikler şunlardır:

- Oldukça kısa sürede öğrenme ve kolay kullanım
- CAD yazılımı arayüzünde çalışma
- Otomatik ağ(mesh) yapısı oluşturma
- Otomatik laminar/geçiş/türbülans modelleme
- Otomatik yakınsama kontrolü
- Çözüm esnasında otomatik/manuel mesh iyileştirme (adaptive mesh)
- Tek tuşla word formatında rapor oluşturma

FloEFD yazılımı, Elektronik Kart Soğutma ve HVAC sektöründe dünyada lider konumundadır. FloEFD yazılımının sahip olduğu kabiliyetler ise şunlardır:

- 2D ve 3D akış modelleme
- Otomatik eleman ağı yaratma
- Dörtgensel eleman ağı uyarlama ve düzenleme
- Sürekli rejim veya zamana bağlı çözüm modelleme
- Non-newtonian akışkan kullanabilme
- Akışkan-katı malzeme, değişik fan ve kanatçık modellerinin bulunduğu geniş kütüphane
- k-ε ve I-t türbülans modelleme, ayrıca, laminar/geçiş/türbülans koşulları atayabilme
- Dönen geometrileri modelleme için kullanılan “Rotating Region” modülü
- Moving wall seçenekleri ile hareketi simüle edebilme
- Fluid Subdomain modülü ile akışkana batık model yaratabilme
- Elektronik soğutma ve bina analizlerinde kullanılmak üzere özel ısı transferi modülleri
- Akışkanlı veya akışkansız ısı transferi çözebilme
- Sınır tabaka olgusunu doğru simüle edebilme

FloEFD yazılımının sahip olduğu üstün özellikler ise şunlardır:

- CAD geometrisi ile çalışması
- Otomatik tetral eleman ağı oluşturma yeteneği
- Modifiye edilebilir çeper fonksiyonlarına sahip olması
- Otomatik laminar/geçiş/türbülans modelleme yeteneği
- Otomatik yakınsama kontrolü
- Tasarım çeşitliliği analizleri ve optimizasyon yeteneği
- Kullanıcı dostu arayüzüne sahip olması
- Hız vektörleri gösterimi
- Hız çizgileri gösterimi
- Akışkan sıcaklığı gösterimi

İncelenen PCB kartların elektronik tasarım çalışmaları Altium Designer yazılımı ile gerçekleştirilmiş ve elektronik komponentlerin tükettiği elektriksel güç değerleri de bu yazılım ile hesaplanmıştır. Altium Designer yardımıyla hesaplanan elektronik komponentlerin tükettiği elektriksel güç değerleri FloEFD yazılımında girdi değerler olarak kullanılmış ve bu şekilde termal simülasyonlar gerçekleştirilmiştir. Tezin doğrulama aşamasında ise PCB üzerinde sıcaklık ölçümleri yapılmıştır. Sıcaklık ölçümleri için kullanılan veri toplama cihazı GRAPHTEC firmasının geliştirdiği Graphtec GL820 Midi Logger cihazıdır. Şekil 2.5'te kullanılmış olan veri toplama cihazı görülmektedir.

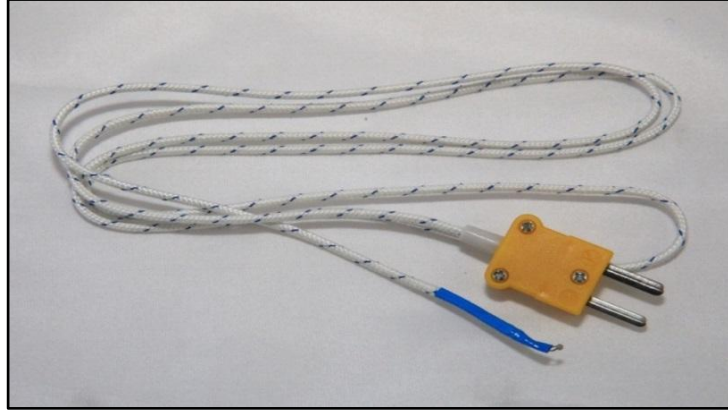


Şekil 2.5. Graphtec GL820 Multi Logger görünümü (Anonim 2014h)

Bu cihazın teknik özellikleriaşağıda sıralanmıştır;

- Bu cihaz 20 ölçüm kanalına sahiptir ve yapılabilecek bir miktar yatırım ile kanal sayısı 200'e kadar yükseltilebilmektedir.
- Harici bir bilgisayara Ethernet veya USB ara yüzleriyle bağlanabilmektedir ve aynı zamanda dahili hafızasına da kayıt yapabilmektedir. 2 GB dahili hafızaya sahiptir.
- Örnekleme aralığı 10/20/50/100/125/200/250/500 ms'den 1/2/5/10/20/30 s'ye kadar istenen frekansta ayarlanabilmektedir. Maksimum örnekleme hızı bir kanal için 100 Hz'dir.
- 900 g ağırlığındadır.
- 232x152x50 mm boyutlarındadır.
- K,J,E,T,R,S,B,N,W tipi termokupllar ile uyumludur.
- K tipi termokupllar için bu cihazın ölçüm hassasiyeti, -200 °C ile -100 °C arasında her +2 °C için $\pm 0,05\%$ iken -100 °C ile 1370 °C arasında ölçülen her +1 °C için $\pm 0,05\%$ 'tir.

Tez çalışması kapsamında yapılmış olan doğrulama testlerinde K tipi termokupllar kullanılmıştır. Şekil 2.6'da örnek bir K tipi termokupl görülmektedir.



Şekil 2.6.K tipi termokupl örneği (Anonim 2014ı)

4.4. Yöntem

Tezin, sayısal çalışma aşamasında sonlu hacimler yöntemi tabanlı olarak çalışan bir paket program kullanılmıştır. Bunun sebebini sonlu hacimler yönteminin sahip olduğu bazı avantajlardan bahsederek açıklayabiliriz. Sonlu hacimler yöntemini diğer yöntemlere üstün kılan başlıca özellikler şunlardır:

- Sonlu hacimler, boyutlarının esnekliği nedeniyle, karmaşık şekilli bir cismi temsil edebilir. Bu nedenle detaylı geometriler bu yazılımlar sayesinde kolayca incelenebilir.
- Değişik malzeme veya geometrik özellikleri bulunan problemler ek bir zorluk göstermez.
- Geometri, yükleme ve malzeme özelliklerindeki nonlineer değişimler kolaylıkla göz önüne alınabilir.
- Sınır şartları kolayca uygulanabilir.

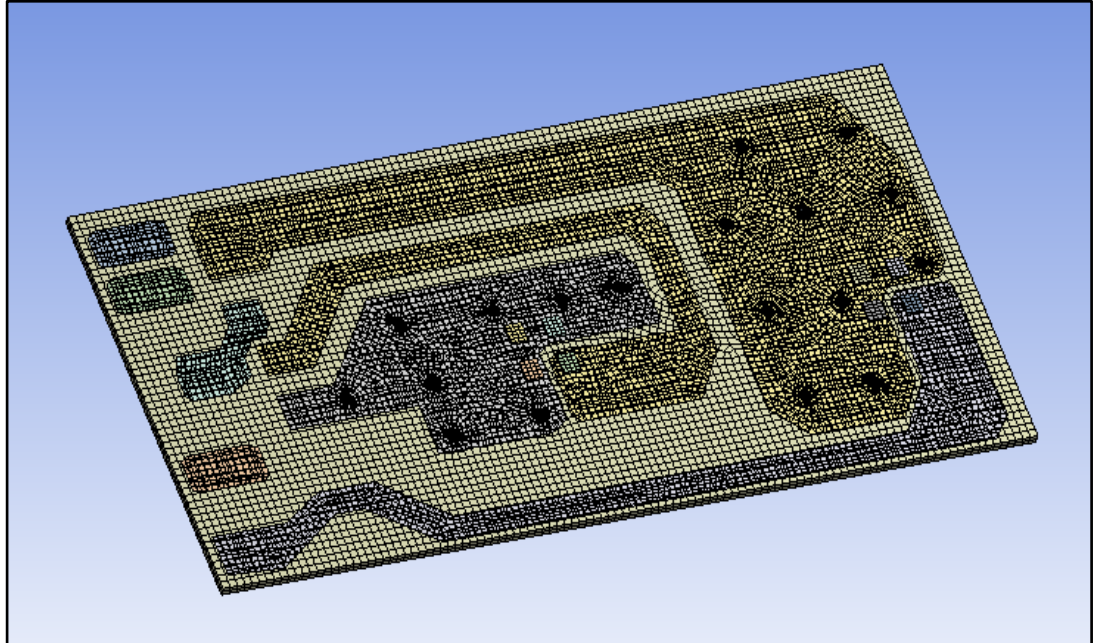
Sonlu hacimler tabanlı yazılımlarla çalışılırken izlenmesi gereken genel işlem adımları şu şekildedir;

- Öncelikle geometri üzerindeki ilgilenilmeyen veya hesaplamalarda kayda değer değişikliklere sebep olmayacak modifikasyonlar yaparak sonlu hacim ağ

yapısının daha kolay oluşturulabilmesi sağlanmalıdır. Bu işlem zorunlu olmamakla beraber çoğu zaman ileride karşılaşılabilecek birçok problemi engellemektedir.

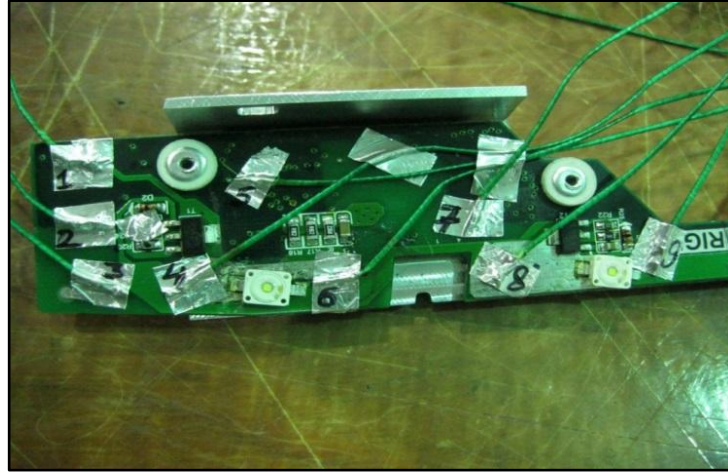
- Sonlu hacimler ağ yapısı oluşturulur.
- Malzeme, yük ve sınır şartı bilgileri yazılımda tanımlanır.
- Çözümleme işlemi yapılarak sonuçlar elde edilir.
- Ağ yapısından bağımsız çözüm bulma çalışması yapılır. Daha fazla sayıda çözüm elemanı kullanarak simülasyon sonuçlarının değişkenlik göstermediği optimum eleman sayısı elde edilir. Aksi takdirde bulunan sonuçlar yeterince gerçeği yansıtmayabilir.
- Ardından elde edilen sonuçlar değerlendirilir ve pratik hayattaki sonuçlarla kıyaslanır. Simülasyon sonuçlarının pratik sonuçlarla uyum göstermesi yüksek önem taşımaktadır. Aksi takdirde kullanılan girdi parametreler, ağ yapısı ve çözüm yöntemi sorgulanmalıdır. Simülasyon sonuçlarının pratik sonuçlar ile uyum göstermesi durumunda söz konusu yazılım, parametreler ve çözüm yöntemi ürün geliştirme safhasında çok faydalı bir araç olarak kullanılabilir.

Şekil 2.7’de bir PCB ye ait sonlu hacimler ağ yapısı görülmektedir.



Şekil 2.7.Örnek bir sonlu hacimler ağ yapısının görünümü

Nümerik yöntem yardımı ile bulunan sonuçlar mutlaka yapılacak testlerle doğrulanmalıdır. Çünkü tüm nümerik simülasyon yazılımları belirli kabuller ve iterasyon kesme hataları ile çalışmaktadırlar. Ama kullanıcı tarafından yapılan uygun sınır şartı uygulamaları ve yeterli kalitede ağ yapısı ile gerçeğe çok yakın makul sonuçlar verebilmelerinin yanı sıra aynı şekilde yapılan yanlış veya eksik sınır şartı uygulamalarıyla gerçekten çok farklı sonuçlar da verebilmektedirler. Bu nedenle yapılmış olan nümerik çalışmanın geçerliliğini kanıtlamanın tek yolu söz konusu sistemin aynı şartlar altında test edilmesi ve testlerden elde edilen sonuçların nümerik analiz sonuçlarıyla veya analitik çözümlerle karşılaştırılmasıdır. Yeterli doğrulamaların yapılması ve kullanılan çözüm parametrelerinin doğruluğundan emin olunmasından sonra bu sistem etkin şekilde mevcut ürün ve sonraki ürün geliştirme aşamalarında kullanılabilir. Bu sayede ürün geliştirme safhasında çok daha hızlı ve etkin şekilde problemler daha masrafsız olarak çözülebilmektedir. Şekil 2.8’de bir PCB ve LED sistemi üzerine yerleştirilmiş termokupllar görülmektedir.



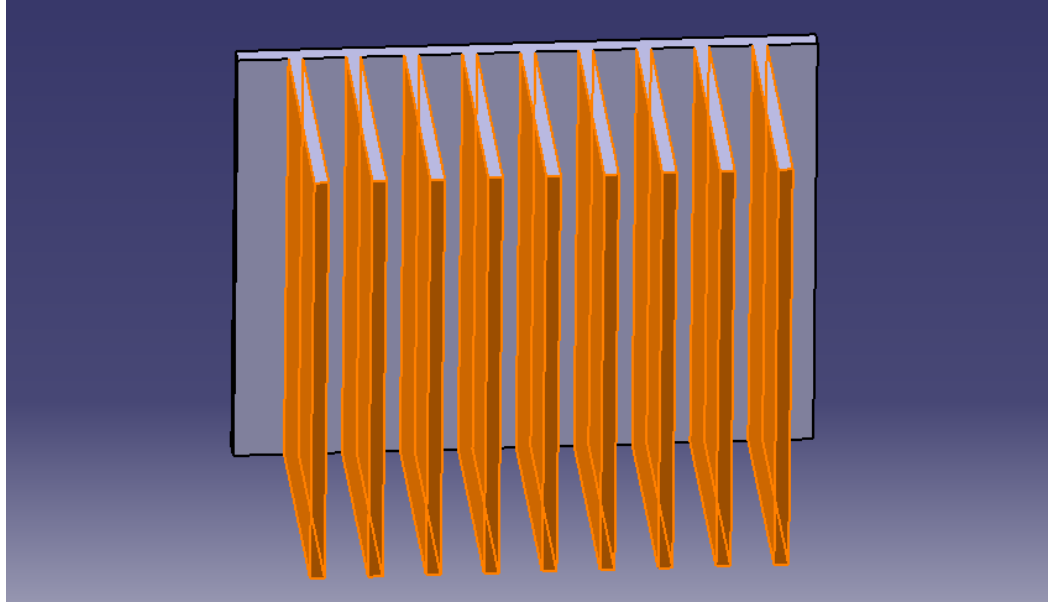
Şekil 2.8.Termokupllar ile üzerindeki sıcaklık değerleri ölçülen bir PCB ve LED sistemi

Aslında sonlu hacimler yöntemi tabanlı çalışan paket programların endüstride kullanılmasının en büyük amacı, prototip maliyetlerini düşürmek ve deneme çalışmalarının sayısını azaltmaktır. Bu nedenle söz konusu endüstride kullanılan

simülasyon prosedürünün mutlaka belirli testlerle doğrulanmış olması gerekmektedir. Bu şekilde bu yöntemin endüstride özellikle ürün geliştirme safhasında çok faydalı bir araç olacağı aşikârdır.

4.5. Ağ Yapısından Bağımsız Çözüm Elde Etmeyi Sağlayan Hücre Boyutlarının Tespit Edilmesi Çalışması

Nümerik analiz metotlarının kullanımı durumunda dikkat edilmesi gereken en önemli parametrelerden bir tanesi, oluşturulan ağ yapısındaki hücrelerin boyutlarıdır. Simülasyonu gerçekleştirilecek geometrinin boyutlarına göre bu değer de değişkenlik gösterir ve söz konusu geometrinin yapısı yeterince küçük hücreler ile ayrıklaştırılmalıdır. Aksi takdirde nümerik analiz sonucunda elde edilen sonuçların güvenilir olduğu iddia edilemez. Genellikle kabaca oluşturulmuş ağ yapısı, geometrinin detaylarının yeterince algılanamamasına ve nümerik hataların yüksek olmasına sebep olmaktadır. Hücre boyutlarının küçültülmesi yoluyla hücre sayısı artar ve bu nedenle söz konusu geometrinin daha detaylı şekilde nümerik olarak modellenmesi sağlanır. Artan hücre sayısı ise hassasiyeti artırırken aynı zamanda çözüm süresinin de artmasına sebep olur. Bu nedenle hücre boyutları ve simülasyon hassasiyeti arasında optimum bir nokta belirlemek gereklidir. Bu bölümde ise ilerideki bölümlerde incelenecek olan bir kanatçık tipi olan paralel düz sıralı artırılmış yüzey yapısına ait ağdan bağımsız çözüm verebilen optimum hücre boyutunun tespitine yönelik örnek çalışma açıklanmıştır. Aynı sistematik yaklaşım, simülasyonlar ile incelenen diğer geometriler için de gerçekleştirilmiş ve simülasyon sonuçlarının ağdan bağımsız çözüm verebildiği ve bu sayede güvenilirliği teyit edilmiştir. Şekil 2.9'da ortamdaki akışkan olan havaya doğal taşınım yoluyla transfer edilen toplam ısıl gücün ve ortalama ısı akısının tespit edildiği ve farklı ağ yapısı derecelerine göre kıyaslandığı seçilmiş kanatçık yüzeyleri görülmektedir.



Şekil 2.9. Ortamdaki havaya doğal taşınım yoluyla transfer edilen toplam ısıl gücün tespit edildiği ve bu değerin farklı ağ yapısı geometrileri için kıyaslandığı seçilmiş yüzeyler (Turuncu renkli yüzeyler seçilmiş yüzeyleri göstermektedir)

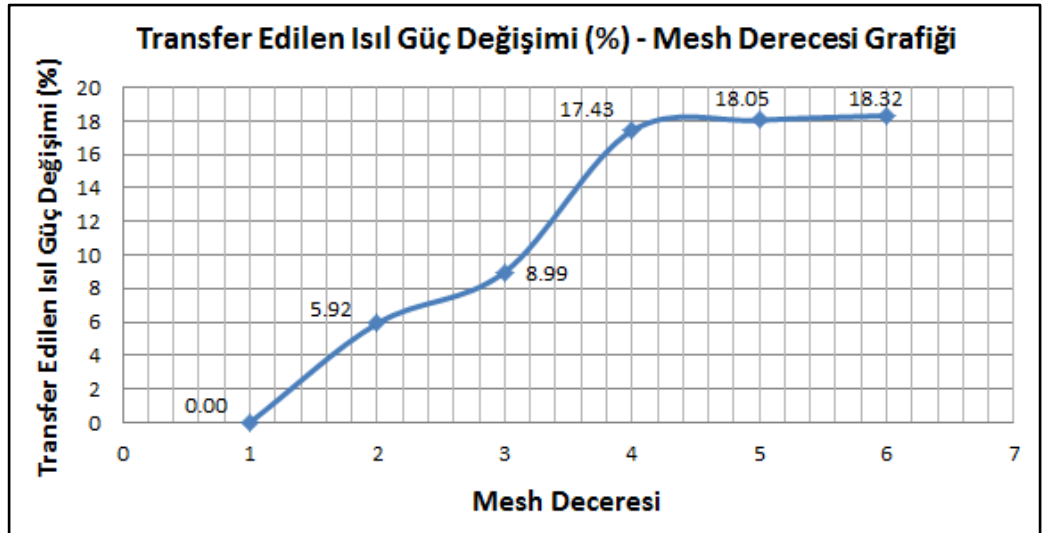
Çizelge 2.1’de ise, paralel sıralı dikdörtgen kesitli artırılmış yüzeylere sahip kanatçığın ısı transferi çözümü uygulamasında, azaltılan hücre boyutunun ve dolayısıyla artırılan hücre sayısının nümerik simülasyon sonuçları üzerindeki etkisi listelenmiştir.

Çizelge2.1. Seçilmiş yüzeylerden transfer edilen toplam ısıl güç ve ortalama ısı akısının 9,6 mm hücre boyutu ile elde edilmiş simülasyon sonuçları baz alınarak kıyaslandığı çizelge (Tespit edilen yüzdelik değişimler hem transfer edilen ısıl güç hem de ortalama ısı akısı değerleri için geçerlidir ve aynı değerlerdir)

Mesh Derecesi	Isı Akısı (W/m^2)	Transfer Edilen Isı (W)	Ortalama Eleman Boyutu (mm)	Toplam Hücre Sayısı	Isı Akısının Değişim (%)
1	625,283	27,688	9,6	1467	0,00
2	588,255	26,048	4,8	4773	5,92
3	569,081	25,199	2,4	22686	8,99
4	516,312	22,862	1,2	111285	17,43
5	512,449	22,691	0,6	613360	18,05
6	510,758	22,616	0,4	1749910	18,32

Bu uygulamada, azaltılan hücre boyutunun, nümerik simülasyon sonuçlarını kısmen değiştirdiği ve belirli bir hücre boyutunun altındaki değerlerin nümerik simülasyon sonuçlarına kararlılık kazandırdığı tespit edilmiştir. Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi ortalama hücre boyutu 9,6 mm değerinden 0,4 mm değerine kadar düşürülmüş ve seçilmiş kanatçık yüzeylerinden ortamdaki akışkan olan havaya transfer edilen ısıl gücün değişimi tespit edilmiştir. Ayrıca ısıl gücün değişimi, 9,6 mm hücre boyutu ile elde edilmiş nümerik simülasyon sonuçları baz alınarak yüzdelerik değişim olarak incelenmiştir. Yapılmış olan bu çalışma ile Çizelge 2.1’de görüldüğü gibi 1,2 mm hücre boyutundan daha küçük hücre boyutu değerlerinin, nümerik simülasyon sonuçlarında incelenen geometri için çok küçük yüzdelerik değişimlere sebep olduğu ve 1,2 mm’den daha küçük hücre boyutu değerleri kullanılmasının, simülasyon çözüm süresi ve ortaya çıkan hassasiyet arasındaki ilişki açısından makul olmadığı anlaşılmaktadır.

Şekil 2.10’da ise, 9,6 mm hücre boyutlarına ait nümerik simülasyon sonuçları baz alınarak oluşturulmuş olan, kanatçıklar üzerinden doğal taşınım yoluyla transfer edilen toplam ısıl gücün mesh derecesine göre değişim grafiği görülmektedir.



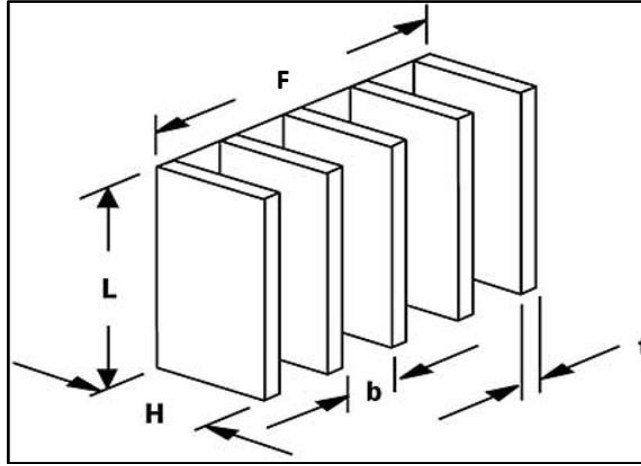
Şekil 2.10.Seçilmiş yüzeylerden ortamdaki havaya doğal taşınım yoluyla transfer edilen toplam ısıl gücün farklı mesh derecelerine göre değişimi (Sonuçlar 9,6 mm hücre

boyutuna sahip ağ yapısı ile elde edilen sonuçlar baz alınarak listelenmiş ve grafik üzerinde gösterilmiştir)

Görüldüğü gibi mesh derecesi 4 (1,2 mm hücre boyutu) ile elde edilen nümerik analiz sonuçları, mesh derecesi 1 (9,6 mm hücre boyutu) ile elde edilen nümerik analiz sonuçlarına göre mutlak değer olarak %17,43 değişim göstermiştir. Bu aşamadan sonra mesh derecesi 5 (0,6 mm) ve mesh derecesi 6 (0,4 mm) ile tekrarlanan nümerik simülasyonlardan elde edilen sonuçlar ise mesh derecesi 1 (9,6 mm hücre boyutu) ile elde edilen sonuçlara göre %18,05 ve %18,32 değişim göstermiştir. Yani ortalama hücre boyutunun 1,2 mm değerinden 0,6 mm ve 0,4 mm değerlerine düşürülmesi, elde edilen nümerik analiz sonuçlarının 1,2 mm hücre boyutu ile elde edilen nümerik analiz sonuçlarına göre %1'den daha az değişim göstermesine sebep olmuştur. Ayrıca 1,2 mm hücre boyutu ile elde edilen toplam hücre sayısı 111285 iken 0,6 mm ve 0,4 mm hücre boyutu değerleri ile elde edilen toplam hücre sayısı 613360 ve 1749910'dur. Görüldüğü gibi hücre boyutlarının küçülmesiyle elde edilen nümerik analiz sonucundaki transfer edilen toplam ısı güç değişimi %1'den az iken bu esnada toplam hücre sayısı oranı yaklaşık olarak 16 kat civarına kadar ulaşmaktadır. Bu çalışma neticesinde, 4 nolu mesh derecesi ile simüle edilmiş ağ yapısının, bu geometri için en optimum hücre boyutu değerine karşılık geldiği tespit edilmiştir.

4.6. Artırılmış Yüzeyler Arası Optimum Açıklık Değerinin Hesaplanması

Kanatçık üzerindeki artırılmış yüzeylerin boyutları, yüzey sıcaklıkları ve artırılmış yüzeylerin arasındaki uzaklık değeri kanatçığın performansını etkileyen ana parametrelerden birkaçıdır. Şekil 2.11’de bir kanatçık ve ilgili geometrik parametreleri gösterilmiştir.



Şekil 2.11. Dik yerleştirilmiş doğal taşınım kanatçığı

Kanatçığın artırılmış yüzeyleri arasındaki boşluklar olabildiğince fazla olursa, artırılmış yüzeyler boyunca oluşan doğal taşınımın sınır tabakaları birbirinin içine girmezler. Bu durumda her bir artırılmış yüzey üzerindeki ısı transfer katsayıları aynı koşulların geçerli olduğu tek başına dik şekilde yerleştirilmiş bir artırılmış yüzey üzerindeki ısı transfer katsayısı ile aynı olacaktır. Ama yine de, eğer artırılmış yüzey elemanları doğal taşınım hava akış doğrultusunda yeterince uzun ise (L), bitişik kanatlara ait sınır tabakalar birleşirler. Bu durumda kanatlar birbirine yaklaştıkça, bitişik kanatlar üzerindeki ısı transfer katsayısı değerleri tek kanatçık durumundaki değerlerin hızla altına düşmeye başlar. Aralarında b mesafesi bulunan sabit yüzey sıcaklığına sahip izotermal paralel kanatların yüzeylerinde oluşan ortalama ısı transfer katsayısı değerlerinin hesaplanması konusunda 1942 yılında Elenbaas W. çalışmalar yapmıştır. (5.1) nolu denklemden (5.7) nolu denkleme kadar açıklanmış olan bilgiler Elenbaas formülasyonlarına yönelik

çalışmalarıdır ve Simons R.E. tarafından Electronics Cooling dergisinde optimum kanatlar arası boşluk değeri hesaplamalarına yönelik bir çalışma olarak 2002 yılında yayınlanmıştır (Simons R.E., 2002). Elenbaas korelasyonlarına göre Nu ve Ra sayılarına ilişkin formülasyonlar aşağıda açıklanmıştır:

$$Nu = \frac{h*b}{k} = \frac{Ra}{24} * (1 - e^{-\frac{35}{Ra}})^{0,75} \quad (5.1)$$

Rayleigh sayısı (Ra) ise şu şekilde hesaplanır:

$$Ra = \frac{\rho^2 g \beta \Delta T L^3}{\mu k Pr} \quad h^4$$

$$Ra = Gr * Pr \quad (5.3)$$

(5.2) nolu denklemdeki ΔT , artırılmış yüzeyler üzerindeki sıcaklık ile ortam akışkanının sıcaklığı arasındaki farktır. Şekil 2.11’de gösterilen kanatçığın boyutları kullanılarak artırılmış yüzeyler arasındaki mesafe (b) kolaylıkla aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$b = \frac{F - N_f * t}{N_f - 1} \quad (5.4)$$

Bu hesaplamalarda kullanılan tüm simgeler ve karşılıkları ekler kısmında açıklanmıştır. Hesaplama yapabilmek için ortam sıcaklığı ve kanatçıkların artırılmış yüzey sıcaklığı belirtilmelidir. Kanatçık artırılmış yüzeylerinin sıcaklığı Elenbaas formülasyonlarına göre sabit kabul edilmiştir ve ortamdaki akışkan olan havanın termofiziksel özellikleri film sıcaklığındaki özellikler olarak tanımlanmıştır. Film sıcaklığı, ortamdaki havanın sıcaklığı ile artırılmış yüzeylerin sıcaklığının ortalaması olarak tanımlanır. Kanatçık üzerindeki artırılmış yüzeyler üzerinden birim zamanda transfer edilen ısı enerjisinin hesaplanması için ise artırılmış yüzeyler üzerindeki ısı transfer katsayısının yanı sıra

artırılmış yüzey elemanı sayısı ve kanatçığın toplam yüzey alanı da dikkate alınmalıdır. Bu durumda birim zamanda kanatçık artırılmış yüzeylerinden transfer edilen toplam ısı enerjisi (5.5) nolu denklem ile hesaplanabilir. Denklemdaki η ifadesi kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanlarının ortalama verimini ifade etmektedir.

$$Q_f = h * A * \Delta T = h * (2 * N_f * H * L * \eta) * (T_s - T_a) \quad (5.5)$$

Hesaplamalar sabit kanat yüzey sıcaklığı (izotermal) koşullarına göre yapıldığından dolayı kanatların dip ve uç noktaları arasında sıcaklık farkı yoktur ve bu nedenle artırılmış yüzeylerin verimliliği 1 kabul edilmelidir. Kanat sayısının artmasıyla artırılmış yüzeyler arasındaki boşluk miktarı (b) azalır ve kanat yüzeylerindeki ısı transfer katsayısı değerleri de düşer. Yani kanatçık üzerindeki toplam ısı transfer yüzey alanı artarken ısı transfer katsayısı (h) genellikle azalmaktadır. Bu nedenle en fazla ısı transferini sağlayan kanatlar arası optimum mesafe değeri hesaplanmalıdır. Elenbaas yaptığı çalışmalarda, optimum kanatlar arası mesafe değerinin, bitişik kanat yüzeyleri üzerindeki Ra değerinin 50 değerine sabitlenmesiyle bulunabileceğini kanıtlamıştır. Bu formülasyon aşağıda görülebilir:

$$\frac{b_{opt}}{L} * Gr_{opt} * Pr = \frac{b}{L} * \left(\frac{\beta * \rho^2 g_c C_p b^3 \Delta T}{\mu^2} \right) * \frac{\mu C_p}{k} \cong 50 \quad (5.6)$$

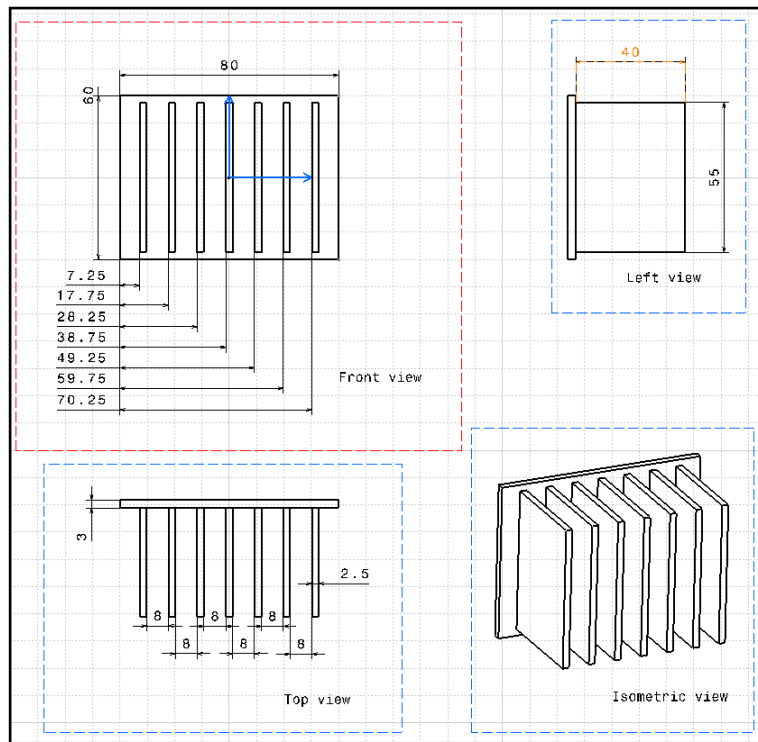
Gerekli düzenlemelerin yapılmasıyla optimum kanatlar arası mesafe değeri (5.7) nolu ifade ile hesaplanabilir.

$$b_{opt} = (2,659) * \left(\frac{\mu k L}{g_c \beta C_p \Delta T} \right)^{0,25} * \rho^{-0,5} \quad (5.7)$$

Yukarıdaki ifadelerden de anlaşılacağı gibi artırılmış yüzey elemanlarının yüksekliğinin (L) artması optimum artırılmış yüzey elemanları arası mesafe miktarının artmasına

sebepler olurken, kanat yüzey sıcaklığının artması ise optimum kanatlar arası mesafe miktarının azalmasına sebep olmakta ve daha fazla kanat kullanılabilmesine olanak sağlamaktadır. Bu çalışmada incelenen kanatçık ve artırılmış yüzey elemanı geometrisine ait teknik resim Şekil 2.12’de gösterilmiştir. İncelenmiş olan geometriye ait boyutlar şöyledir:

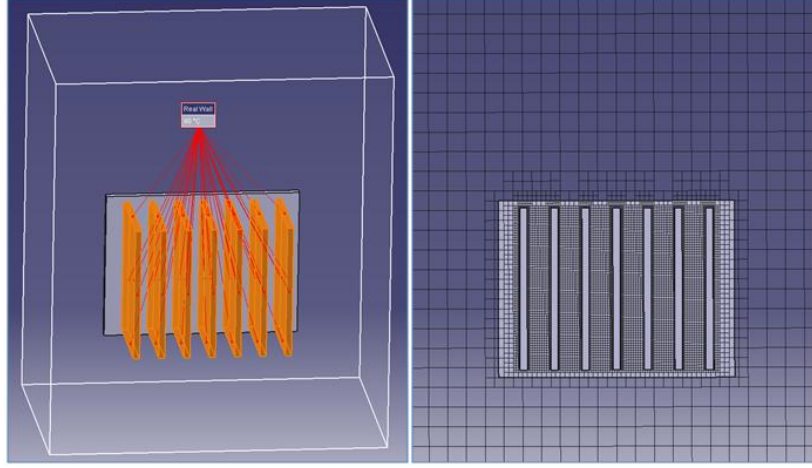
F: 80 mm L: 55 mm H: 40 mm t: 2,5 mm T_s : 80 °C T_a : 25 °C



Şekil 2.12.Kanatçık ve artırılmış yüzeylere ait teknik resim (Ölçüler mm’dir)

Yapılan hesaplamalar ve simülasyon çalışmalarında kullanılan kanatçık taban boyutları aynıdır. Kanatçık tabanının boyutları sabit tutularak artırılmış yüzey sayıları ve artırılmış yüzeyler arası mesafe değerleri (b) değiştirilerek farklı geometriler oluşturulmuştur. Kanatçık artırılmış yüzeyleri üzerindeki sıcaklık sabittir ve bu sıcaklık değeri 80°C olarak tanımlanmıştır. Sabit sıcaklık sınır şartının uygulandığı yüzeyler ve sonlu hacimler ağ yapısı kesit görüntüsü Şekil 2.13’te görülmektedir. Kanatçık

yüzeylerindeki sınır tabaka davranışının doğru hesaplanabilmesi için kanatlar arasındaki sonlu hacimler hücre sayısının diğer bölgelere oranla daha fazla olması sağlanmıştır.



Şekil 2.13. Artırılmış yüzeyler üzerine uygulanan sabit 80°C yüzey sıcaklığı sınır koşulu (solda) ve FloEFD simülasyonunda kullanılan sonlu hacimler ağı kesit görüntüsü (sağda)

Elenbaas formülasyonları yardımıyla optimum artırılmış yüzey elemanları arası mesafe değeri (b_{opt}) aşağıda hesaplanmıştır. Hesaplamalarda kullanılan termofiziksel özellikler havanın film sıcaklığında sahip olduğu termofiziksel özelliklerdir. Havanın film sıcaklığında sahip olduğu termofiziksel özellikler Yunus A. Çengel'in yayınlamış olduğu “Isı ve Kütle Transferi” isimli kitabındaki tablolardan alınmıştır (Cengel 2011c).

Söz konusu film sıcaklığı hesabı, termofiziksel özellikler ve optimum artırılmış yüzey elemanları arası mesafe hesaplaması aşağıda görülebilir.

$$T_f = (T_s + T_a)/2 = (80 + 25)/2 = 52,5^\circ\text{C} = 52,5 + 273,15 = 325,65 \text{ K}$$

$$\beta = 1/T_f = 1/(325,65) = 0,00307 \text{ (1/K)}$$

$$g_c = 9,81 \text{ m/s}^2 \text{ alınmıştır.}$$

$$\Delta T = T_s - T_a = 80 - 25 = 55^\circ\text{C}$$

$$L = 0,055 \text{ m}$$

Filmsıcaklığı 325,65 K olarak bulunmuştur. Ortamdaki akışkan olan havanın bir atmosfer basınçta film sıcaklığında sahip olduğu termofiziksel özellikler ilgili tablolardan alınmıştır ve aşağıda listelenmiştir (Cengel 2011c).

$$\rho = 1,08375 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1,9742E-5 \text{ Ns/m}^2$$

$$k = 0,02753 \text{ W/mK}$$

$$C_p = 1007 \text{ J/kgK}$$

$$Pr = 0,72215$$

$$\nu = 1,8225E-5 \text{ m}^2/\text{s}$$

İlgili parametreler yardımıyla söz konusu sistemin optimum kanat yüzeyleri arası mesafe değeri (5.7) nolu denkleme göre hesaplanabilir.

$$b_{\text{opt}} = 2,659 * \left(\frac{(1,9742E-5)*(0,02753)*(0,055)}{(9,81)*(0,00307)*(1007)*(55)} \right)^{0,25} * (1,08375)^{-0,5}$$

$$b_{\text{opt}} = 0,00525 \text{ m} = 5,25 \text{ mm}$$

Söz konusu sınır şartlarında Şekil 2.12'deki kanatçık geometrisinin optimum artırılmış yüzeyler arası mesafe değeri 5,25 mm olarak hesaplanmıştır. Artırılmış yüzeyler üzerindeki ısı transfer katsayısı ve bu yüzeyler üzerinden doğal taşınım yoluyla ortama transfer edilen termal gücün miktarı, 8 mm artırılmış yüzeyler arası mesafe değerine sahip kanatçık için hesaplanmış ve örnek hesaplama olarak aşağıda gösterilmiştir. Öncelikle Ra sayısı ve ardından Nu sayıları hesaplanmalıdır. Bulunan Nu sayısı ve ısı transfer katsayısı yardımıyla artırılmış yüzeyler üzerinden transfer edilen termal güç kolaylıkla hesaplanabilir. İlgili hesaplamalar (5.1), (5.2), (5.3) ve (5.5) nolu denklemler yardımıyla yapılabilir.

$$Ra = \frac{(1,08375)^2 * (9,81) * (0,00307) * (1007) * (0,008)^4 * (55)}{(1,9742E-5) * (0,02753) * (0,055)} = 268,44$$

$$Gr = \frac{Ra}{Pr} = \frac{268,44}{0,72215} = 371,723$$

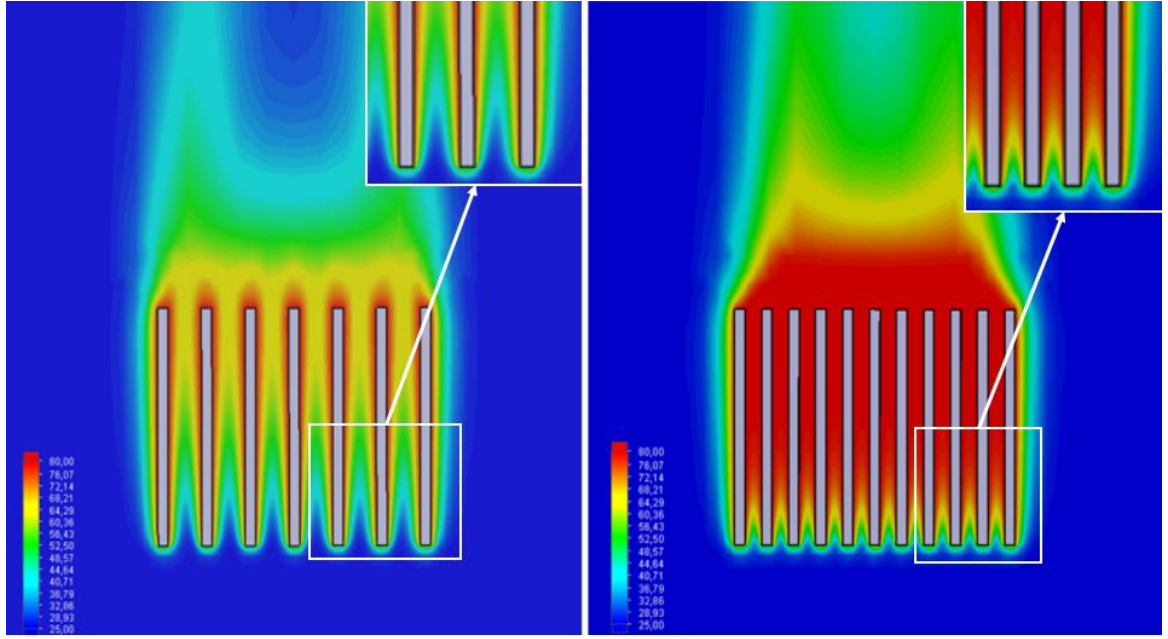
Düşey plakalar üzerindeki Gr sayısının 10^9 'dan küçük olması durumu plaka üzerindeki akışın laminar olduğunu gösterir. Yukarıda hesaplanan Gr sayısının değerinden anlaşılacağı gibi bu problemdeki akış tipi laminar akıştır.

$$Nu = \frac{(268,44)}{24} * (1 - e^{\frac{-35}{268,44}})^{0,75} = 2,307$$

$$h = \frac{Nu * k}{b} = \frac{(2,307) * (0,02753)}{0,008} = 7,938 \text{ W/m}^2\text{K}$$

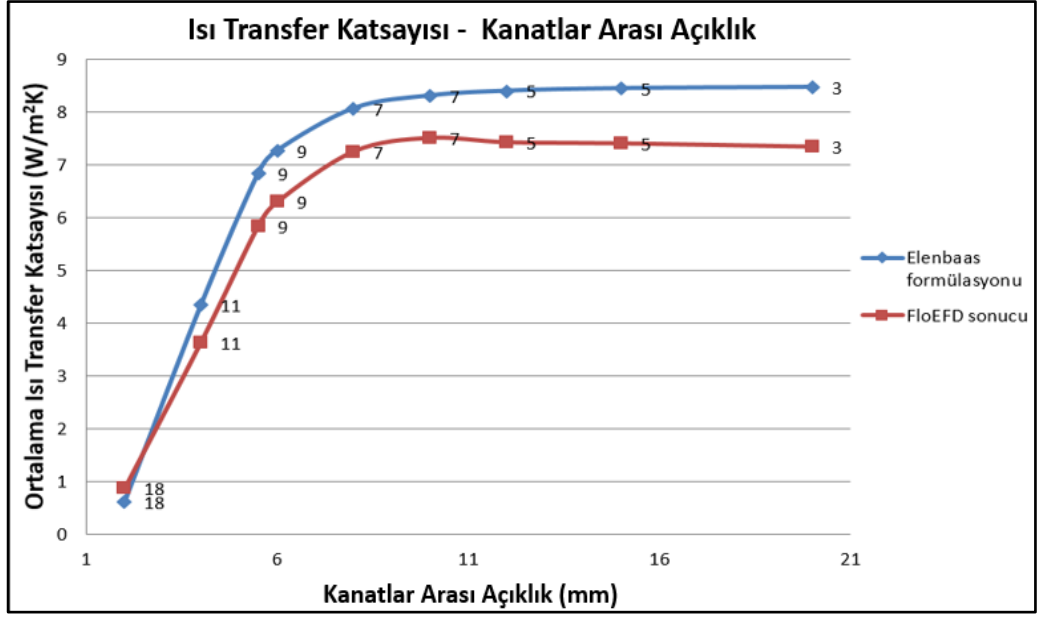
$$Q_f = 2 * (7,938) * 7 * (0,04) * (0,055) * 1 * (80 - 25) = 13,44 \text{ W}$$

Şekil 2.14 incelendiğinde, 8 mm artırılmış yüzeylerarası mesafe ve 4 mm artırılmış yüzeyler arası mesafe için yapılan her iki simülasyondan alınan kesit sıcaklık görüntülerinden de anlaşılacağı gibi, 8 mm artırılmış yüzeyler arası mesafe simülasyonunda kanatlar üzerinde oluşan termal sınır tabakalar birbirine girmemekte ve tüm kanat yüksekliği boyunca verimli ısı transferi sağlanabilmektedir. 4 mm artırılmış yüzeyler arası mesafe değeri simülasyonundan alınan kesit sıcaklık görüntüsüne bakıldığında ise kanatlar üzerindeki termal sınır tabakaların bariz şekilde birbiri içine girdiği ve bu nedenle sadece kanatların alt kısımlarının verimli şekilde ısı transferi yapabildiği görülmektedir. Bu durum kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey miktarının artmasının her zaman daha fazla ısı transferi sağlayamayacağını kanıtlamaktadır. Bu nedenle artırılmış yüzeyler arası mesafe ve artırılmış yüzey elemanı sayısı, dolayısıyla ısı transfer yüzey alanı arasındaki optimum nokta tespit edilmelidir. Bu şekilde mümkün olan en az malzeme miktarı ile birim zamanda en fazla ısı enerjisi transfer edilebilecek ve optimum soğutma sağlanabilecektir.



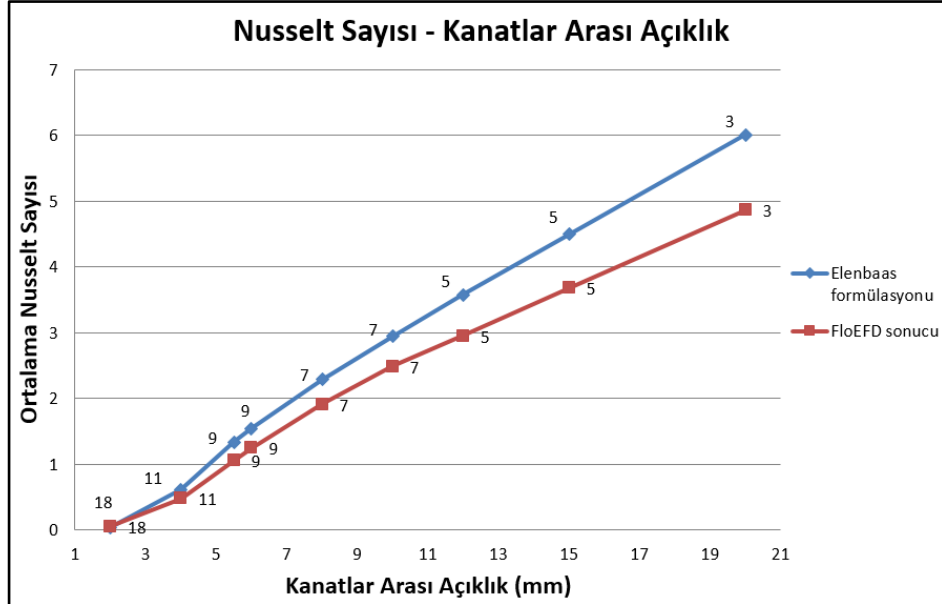
Şekil 2.14. Aynı koşullarda simüle edilen 8mm (solda) ve 4mm (sağda) artırılmış yüzey elemanları arası mesafe değerlerine sahip iki kanatçığın kesit sıcaklık dağılımı görüntüsü

Sırasıyla Şekil 2.15, Şekil 2.16 ve Şekil 2.17’de Elenbaas formülasyonları ve FloEFD yazılımıyla hesaplanmış olan artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayıları, Nu sayısı ve artırılmış yüzeylerden transfer edilen toplam termal gücün kanatlar arası mesafeye göre değişimlerinin kıyaslandığı grafikler gösterilmiştir. Görüldüğü gibi 2mm ile 8mm arasında değişen kanatlar arası mesafe değerleri, artırılmış yüzeyler üzerindeki ısı transfer katsayısı değerlerinin yüksek oranlarda değişmesine sebep olurken, 8mm’den yüksek kanatlar arası mesafe değerleri için ısı transfer katsayısı değerleri hemen hemen sabit kalmaktadır. Şekil 2.15, Şekil 2.16 ve Şekil 2.17 aşağıda görülmektedir.

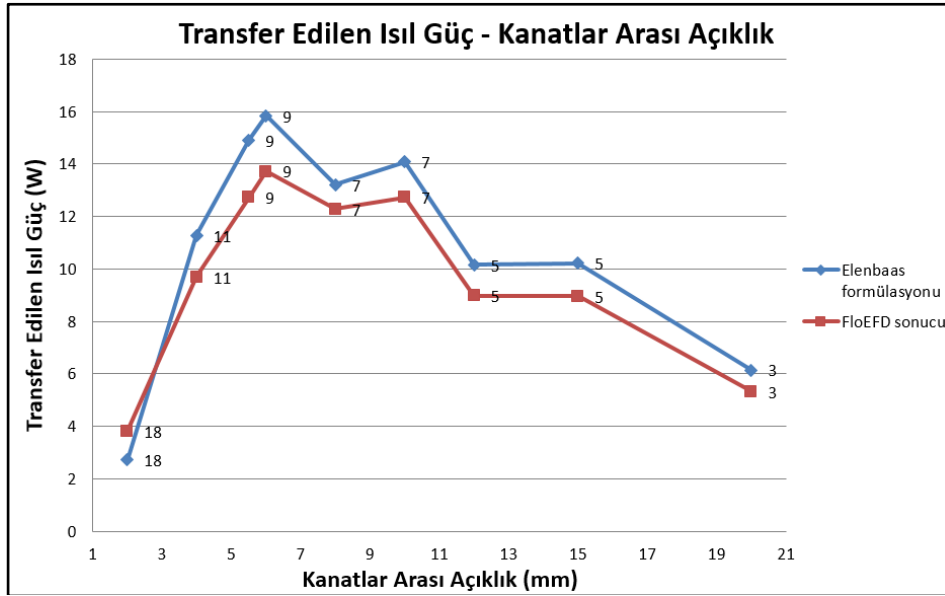


Şekil 2.15. Artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısının artırılmış yüzeyler arası mesafenin artışıyla değişimi (Elenbaas Formülasyonu) – Grafik çizgileri üzerinde bulunan sayılar ilgili el hesaplaması ve simülasyonda kullanılan kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanı sayısıdır (Artırılmış yüzeyler arası açıklık değeri arttıkça artırılmış yüzey elemanı sayısı azalmaktadır)

Kanatçık yüzeylerinde, farklı artırılmış yüzey elemanı sayılarına göre analitik yöntem (Elenbaas formülasyonu) ve FloEFD ile hesaplanan ortalama ısı transfer katsayısı değerleri arasındaki ortalama mutlak fark değeri %16,129 olarak tespit edilmiştir. Şekil 2.15'te görüldüğü gibi analitik yöntem ile hesaplanan ortalama ısı transfer katsayısı değerleri genellikle FloEFD ile hesaplanan artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısı değerlerinden daha yüksektir. Şekil 2.16 ve Şekil 2.17'de görüldüğü gibi aynı durum artırılmış yüzeyler üzerindeki Nu sayısı ve artırılmış yüzeylerden transfer edilen termal güç değerleri için de benzerdir. Şekil 2.16'da görüldüğü gibi yapılan el hesaplamaları ve simülasyonlar sonucunda 6mm kanat açıklığı değerinde artırılmış yüzeylerden maksimum ısı transferi yapıldığı tespit edilmiştir.



Şekil 2.16. Artırılmış yüzeyler üzerinde hesaplanan Nusselt sayısının artırılmış yüzeyler arası mesafe değerinin artmasıyla değişimi (Elenbaas Formülasyonu) – Grafik çizgileri üzerinde bulunan sayılar ilgili el hesaplaması ve simülasyonda kullanılan kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanı sayısıdır (Artırılmış yüzeyler arası açıklık değeri arttıkça artırılmış yüzey elemanı sayısı azalmaktadır)



Şekil 2.17. Artırılmış yüzeyler üzerindeki toplam ısı transfer gücünün artırılmış yüzeyler arasındaki mesafenin artışıyla değişimi (Elenbaas Formülasyonu) – Grafik çizgileri üzerinde bulunan sayılar ilgili el hesaplaması ve simülasyonda kullanılan kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanı sayısıdır (Artırılmış yüzeyler arası açıklık değeri arttıkça artırılmış yüzey elemanı sayısı azalmaktadır)

Şekil 2.17 üzerinde daha pürüzsüz grafikler görülmesi gerekirken bazı bölgelerde artıp azalmalar görülmektedir. 8-10 mm kanat açıklığı ve 12-15 mm kanat açıklığı eksen aralıklarında görülen düzgünsüzlükler bu değerler için artırılmış yüzey elemanı sayılarının söz konusu geometri için değişmemesi ve sabit kalmasından dolayı ortaya çıkmaktadır. Söz konusu geometriler için ortaya çıkan artırılmış yüzey elemanı sayıları grafik çizgileri üzerinde gösterilmiştir. Bu grafikler yorumlanırken mutlaka kanat sayıları da dikkate alınmalıdır. Şekil 2.15'e bakıldığında artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısının, bu çalışma kapsamında incelenen geometri için kanatlar arası mesafe değerinin 9 mm' den fazla olduğu durumlarda sabit kaldığı ve hemen hemen değişkenlik göstermediği görülmektedir. Şekil 2.16'ya bakıldığında ise kanat yüzeylerindeki ortalama Nusselt sayısının, kanatlar arası mesafe değerinin 9 mm' den fazla olduğu durumlarda da artmaya devam ettiği görülmektedir. Denklem (5.1)' de görülebildiği gibi Nusselt sayısı, kanat yüzeylerindeki ortalama ısı transfer katsayısının, kanatlar arasındaki mesafe ile çarpılarak kanatlar arasında hareket eden akışkanın ısı iletim katsayısına bölünmesi ile elde edilmektedir. Bu durumda Şekil 2.16'daki Nusselt sayısındaki sürekli artış, kanatlar arasındaki mesafenin sürekli artışıyla bağdaştırılabilir. Çünkü kanatlar üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısı bir değerden sonra sabit kalsa da kanatlar arasındaki mesafe değerinin artışı devam etmektedir. Bu nedenle Nusselt sayısının artmaya devam etmesi normaldir.

Elenbaas'ın yaptığı çalışmaların yanı sıra kanatlar arasındaki optimum mesafe tespiti konusunda 1984 yılında Bar-Kohen ve Rohsenow çalışmış ve yaptıkları çalışmalar sonucunda belirli korelasyonlar oluşturmuşlardır. Bu formülasyonlara göre Ra ve Nu sayıları aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$Ra = \frac{g_c * \beta * (T_s - T_a) * b^3 * Pr}{\nu^2} \quad (5.8)$$

$$Nu = \left[\frac{576}{\left(\frac{Ra * b}{L}\right)^2} + \frac{2,873}{\left(\frac{Ra * b}{L}\right)^{0,5}} \right]^{-0,5} \quad (5.9)$$

Yaptıkları çalışma sonucunda Nu sayısının 1,307 sayısına denk geldiği durumlarda optimum kanat arası açıklık değerinin tespit edilebildiğini kanıtlamışlardır.

$$Nu = \frac{h \cdot b_{opt}}{k} = 1,307(5.10)$$

$$b_{opt} = 2,714 * \left(\frac{b^3 * L}{Ra}\right)^{0,25}(5.11)$$

Nu sayısından ısı transfer katsayısı (h) tespit edilerek artırılmış yüzeyler üzerinden transfer edilen toplam termal güç (5.12) nolu denklem yardımıyla hesaplanabilir. Bar-Kohen ve Rohsenow'un optimum kanatlar arası mesafe hesaplamalarına dair formülasyonlar Yunus Çengel'in Heat and Mass Transfer kitabından alınmıştır (Cengel 2011a).

$$Q_f = h * A * \Delta T = h * (2 * N_f * H * L * \eta) * (T_s - T_a)(5.12)$$

Şekil 2.12'deki geometri ile ilgili boyutlar ve sınır koşulları kullanılarak 80 °C sabit kanat yüzey sıcaklığı için optimum artırılmış yüzey elemanları arası mesafe değeri (5.8), (5.9), (5.10), (5.11) ve (5.12) nolu denklemler yardımıyla aşağıda hesaplanmıştır. Ortamdaki havanın termofiziksel özellikleri film sıcaklığındaki termofiziksel özellikler olarak Yunus A. Çengel'in "Isı ve Kütle Transferi" kitabındaki ilgili tablolardan alınmıştır (Cengel 2011c). İlgili hesaplamalar aşağıda görülmektedir. Hesaplanan Ra, Nu ve h değerleri kanat yüzeyleri üzerindeki ortalama değerlerdir.

$$Ra = \frac{(9,81) * (0,00307) * (0,008)^3 * (55) * (0,72215)}{(1,8225E - 5)^2} = 1843,87$$

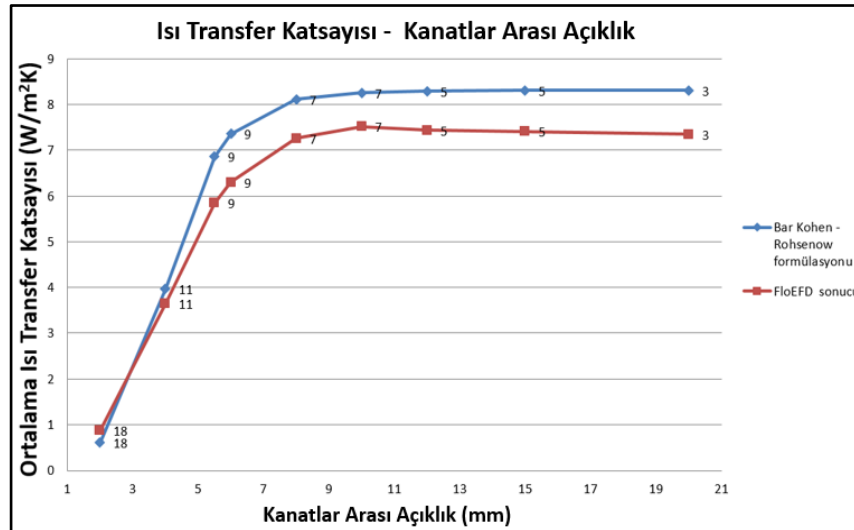
$$b_{opt} = 2,714 \left(\frac{0,008^3 * (0,055)}{1843,87}\right)^{0,25} = 0,00536 \text{ m} = 5,36 \text{ mm}$$

$$Nu = \left[\frac{576}{\left[\frac{(1843,87) \cdot (0,008)}{0,055} \right]^2} + \frac{2,873}{\left[\frac{(1843,87) \cdot (0,008)}{0,055} \right]^{0,5}} \right]^{-0,5} = 2,3955$$

$$h = \frac{Nu \cdot k}{b} = \frac{(2,3955) \cdot (0,02753)}{0,008} = 8,24 \text{ W/m}^2\text{K}$$

$$Q_f = h \cdot A \cdot \Delta T = 2 \cdot (8,24) \cdot 7 \cdot (0,04) \cdot (0,055) \cdot 1 \cdot (55) = 13,96 \text{ W}$$

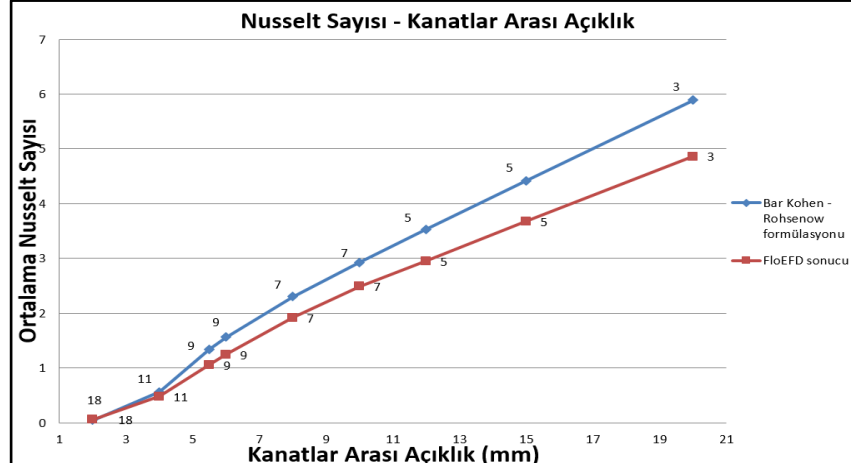
Sırasıyla Şekil 2.18, Şekil 2.19 ve Şekil 2.20’de Bar Kohen - Rosenhow formülasyonu yardımıyla ve FloEFD yazılımıyla hesaplanmış olan kanat yüzeylerindeki ortalama ısı transfer katsayıları, Nu sayısı ve kanat yüzeylerinden transfer edilen toplam termal gücün kanatlar arası mesafeye göre değişimlerinin kıyaslandığı grafikler gösterilmiştir.



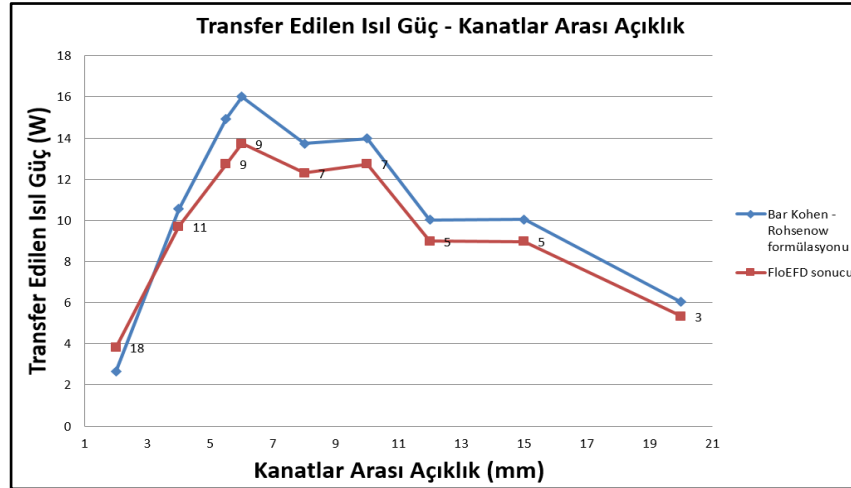
Şekil 2.18. Artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısının artırılmış yüzeyler arası mesafenin artışıyla değişimi (Bar Kohen – Rohsenow Formülasyonu) – Grafik çizgileri üzerinde bulunan sayılar ilgili el hesaplaması ve simülasyonda kullanılan kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanı sayısıdır (Artırılmış yüzeyler arası açıklık değeri arttıkça artırılmış yüzey elemanı sayısı azalmaktadır)

Kanatçık yüzeylerinde, farklı artırılmış yüzey elemanları arası açıklık değerlerine göre Bar Kohen - Rohsenow formülasyonu ve FloEFD yardımıyla hesaplanan ortalama ısı transfer katsayısı değerleri arasındaki ortalama mutlak fark değeri % 14,606 olarak tespit edilmiştir. Şekil 2.18’de görüldüğü gibi analitik yöntem ile hesaplanan ısı transfer

katsayısı değerleri genellikle FloEFD ile hesaplanan kanat yüzeylerindeki ortalama ısı transfer katsayısı değerlerinden daha yüksektir. Şekil 2.19 ve Şekil 2.20’de görüldüğü gibi aynı durum kanatçıklar üzerindeki Nu sayısı ve kanatçıklardan transfer edilen termal güç değerleri için de aynıdır.

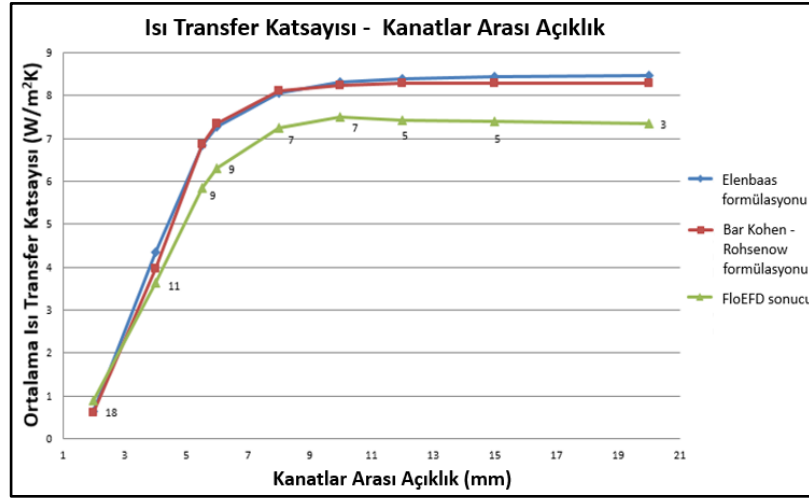


Şekil 2.19.Artırılmış yüzeyler üzerinde hesaplanan Nusselt sayısının artırılmış yüzeyler arası mesafenin artmasıyla değişimi (Bar Kohen – Rohsenow Formülasyonu) – Grafik çizgileri üzerinde bulunan sayılar ilgili el hesaplaması ve simülasyonda kullanılan kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanı sayısıdır

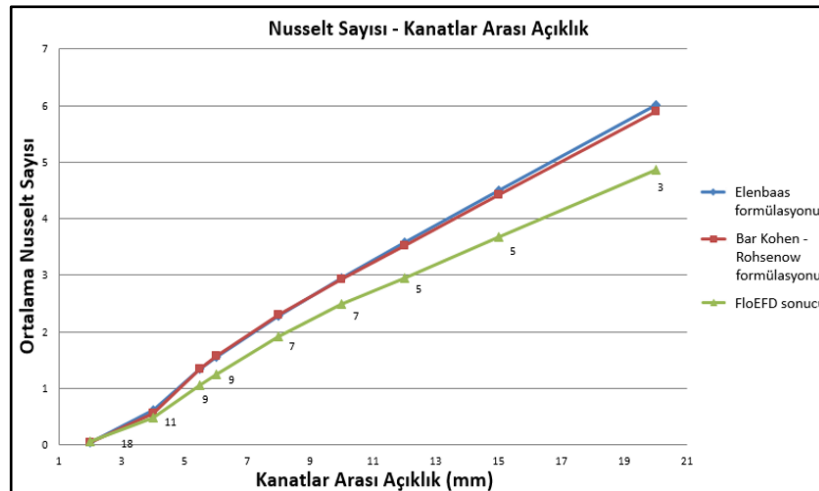


Şekil 2.20.Artırılmış yüzeyler üzerindeki toplam ısı transfer gücünün artırılmış yüzeyler arasındaki mesafenin artışıyla değişimi (Bar Kohen – Rohsenow Formülasyonu) – Grafik çizgileri üzerinde bulunan sayılar ilgili el hesaplaması ve simülasyonda kullanılan kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanı sayısıdır

Şekil 2.21, Şekil 2.22 ve Şekil 2.23' te Elenbaas formülasyonları, Bar Kohen – Rohsenow formülasyonları ve FloEFD yazılımıyla elde edilen sonuçlar hep bir arada kıyaslanmıştır.

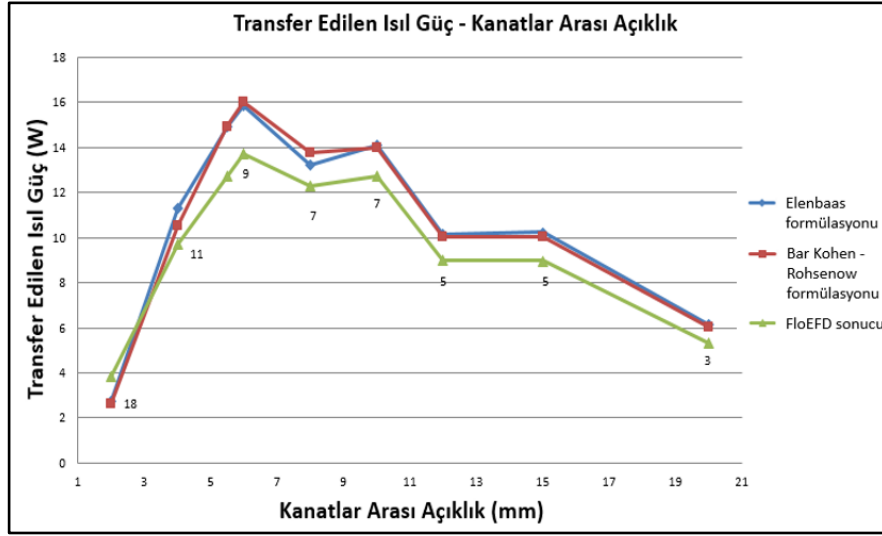


Şekil 2.21. Üç farklı yöntem ile hesaplanan artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısının artırılmış yüzeyler arası mesafenin artışıyla değişimi– Grafik çizgileri üzerinde bulunan sayılar ilgili el hesaplaması ve simülasyonda kullanılan kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanı sayısıdır (Artırılmış yüzeyler arası açıklık değeri arttıkça artırılmış yüzey elemanı sayısı azalmaktadır)



Şekil 2.22. Üç farklı yöntem ile hesaplanan artırılmış yüzeyler üzerindeki Nusselt sayısının artırılmış yüzeyler arası mesafenin artmasıyla değişimi– Grafik çizgileri

üzerinde bulunan sayılar ilgili el hesaplaması ve simülasyonda kullanılan kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanı sayısıdır



Şekil 2.23.Üç farklı yöntem ile hesaplanan artırılmış yüzeyler üzerindeki toplam ısı transfer gücünün artırılmış yüzeyler arasındaki mesafenin artışıyla değişimi– Grafik çizgileri üzerinde bulunan sayılar ilgili el hesaplaması ve simülasyonda kullanılan kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanı sayısıdır

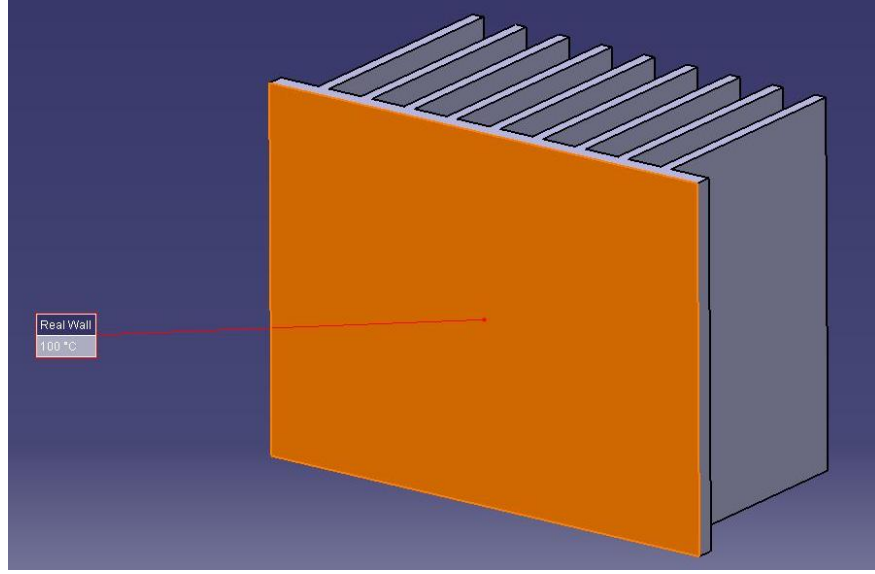
Yapılan bu çalışma sonucunda Bar Kohen – Rohsenow formülasyonlarının Elenbaas formülasyonlarına göre FloEFD yazılımıyla yapılan simülasyon çalışmalarına daha yakın sonuçlar verdiği görülmüştür.Şekil 2.21, Şekil 2.22 ve Şekil 2.23' e bakıldığında üç ayrı metod ile elde edilen verilerin kanatlar arasındaki açıklık değerinin artışıyla birbirlerine çok benzer davranış gösterdiği görülmektedir. FloEFD yazılımıyla elde edilen sonuçların her iki analitik yöntem ile büyük oranda örtüşmesi yapılan sayısal çalışmanın geçerliliğine referans olarak gösterilebilir.

5. BULGULAR VE TARTIŞMA

5.1. Kanatçık Tiplerinin Isı Transfer Performanslarının Artırılmış Yüzeyler Arası Mesafe Değerlerine Göre Kıyaslanması ve İncelenmesi

5.1.1. Yapılan analizlerde uygulanan sınır şartlarının açıklanması

Yapılan simülasyonlar ile dört farklı tip kanatçığın doğal taşınım koşulları altında termal performansları kıyaslanmıştır. Her kanatçık tipi için kullanılan malzeme özdeştir ve temel malzeme olarak Alüminyum 5052 alaşımı kullanılmıştır. Kanatçığın içinde bulunduğu ortam akışkanı havadır ve havanın sıcaklığı sabit 25 °C, basıncı 1 atm'dir. Kanatçıkların tüm yüzeylerinin herhangi bir boya vs. ile kaplanmadığı kabul edilmiştir ve bu nedenle neşretme katsayısı (emissivite) olarak ticari alüminyum malzeme yüzey emissivitesi tanımlanmıştır. Tüm kanatçıkların tabanına 100 °C sabit sıcaklık sınır koşulu tanımlanmış ve kanatçıkların ısı transfer performansı artırılmış yüzey tiplerine göre kıyaslanmıştır. Şekil 3.1'de sabit sıcaklık sınır koşulunun uygulandığı kanatçık taban yüzeyi görülmektedir.



Şekil 3.1.Sabit sıcaklık sınır koşulunun uygulandığı taban yüzeyinin görünümü

Kanatçık temel malzemesi olarak kullanılan Alüminyum 5052 alaşımının termofiziksel özellikleri FloEFD yazılımını kütüphanesinden alınmıştır ve aşağıdaki gibidir:

Yoğunluk (ρ): 2680 Kg/m³

Özgül ısı (C_p): 921 J/KgK

Isı iletim katsayısı (k): 140 W/mK

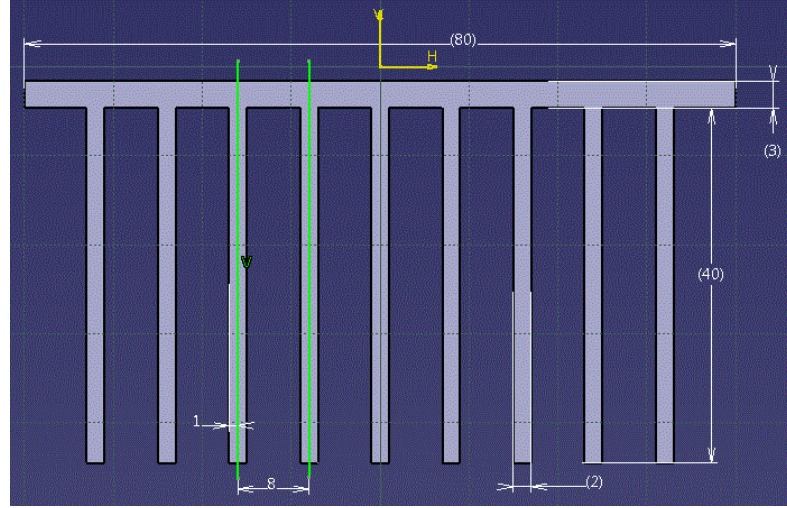
Kanatçığın yüzey neşretme katsayısı (emissivity): 0,09

5.1.2. Karşılaştırılan kanatçıkartırılmış yüzeygeometrilerinin tanıtılması

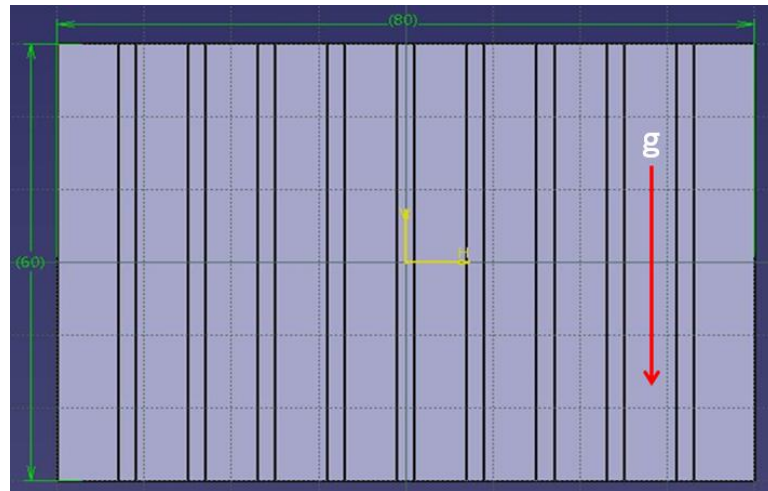
Dört çeşit artırılmış yüzey tipine sahip kanatçık geometrisi incelenmiştir. Her bir kanatçık ve ilgili artırılmış yüzey geometrisine ait geometrik detaylar aşağıda açıklanmıştır.

5.1.2.1.Dikdörtgen kesitli sıralı paralel artırılmış yüzey yapısı

Bu geometride kullanılan artırılmış yüzeylerin kalınlığı 2 mm'dir ve artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık değeri 4 mm'den 19 mm'ye kadar artırılarak bu artışın artırılmış yüzeyler üzerinden ortam akışkanına yapılan ısı transferi üzerinde oluşturduğu etki incelenmiştir. Şekil 3.2 ve Şekil 3.3'te dikdörtgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahip kanatçığın ölçüleri belirtilmiştir.

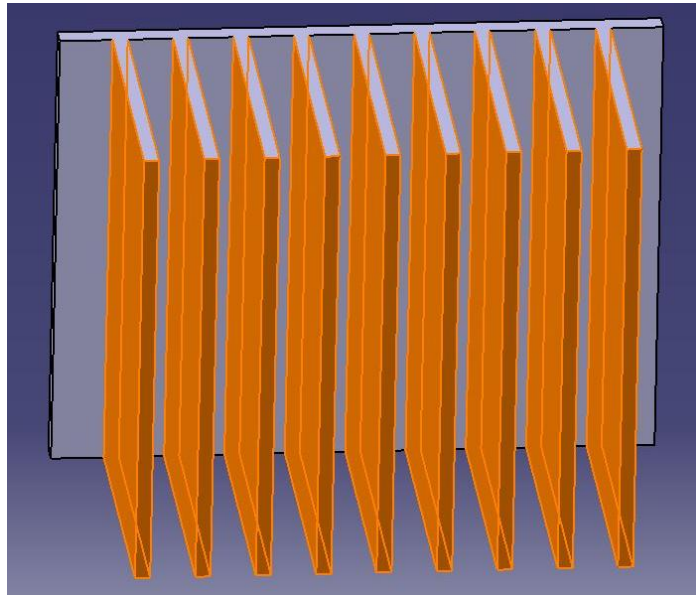


Şekil 3.2.Dikdörtgen kesitli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahip kanatçığın geometrik ölçüleri (üst görünüş) (Ölçüler mm'dir)



Şekil 3.3.Dikdörtgen kesitli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahip kanatçığın geometrik ölçüleri ve yerçekim ivmesinin yönü (ön görünüş) (Ölçüler mm'dir)

Şekil 3.3' te yerçekim ivmesinin yönü kanatçık ve artırılmış yüzey geometrisi üzerinde gösterilmiştir. Şekil 3.2' de 8 mm olarak görülen artırılmış yüzey elemanı merkezleri arasındaki uzaklık miktarı 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16 ve 19 mm olmak üzere sekiz farklı değer ile değiştirilerek kanatçık geometrileri modellenmiş, simüle edilmiş ve çıkan sonuçlar kendi aralarında ve diğer kanatçık geometrileriyle de kıyaslanmıştır. Bu kanatçık geometrisi üzerinde, diğer kanatçık geometrileri ile performans kıyaslaması yapmak için seçilen artırılmış yüzeyler Şekil 3.4' te gösterilmiştir.

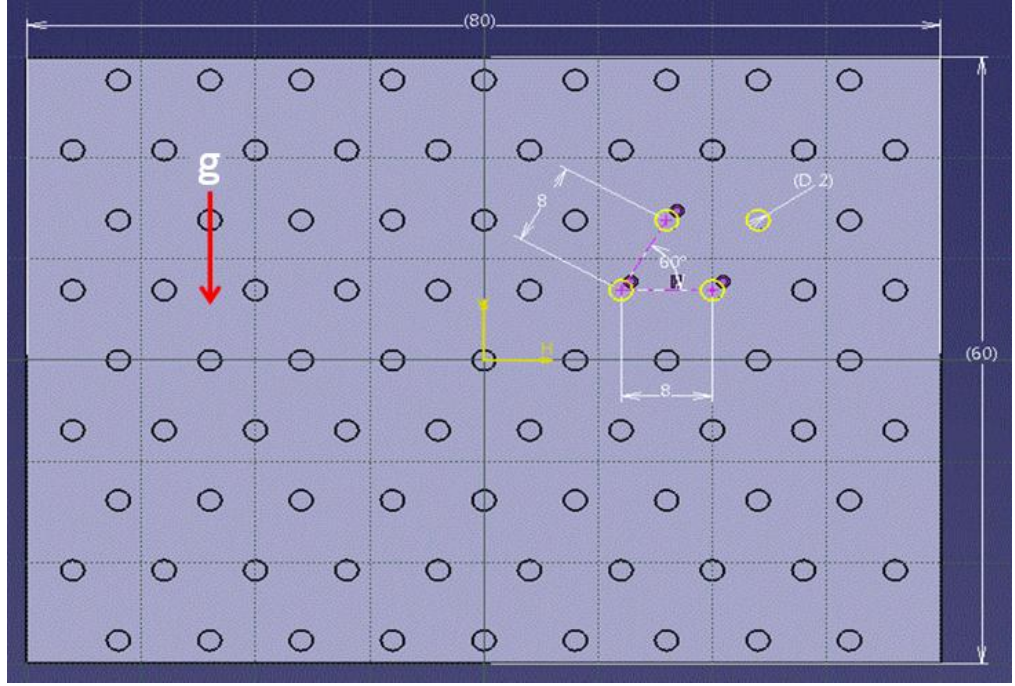


Şekil 3.4. Dikdörtgen kesitli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahip kanatçık geometrisi üzerinde sonuçların okunduğu ve diğer kanatçık geometrileriyle kıyaslanmanın yapıldığı seçilmiş yüzeyler (Kanatçıkların her iki tarafındaki geniş yüzeyler seçilmiştir)

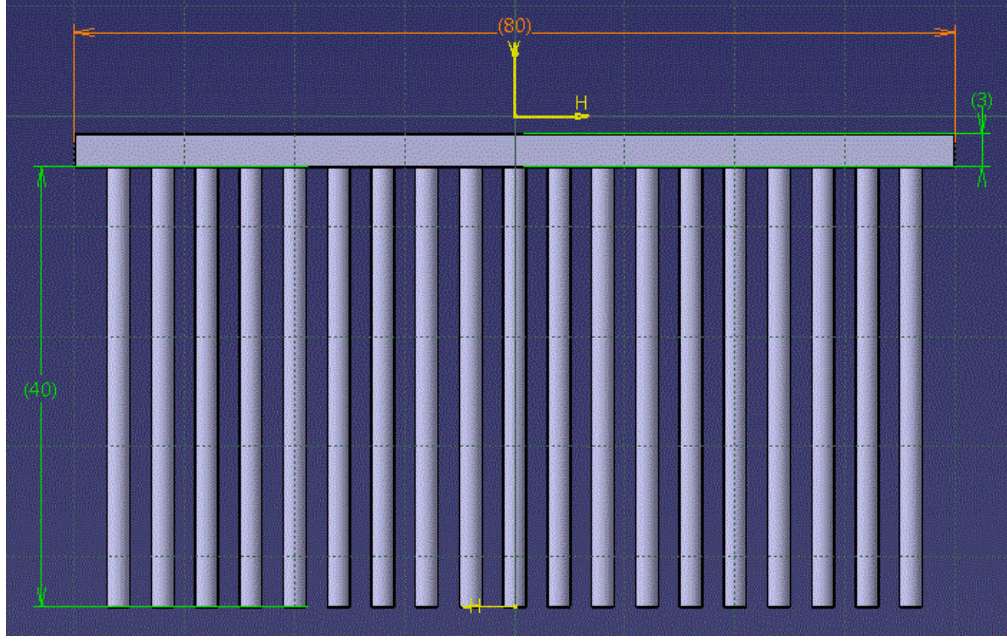
5.1.2.2. Dairesel kesitli pin (pin fin) artırılmış yüzey yapısı

Bu kanatçık geometrisinde kullanılan artırılmış yüzey elemanlarının çapı 2 mm'dir ve artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık değeri 4 mm'den 19 mm'ye kadar artırılarak bu artışın artırılmış yüzeylerden ortamdaki akışkana yapılan ısı transferi üzerinde oluşturduğu etki incelenmiştir. Aşağıdaki şekillerde ilgili kanatçık geometrisinin ölçüleri belirtilmiştir. Şekil 3.5' te görüldüğü gibi bitişik iki artırılmış

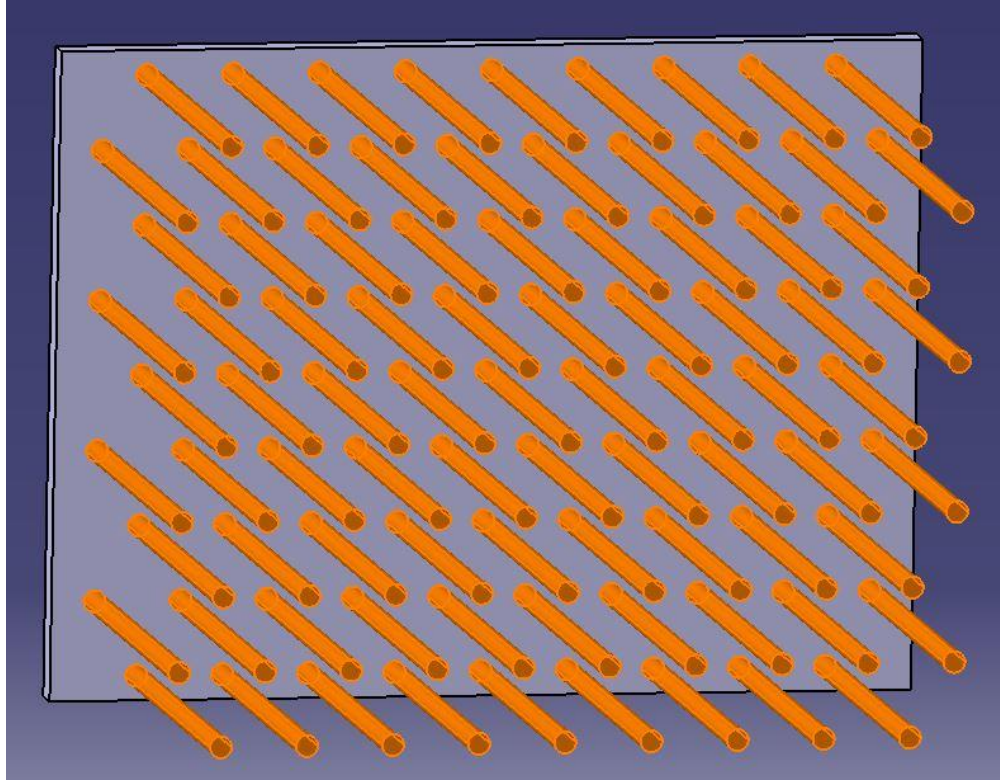
yüzey elemanı merkezleri çiftinin arasındaki açı 60 derecedir ve artırılmış yüzey elemanları dairesel kesitlidir. Şekil 3.5 ve Şekil 3.6’ da bu kanatçığa ait diğer ölçüler de gösterilmiştir. Bu kanatçık geometrisi üzerinde, diğer kanatçık geometrileri ile performans kıyaslaması yapmak için seçilen artırılmış yüzeyler Şekil 3.7’ de gösterilmiştir.



Şekil 3.5. Dairesel kesitli şaşırtmalı (staggered) pin artırılmış yüzey yapılı kanatçığın ölçüleri (ön görünüş) ve yerçekim ivmesinin yönü (Ölçüler mm’dir)



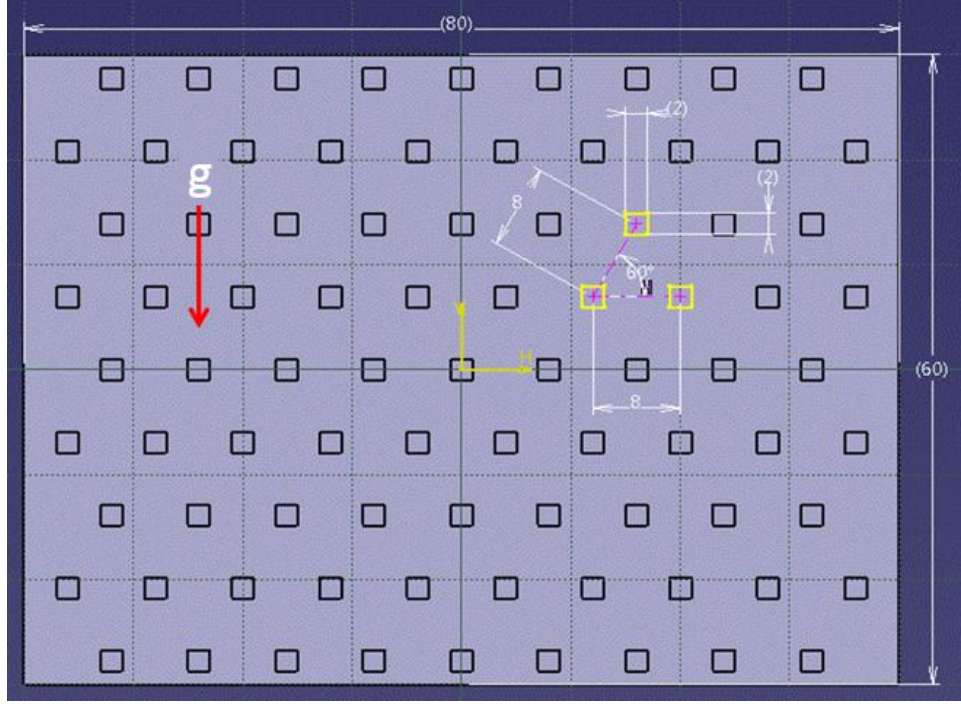
Şekil 3.6.Dairesel kesitli şaşırtmalı (staggered) pin artırılmış yüzey yapılı kanatçığın ölçüleri (üst görünüş) (Ölçüler mm'dir)



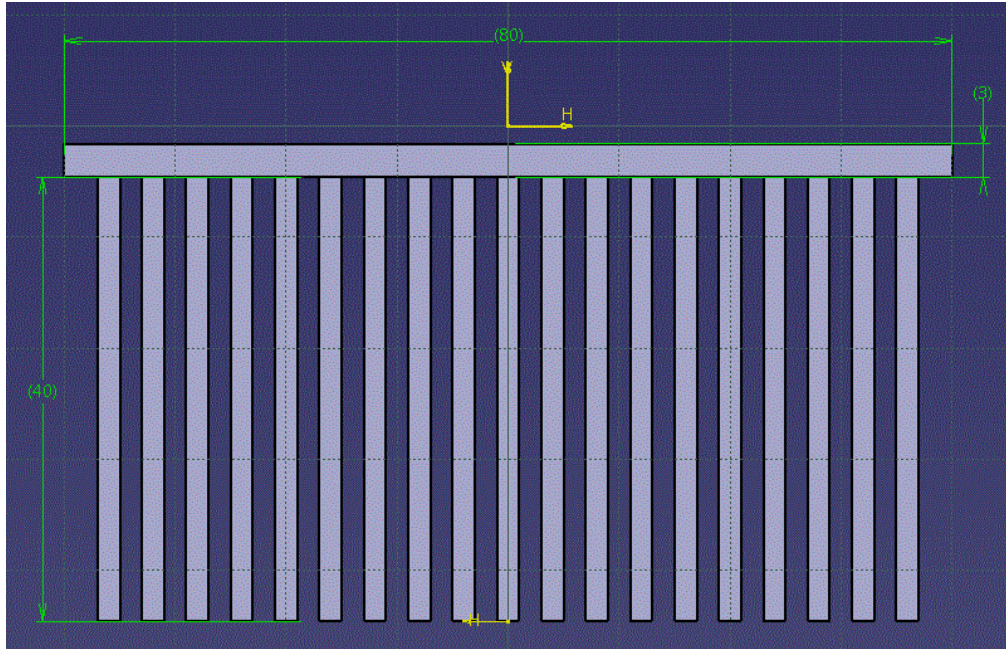
Şekil 3.7.Dairesel kesitli şaşırtmalı (staggered) pinartırılmış yüzey yapılı kanatçığın üzerinde sonuçların okunduğu ve diğer ısı kanatçık geometrileriyle kıyaslanmanın yapıldığı seçilmiş yüzeyler

5.1.2.3. Kare kesitli pin (pin fin) artırılmış yüzey yapısı

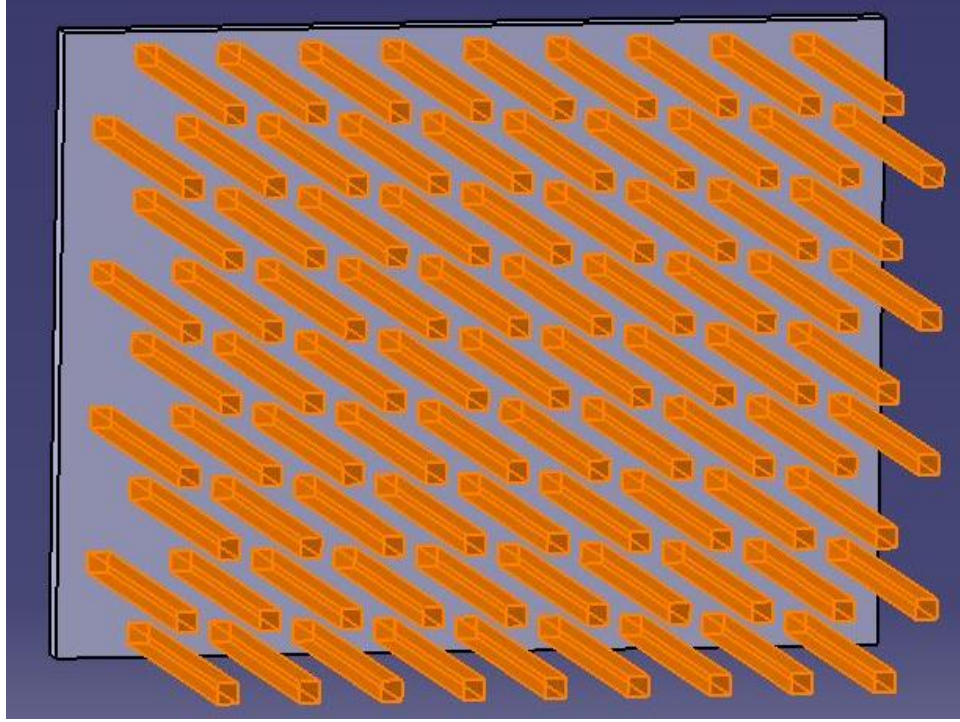
Bu geometride kullanılan artırılmış yüzey elemanlarının kesit boyutları 2 mm'dir ve artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık değeri 4 mm'den 19 mm'ye kadar artırılarak bu artışın bu yüzeyler üzerinden ortamdaki akışkana yapılan ısı transferi üzerinde oluşturduğu etki incelenmiştir. Şekil 3.8 ve Şekil 3.9'da ilgili kanatçık geometrisinin ölçüleri belirtilmiştir. Şekil 3.8' de görüldüğü gibi bitişik iki artırılmış yüzey elemanı merkezi çiftinin arasındaki açı 60 derecedir ve artırılmış yüzey elemanları kare kesitlidir. Bu kanatçık geometrisi üzerinde, diğer kanatçık geometrileri ile performans kıyaslaması yapmak için seçilen artırılmış yüzeyler Şekil 3.10' da gösterilmiştir.



Şekil 3.8.Kare kesitli şaşırtmalı (staggered) pin artırılmış yüzey yapılı kanatçığın ölçüleri (ön görünüş) ve yerçekim ivmesinin yönü (Ölçüler mm'dir)



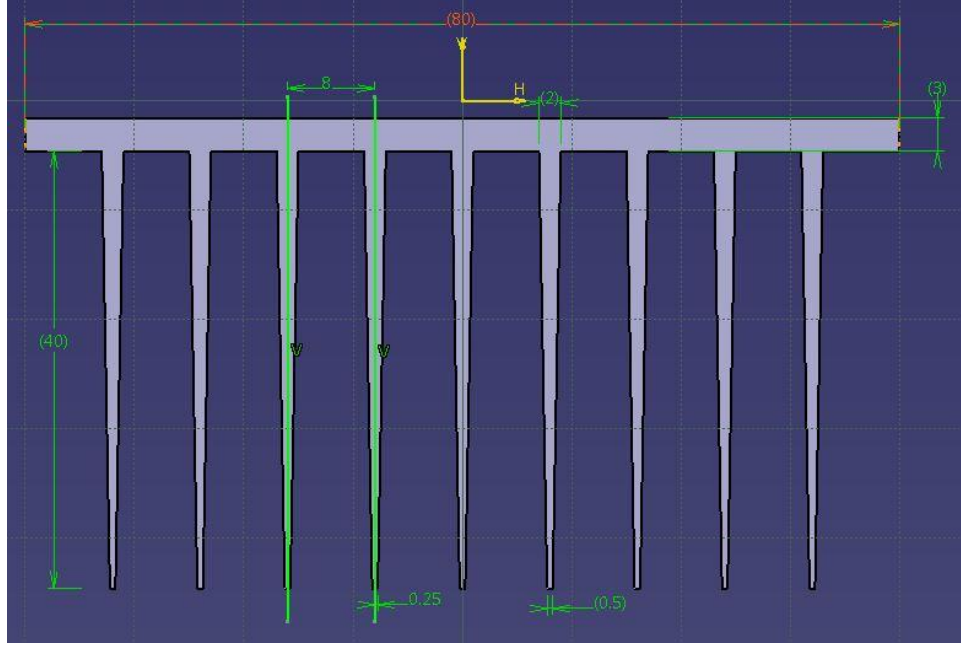
Şekil 3.9.Kare kesitli şaşırtmalı (staggered) pin artırılmış yüzey yapılı kanatçığın ölçüleri (üst görünüş) (Ölçüler mm'dir)



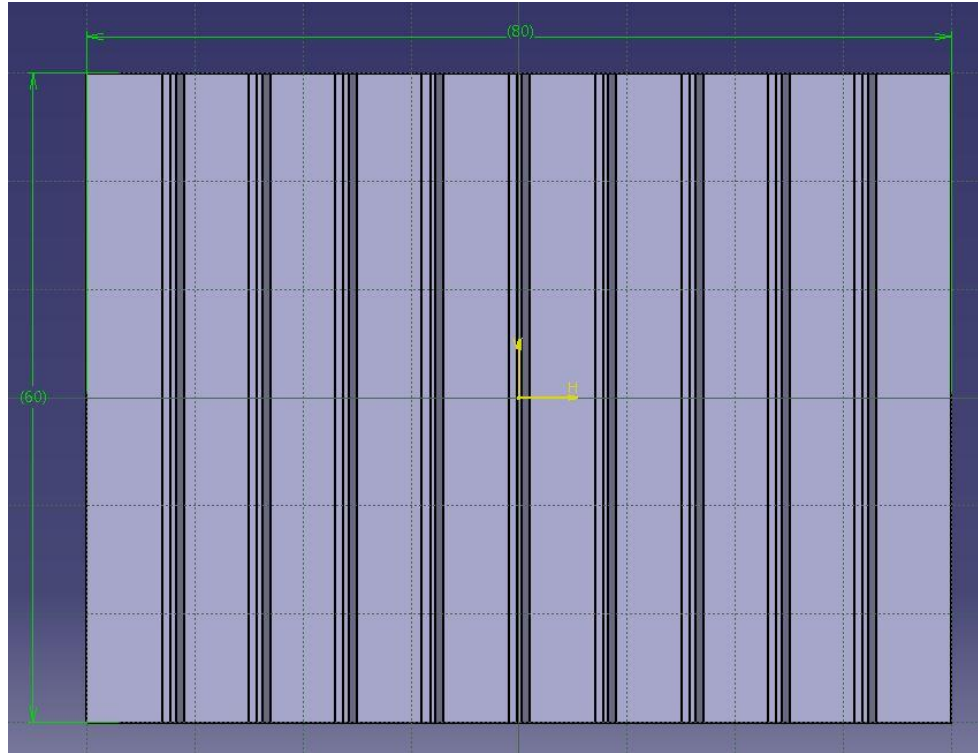
Şekil 3.10.Kare kesitli şaşırtmalı (staggered) pinartırılmış yüzey yapılı kanatçığın üzerinde sonuçların okunduğu ve diğer kanatçık geometrileriyle kıyaslanmanın yapıldığı seçilmiş yüzeyler

5.1.2.4. Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzey yapısı

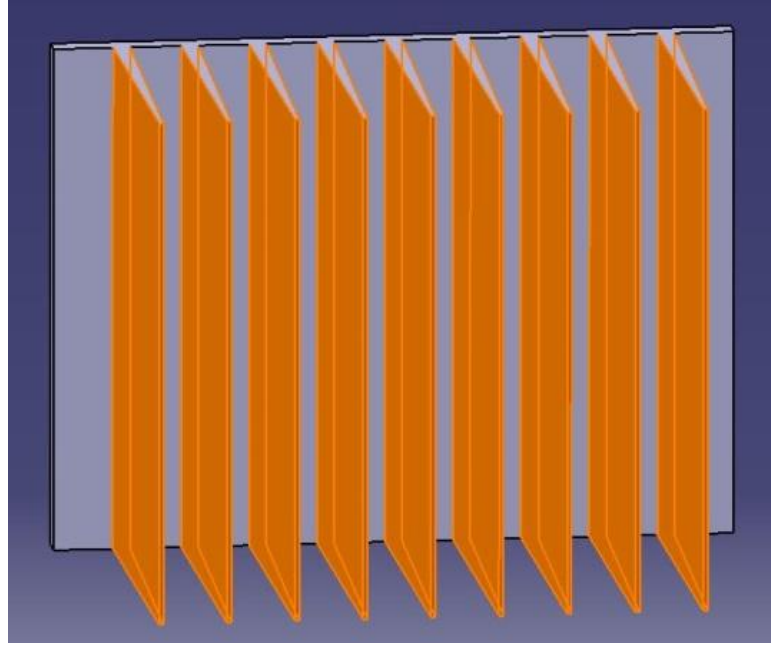
Bu geometride kullanılan artırılmış yüzey elemanlarının kalınlığı dip bölgelerde 2 mm ve uçlarda 0,5 mm'dir ve artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık değeri 4 mm'den 19 mm'ye kadar artırılarak bu artışın artırılmış yüzeyler üzerinden ortamdaki akışkana yapılan ısı transferi üzerinde oluşturduğu etki incelenmiştir. Şekil 3.11 ve Şekil 3.12' de ilgili kanatçığın ölçüleri belirtilmiştir. Bu kanatçık geometrisi üzerinde, diğer kanatçık geometrileri ile performans kıyaslaması yapmak için seçilen artırılmış yüzeyler Şekil 3.13'te gösterilmiştir.



Şekil 3.11.Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahip kanatçığın geometrik ölçüleri (üst görünüş) (Ölçüler mm'dir)



Şekil 3.12.Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahip kanatçığın geometrik ölçüleri (üst görünüş) (Ölçüler mm'dir)



Şekil 3.13. Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzeylere sahip kanatçık üzerinde sonuçların okunduğu ve diğer kanatçık geometrileriyle kıyaslamaların yapıldığı yüzeyler (Kanatçıkların her iki tarafındaki geniş yüzeyler seçilmiştir)

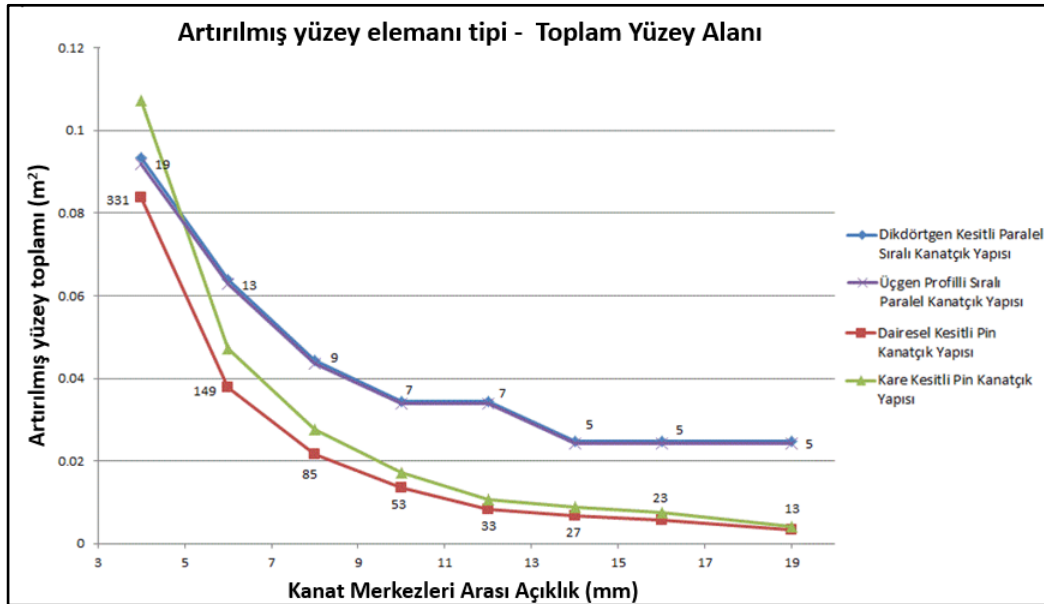
5.1.3. Yapılan Analizlerde Bulunan Sonuçların Kanatçıklar Üzerindeki Artırılmış Yüzey Tiplerine Göre Kıyaslanması ve Performans Analizi

Bölüm 5.2.2’de özellikleri tanımlanan tüm kanatçık ve artırılmış yüzey elemanı tiplerinin termal performansları, belirtilen sınır koşulları altında FloEFD V5 yazılımı ile simüle edilmiştir. Performans kıyaslaması başlıca birkaç termal davranış göstergesinin kıyaslanması yoluyla yapılmıştır. Yapılan grafiksel karşılaştırmalar yardımıyla ilgili termal performansın, hem kanatçık üzerindeki artırılmış yüzey elemanı tipine hem de bu elemanların merkezleri arasındaki mesafenin değişimine göre gösterdiği değişiklikler tespit edilebilmektedir. Performans kıyaslamasının yapılacağı temel kriterler aşağıda incelenmiştir. Grafiklerdeki eğriler üzerinde ilgili kanatçığın sahip olduğu artırılmış yüzey elemanı sayıları belirtilmiştir. Dikdörtgen ve üçgen profilli paralel sıralı artırılmış yüzeylere sahip olan kanatçıkların artırılmış yüzey elemanı sayıları birbiri ile aynı iken

dairesel ve kare kesitli pin yapıları artırılmış yüzeylere sahip kanatçıkların artırılmış yüzey elemanı sayıları da birbiriyle aynıdır.

5.1.3.1. Isı transferinin yapıldığı toplam artırılmış yüzey alanı

Kanatçıkların tasarımında farklı artırılmış yüzey tiplerinin kullanılmasıyla elde edilen toplam yüzey alanı da farklılık göstermektedir. Isının transfer edildiği toplam yüzey alanının artması ortamdaki akışkana transfer edilen toplam termal gücü etkileyeceği için etkin bir parametredir. Şekil 3.14' tefarklı artırılmış yüzey geometrilerinden oluşan kanatçıkyüzey alanlarının karşılaştırıldığı grafik görülmektedir.



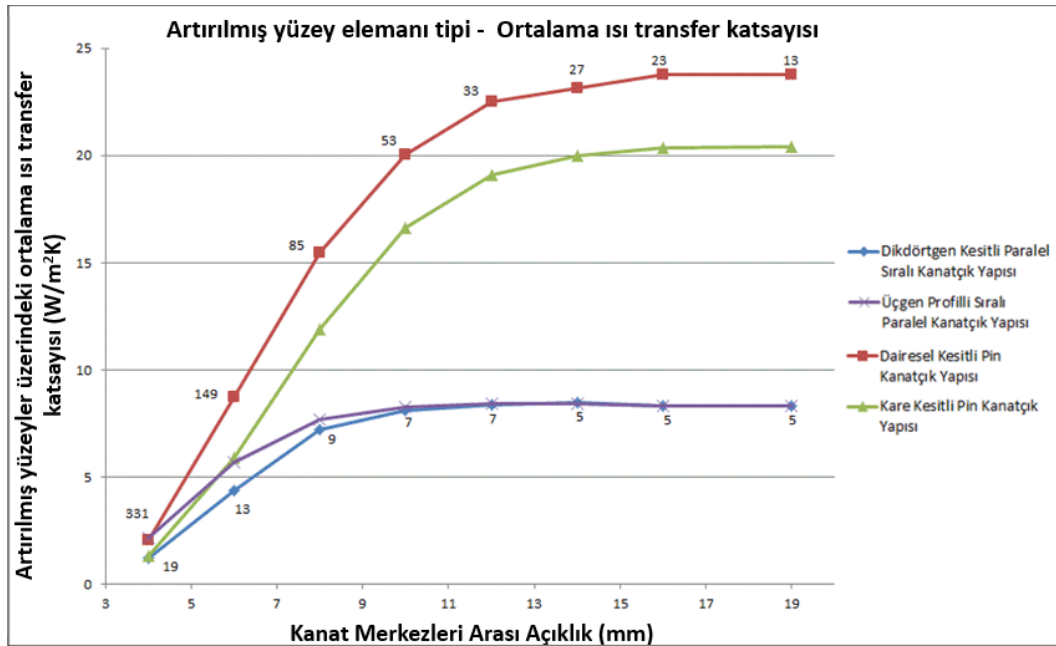
Şekil 3.14. Kanatçıklar üzerindeki toplam artırılmış yüzey alanının, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve tipine göre değişim grafiği (Grafik eğrileri üzerindeki sayılar ilgili kanatçık geometrisinin sahip olduğu artırılmış yüzey elemanlarının sayısını göstermektedir)

Görüldüğü gibi artırılmış yüzey merkezleri arasındaki mesafenin artması, pin artırılmış yüzey yapıları kanatçıkların toplam artırılmış yüzey alanlarının paralel sıralı artırılmış yüzey yapıları kanatçıklara oranla daha hızlı düşmesine sebep olmaktadır. Buna rağmen 5mm'den daha düşük artırılmış yüzey merkezleri arası uzaklık değerlerinde, pin yapıları

artırılmış yüzeylere sahip kanatçıkların toplam artırılmış yüzey alanı, paralel sıralı artırılmış yüzeylere sahip kanatçıkların toplam artırılmış yüzey alanına yaklaşmakta ve geçebilmektedir. Ayrıca kare kesitli pin yapılı artırılmış yüzeylere sahip kanatçıkların toplam artırılmış yüzey alanının dairesel pin yapılı artırılmış yüzeylere sahip kanatçığın toplam artırılmış yüzey alanından daha fazla olduğu görülmektedir.

5.1.3.2. Artırılmış yüzeylerde hesaplanan ortalama ısı transfer katsayısı

Önceki çalışmalarda kanatçıklar arasındaki mesafe değişiminin kanatçık yüzeylerindeki ısı transfer katsayısını etkin şekilde değiştirdiği tespit edilmiştir. Bu çalışmadaki amaç ise farklı kanatçık tiplerinin ısı transferi üzerindeki etkisini incelemektir. Şekil 3.15’ te kanatçıklar üzerinde doğal taşınım yoluyla oluşan ortalama ısı transfer katsayısının kanatçık tiplerine göre incelendiği grafik görülmektedir.



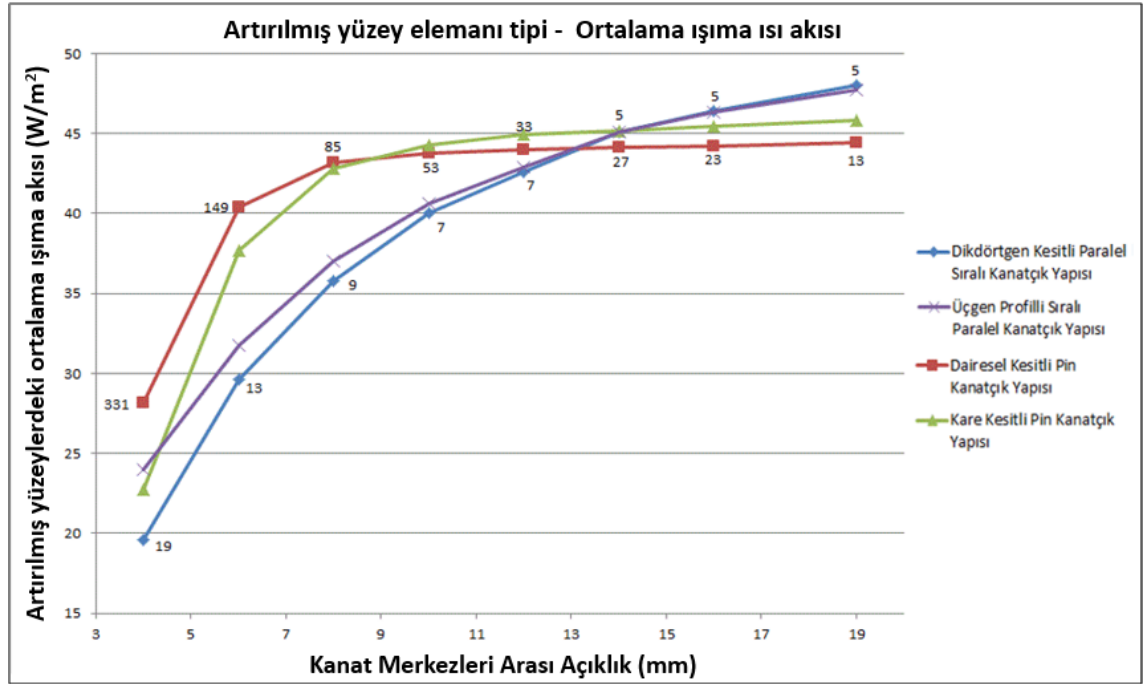
Şekil 3.15. Kanatçıklar üzerinde bulunan artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısının, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve tipine göre değişim grafiği (Grafik eğrileri üzerindeki sayılar ilgili kanatçık geometrisinin sahip olduğu artırılmış yüzey elemanlarının sayısını göstermektedir)

Şekil 3.15' te görüldüğü gibi pin yapılı kanatçık tiplerinin ortalama ısı transfer katsayısı paralel sıralı kanatçık yapılarının ortalama ısı transfer katsayısının çok üzerindedir. Şekil 3.15'teki 19 mm kanatçık merkezleri arası mesafe değeri için paralel sıralı kanatçık yapıları üzerinde yaklaşık $8 \text{ W/m}^2\text{K}$ ortalama ısı transfer katsayısı hesaplanmış iken pin yapılı kanatçıkların (dairesele kesitli pin kanatçıklar) üzerinde maksimum olarak yaklaşık $24 \text{ W/m}^2\text{K}$ ortalama ısı transfer katsayısı değeri hesaplanmıştır. Dairesel kesitli pin yapılı kanatçıklar üzerinde hesaplanan ortalama ısı transfer katsayısının kare kesitli pin yapılı kanatçıklar üzerinde hesaplanan ısı transfer katsayısından daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu davranışın sebebi, dairesele kesitli kanatçık yapısının, kanatçıklar arasında akan akışkana kare kesitli kanatçık yapısına oranla daha az direnç göstermesidir. Çünkü dairesele kesitli kanatçıkların cidarlarındaki geçişler keskin değildir ve hava ile temas halinde bulunan sürtünme alanı kare kesitli kanatçıkların sürtünme alanından daha azdır.

Paralel sıralı kanatçık yapılarını kendi içinde karşılaştırdığımızda üçgen profilli kanatçıkların 10 mm'den daha az kanatçık merkezleri arası mesafe durumlarında dikdörtgen profilli kanatçık yapılarından daha yüksek ortalama ısı transfer katsayısına sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca paralel sıralı kanatçıklar ve pin yapılı kanatçıklar olmak üzere her iki grup kanatçık yapısında kanatçıklar arası mesafenin artışıyla kanatçık yüzeyleri üzerindeki doğal taşınım ısı transfer katsayısı artmakta ve belirli bir değerden sonra artış durmakta ve ısı transfer katsayısı sabit kalmaktadır. Şekil 3.15' te görüldüğü gibi paralel sıralı kanatçıklar için ısı transfer katsayısındaki artış 10 mm kanatçık merkezleri arası açıklık değerinden sonra durmaktayken, pin yapılı kanatçıklarda bu artış 16 mm'ye kadar devam etmektedir. Bu açıdan bakıldığında pin yapılı kanatçıkların doğal taşınım termal performansının kanatçık merkezleri arasındaki boşluk değişimine duyarlılığının paralel sıralı kanatçık yapılarına göre daha fazla olduğu söylenebilir. Çünkü Şekil 3.15'e bakıldığında paralel sıralı kanatçık yapılarının kanatçık merkezleri arasındaki boşluk değişimine duyarlılığının 2 ile 10 mm arasında çok yüksek olduğu görülürken, pin yapılı kanatçıklar için bu duyarlılığın 2 ile 16 mm arasında çok yüksek olduğu görülmektedir. Ayrıca pin yapılı kanatçık tasarımlarında kullanılan şaşırtnalı (staggered) kanatçık yapısı ve bitişik iki kanatçık merkezi çiftinin arasındaki aç değeri bu duyarlılığı etkileyici bir faktördür.

5.1.3.3. Artırılmış yüzeylerden ortama net olarak aktarılan ışıma ısı akısı

Artırılmış yüzey merkezleri arasındaki mesafenin artışı ile kanatçıklar üzerindeki farklı artırılmış yüzey tiplerinin yüzeylerindeki net ışıma ısı akısı incelenmiştir. FloEFD yazılımı içerisinde radyasyon ile ısı transferi hesaplamaları, Discrete Transfer, Discrete Ordinate ve Monte Carlo yöntemleri yardımıyla olmak üzere üç farklı şekilde yapılabilmektedir. Bu çalışma kapsamında yazılım içerisindeki “Discrete Transfer” radyasyon modelleme algoritması kullanılmıştır. Yapılan simülasyon çalışmasında herhangi bir yarı geçirgen (semi-transparent) parça kullanılmadığı için Discrete Ordinate ve Monte Carlo çözümlerinin kullanılmasına gerek duyulmamıştır. Şekil 3.16’da artırılmış yüzeyler üzerinden ortama ışıma yoluyla transfer edilen net ısı akısının artırılmış yüzey merkezleri arasındaki uzaklık değerlerine göre değişim grafikleri gösterilmiştir.



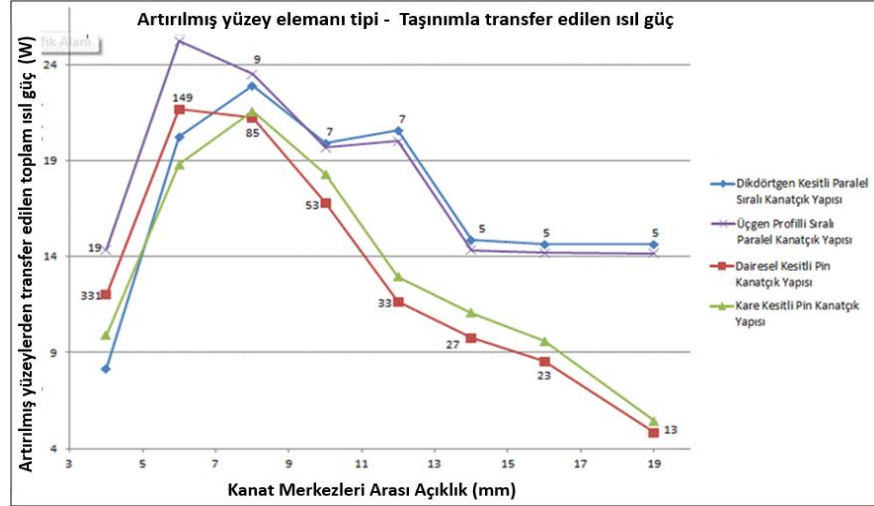
Şekil 3.16. Artırılmış yüzeylerden ışıma yoluyla transfer edilen ortalama net ışıma akısının, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve kanatçık tipine göre değişim grafiği (Grafik eğrileri üzerindeki sayılar ilgili kanatçık geometrisinin sahip olduğu artırılmış yüzey elemanlarının sayısını göstermektedir)

Şekil 3.16' da görüldüğü gibi 13 mm'den az artırılmış yüzey merkezleri arası mesafe değerlerinde pin yapılı kanatçıklar paralel sıralı kanatçıklardan daha fazla ışıma ısı akısı sağlamakta iken 13 mm'den fazla artırılmış yüzey merkezleri arası mesafe değerlerinde paralel sıralı kanatçıklar pin yapılı kanatçıklardan daha fazla ışıma ısı akısı sağlamaktadır. Şekil 3.16' daki kesişim noktasından 13 mm artırılmış yüzey merkezleri arası boşluk değeri için tüm kanatçık tiplerinin birbirine çok yakın ışıma ısı akısı değerlerine sahip olduğu görülmektedir. Ayrıca pin yapılı kanatçık tiplerini kendi aralarında kıyasladığımızda 9 mm'den azartırılmış yüzey merkezleri arası boşluk değerleri için dairesel kesitli kanatçıklar kare kesitli kanatçıklardan daha performanslı iken 9 mm üzerindeki artırılmış yüzey merkezleri arası boşluk değerleri için tersi durum söz konusudur. Pin yapılı kanatçıklar için net ışıma ısı akısı artışının 12 mm artırılmış yüzey merkezleri arası boşluk değerinden sonra hemen hemen artmadığı ve sabit kaldığı Şekil 3.16' da görülebilmektedir. Aksine paralel sıralı kanatçıklar için net ışıma ısı akısının artırılmış yüzey merkezleri arası boşluk değeri artarken artmaya devam ettiği görülmektedir.

5.1.3.4. Artırılmış yüzeyler üzerinden doğal taşınım yoluyla transfer edilen toplam termal güç

Artırılmış yüzey merkezleri arasındaki mesafenin artması önceki çalışmalarda görüldüğü gibi artırılmış yüzeyler üzerindeki Rayleigh sayısını etkilemektedir ve bu parametreyi etkileyen değişkenlerin etkisiyle belirlenen belirli bir miktar mesafeden sonra artırılmış yüzeyler üzerindeki ısı transfer katsayısı artışı durmaktadır. Artırılmış yüzeyler arası mesafe azaldığında da bu durumun tersi geçerli olmaktadır. Bu nedenle artırılmış yüzey merkezleri arasındaki mesafenin azalmasıyla ortaya çıkan fazla miktarda kanat ve yüzey alanı belirli sınırlarda çok etkili olurken belirli bir mesafe değerinden sonra ısı taşınım katsayısının düşmesine sebep olduğu için ısı transferinin ciddi oranda düşmesine neden olmaktadır. Bu nedenle artırılmış yüzey merkezleri arasındaki mesafenin doğal taşınım yoluyla transfer edilen toplam termal güç üzerindeki etkisi farklı tipteki artırılmış yüzey geometrileri için de incelenmiştir. Şekil 3.17' de

artırılmış yüzeylerden ortamdaki akışkana doğal taşınım yoluyla transfer edilen toplam termal gücün artırılmış yüzey merkezleri arasındaki uzaklık değerlerine göre değişim grafikleri gösterilmiştir.



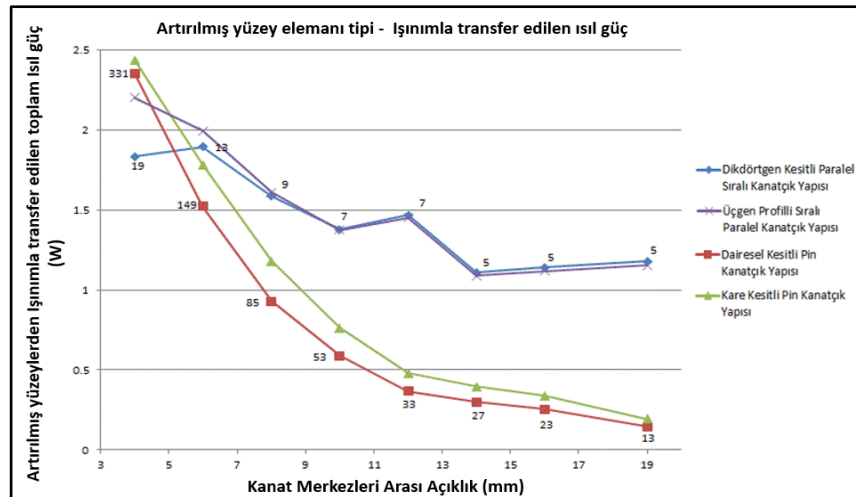
Şekil 3.17. Kanatçık üzerindeki artırılmış yüzeylerden doğal taşınım yoluyla transfer edilen termal gücün, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve tipine göre değişim grafiği (Grafik eğrileri üzerindeki sayılar ilgili kanatçık geometrisinin sahip olduğu artırılmış yüzey elemanlarının sayısını göstermektedir)

Şekil 3.17' de görüldüğü gibi tüm artırılmış yüzey tipleri için öncelikle ısı transferinde ani bir artış ve sonrasında da düşüş görülmektedir. Bu grafik yardımıyla, Bölüm 5.2.1' de belirtilmiş sınır şartlarına göre söz konusu tüm artırılmış yüzey tiplerinin optimum mesafe değerlerini tespit edebiliriz. Görüldüğü gibi üçgen profilli sıralı artırılmış yüzey yapısına sahip ve dairesel kesitli pin artırılmış yüzey yapısına sahip kanatçıklar için maksimum ısı transferinin sağlandığı optimum artırılmış yüzey elemanı merkezleri arası açıklık değeri yaklaşık olarak 6 mm iken dikdörtgen kesitli sıralı artırılmış yüzeylere ve kare kesitli pin artırılmış yüzeylere sahip kanatçıklar için maksimum ısı transferinin sağlandığı optimum artırılmış yüzey elemanı merkezleri arası açıklık değeri yaklaşık olarak 8 mm'dir. Bu olgunun sebebinin üçgen profilli paralel sıralı artırılmış yüzey yapısı ve dairesel kesitli pin artırılmış yüzey yapılarının kare kesitli ve dikdörtgen profilli artırılmış yüzeylere oranla daha az hava akış direnci oluşturuyor olmalarıdır.

Hava akış direncinin artması doğal taşınım koşullarında kanatçıkların arasından geçen soğuk akışkan miktarının azalmasına ve dolayısıyla birim zamanda soğuk akışkana aktarılan ısı enerjisinin azalmasına sebep olmaktadır. Bu nedenle artırılmış yüzeylerin arasındaki hava akış direncinin artması doğal taşınım koşullarında artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısının genelde düşmesine sebep olur. Ayrıca Şekil 3.17 incelendiğinde söz konusu kanatçık geometrileri ve söz konusu sınır şartlarına göre mevcut kanatçıklar içinde en fazla ısı transfer gücünü sağlayan artırılmış yüzey tipinin üçgen profilli paralel sıralı artırılmış yüzey yapısı olduğu görülebilmektedir.

5.1.3.5. Kanatçıklar üzerindeki artırılmış yüzeylerden ışıma yoluyla ortama transfer edilen net termal güç

Kanatçık üzerindeki artırılmış yüzeylerden ortama transfer edilen net ışıma termal gücü farklı artırılmış yüzey elemanı tiplerine göre incelenmiştir. Şekil 3.18’ de artırılmış yüzeylerden ışıma yoluyla ortama transfer edilen net toplam termal gücün artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık değerlerine göre değişim grafikleri gösterilmiştir.



Şekil 3.18. Artırılmış yüzeylerden ışıma yoluyla ortama transfer edilen net ışıma termal gücünün, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki mesafe ve tipine göre

değişim grafiği(Grafik eğrileri üzerindeki sayılar ilgili kanatçık geometrisinin sahip olduğu artırılmış yüzey elemanlarının sayısını göstermektedir)

Şekil 3.18' de görülebileceği gibi pin yapılı artırılmış yüzeylerden ışınlama transfer edilen termal güç miktarı, paralel sıralı artırılmış yüzeylerden ışınlama transfer edilen termal güç miktarına oranla artırılmış yüzey merkezleri arası açıklık miktarının artışıyla daha fazla azalmaktadır. Bunun en büyük nedenlerinden bir tanesi de Şekil 3.14' te görülebileceği gibi artırılmış yüzeymerkezleri arasındaki mesafe artışının pin yapılı kanatçıkların toplam artırılmış yüzey alanını paralel sıralı kanatçık yapılarına oranla daha fazla düşürmesidir. Ayrıca bu çalışmada incelenen artırılmış yüzey geometrilerinin yüzey neşretme katsayısı (emissivity) değerlerinin 0,09 olduğu göz önünde bulundurulmalıdır.Kanatçıkların dış yüzeylerine kolayca uygulanabilecek mat ve siyah boya ile boyama işlemi neticesinde yüzey neşretme katsayısı değerleri 0,9 civarına kadar yükseltilebilir ve bu şekilde kanatçık yüzeylerinden ışınlama yoluyla transfer edilen termal güç değerleri önemli ölçüde artırılabilir.

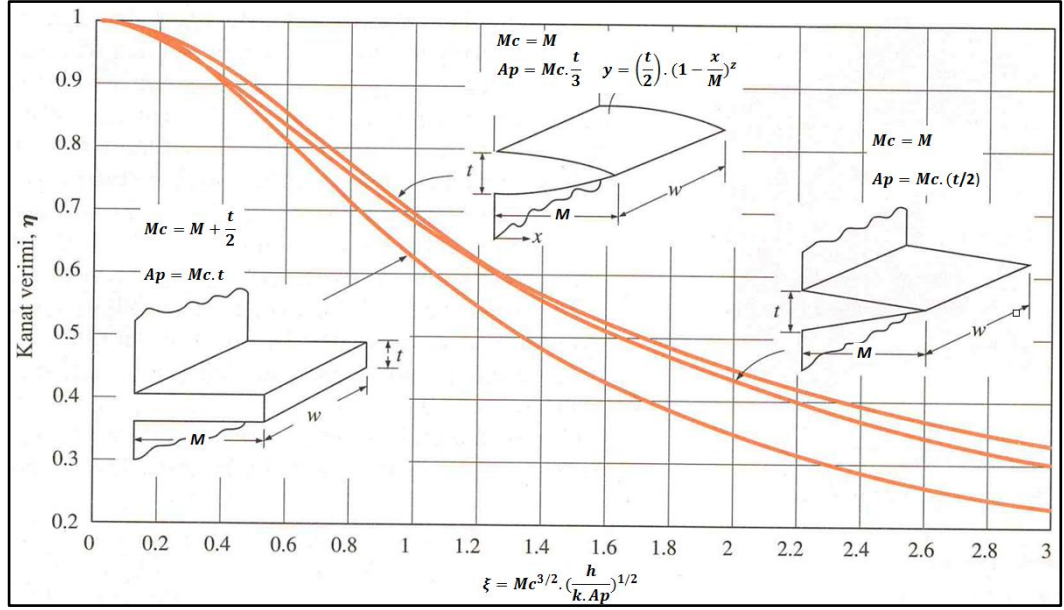
5.1.4. Artırılmış Yüzey Verimliliği Değerlerinin Artırılmış Yüzey Tiplerine Göre Hesaplanması ve Kıyaslanması

Kanatçıklar, tabanlarından aldıkları ısı enerjisini kendi yüzeyleri üzerinden ortamdaki akışkana aktararak etkin ısı transferi sağlarlar. Kendi yüzeyleri üzerinden sürekli olarak ortam akışkanına ısı transferi yapıldığından dolayı kanatçığın tabanından (ısı girişi olan bölge) artırılmış yüzeylere doğru sıcaklık düşüşü oluşacaktır. İdeal bir artırılmış yüzeyin tabanındaki sıcaklık ile uç noktasındaki sıcaklık arasında fark oluşmaması beklenirken gerçek artırılmış yüzeylerde bu sıcaklık düşüşü gerçekleşmektedir. Gerçek durum ile ideal durumda gerçekleştirebilecek ısı transferi arasındaki oran söz konusu artırılmış yüzeyin verimini ifade etmektedir. İlgili formülasyonlar ile ilgili detaylı bilgi aşağıda verilmiştir.Artırılmış yüzeyin veriminin hesaplaması için kullanılan formülasyonlarıniçerdiği terimler,simgeler ve kısaltmalar dizini altında açıklanmıştır. Aşağıda m ve kanatçık verimine (η) ait formülasyonlar görülmektedir.

$$m = \sqrt{\frac{h_k * p}{k * A_c}} \quad (6.1)$$

$$\eta = \frac{\tanh(m * M_c)}{m * M_c} \quad (6.2)$$

tanımlaması ile hesaplanabilmektedir. Artırılmış yüzeylerin ucundan transfer edilen ısının ihmal edilmesi durumunda bu formülde kullanılan M_c ifadesi düzeltilmiş artırılmış yüzey elemanı uzunluğunu ifade etmektedir ve artırılmış yüzey tiplerine göre farklı şekilde hesaplanmaktadır. Kare kesitli artırılmış yüzeyler için bu değer $M_c = M + (t/2)$ olarak hesaplanırken, dairesel kesitli kanatçıklar için $M_c = M + (D/4)$ olarak hesaplanmaktadır. Yukarıda incelenmiş olan dikdörtgen kesitli paralel sıralı artırılmış yüzeylere, dairesel kesitli pin yapıları artırılmış yüzeylere ve kare kesitli pin yapıları artırılmış yüzeylere ait düzeltilmiş artırılmış yüzey uzunluğu (M_c), m ve artırılmış yüzey elemanı verimi (η) değerleri yukarıdaki formüller yardımıyla hesaplanabilmektedir. Bu artırılmış yüzey tiplerine ait kesit değerleri sabit olduğundan dolayı verimler bu formüller yardımıyla hesaplanabilmektedir. Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzey yapılı kanatçıklarda kullanılan artırılmış yüzeylerin kesitleri uzunluk boyunca sabit olmadığından dolayı bu yapıların verimi Şekil 3.19'daki diyagram yardımıyla tespit edilmiştir.



Şekil 3.19.Dikdörtgen, üçgen ve parabolik kesitliartırılmış yüzeylerin verimlerine ait diyagram(Cengel 2011b)

Şekil 3.20' de 100°C sabit taban sıcaklığı sınır şartı altında tüm artırılmış yüzey elemanı tiplerine ait verim değerleri, artırılmış yüzey merkezleri arasındaki açıklık değerlerine göre değişken olarak grafik üzerinde gösterilmiştir. Bu şekildeki grafikte gösterilmiş olan verim değerleri artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısı (h_k) değerleri kullanılarak hesaplanmıştır ve ilgili ısı transfer katsayısı değerleri Şekil 3.15' teki grafikten alınmıştır. Aşağıda ise 8mm artırılmış yüzey elemanı merkezleri arası açıklık değerine sahip kare kesitli pin artırılmış yüzey yapılı kanatçığa ait bir artırılmış yüzeyin ortalama verimini bulmaya yönelik bir hesaplama örneği mevcuttur. Hesaplanan değer ile Şekil 3.20' deki değerlerin birbiriyle uyumlu olduğuna dikkat edilmelidir. İlgili terimler ve değerleri aşağıda açıklanmıştır:

$h_k = 11,911 \text{ W/m}^2\text{K}$ (Şekil 3.15' ten alınmıştır. 8 mm artırılmış yüzey elemanı merkezleri arası mesafe değerine sahip kare kesitli pin yapılı kanatçığın artırılmış yüzeyleri üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısı değeridir)

$p = 0,008 \text{ m}$ (bir artırılmış yüzey elemanı kesitinin çevre uzunluğu)

$k = 140 \text{ W/mK}$ (ısı iletim katsayısı)

$t = 0,002$ m (artırılmış yüzey elemanı kalınlığı)

$A_c = 4e-6$ m² (artırılmış yüzey elemanı kesit alanı)

$M = 0,04$ m (artırılmış yüzey elemanı uzunluğu)

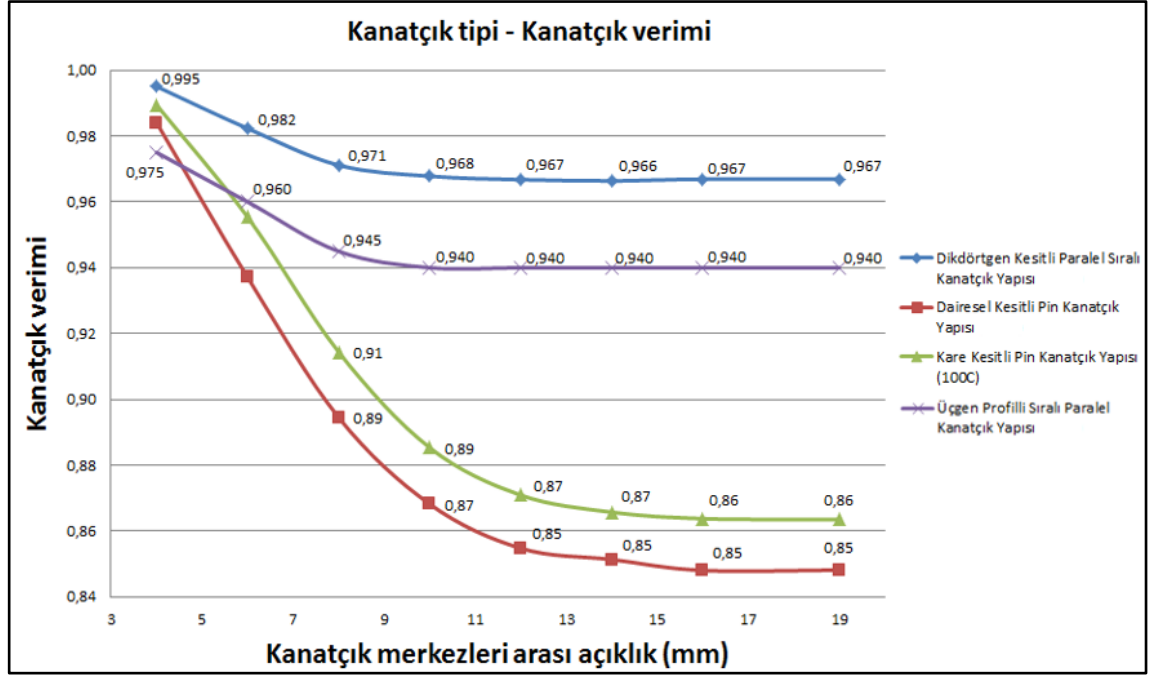
$M_c = 0,04 + \frac{0,002}{2} = 0,041$ m (düzeltilmiş artırılmış yüzey elemanı uzunluğu)

$$m = \sqrt{\frac{(11,911) * (0,008)}{140 * (4e-6)}} = \sqrt{170,157} = 13,044$$

$$\eta = \frac{\tanh \left(\frac{(13,044) * (0,041)}{0,041} \right)}{(13,044) * (0,041)} = \frac{\tanh (0,5348)}{(0,5348)} = \frac{0,489}{0,5348} = 0,9144$$

Görüldüğü gibi verim %91,44 olarak hesaplanmıştır. Şekil 3.20' de ise tüm artırılmış yüzey tiplerine ait ortalama verim değerlerinin artırılmış yüzey elemanı merkezleri arası açıklık değerlerine göre değişimi gösterilmiştir ve yukarıda hesaplanan %91,44 değerinin bu grafikteki değer ile uyum gösterdiği görülmektedir.

Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzey yapılı kanatçığın verimi ise Şekil 3.19'daki grafik yardımıyla hesaplanmıştır. Şekilde görüldüğü gibi hesaplanan bir ζ değeri yardımıyla ilgili artırılmış yüzey yapısının verimi kolaylıkla grafik üzerinden seçilebilmektedir. Üçgen profilli sıralı paralel artırılmış yüzey yapılı kanatçığın veriminin diğer artırılmış yüzey tipleri gibi hesaplanamamasının sebebi bu artırılmış yüzey yapısının kesit çevresinin ve kesit alanının sabit olmamasıdır. Bu nedenle bu artırılmış yüzey tipine ait verim değerleri Şekil 3.19'daki grafik ve hesaplamalar yardımıyla hesaplanmıştır.



Şekil 3.20. Artırılmış yüzeylere ait ortalama veriminin, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve tipine göre değişim grafiği (Grafik eğrileri üzerindeki sayılar ilgili ısı atacağına ait kanatçıkların ortalama verimini göstermektedir)

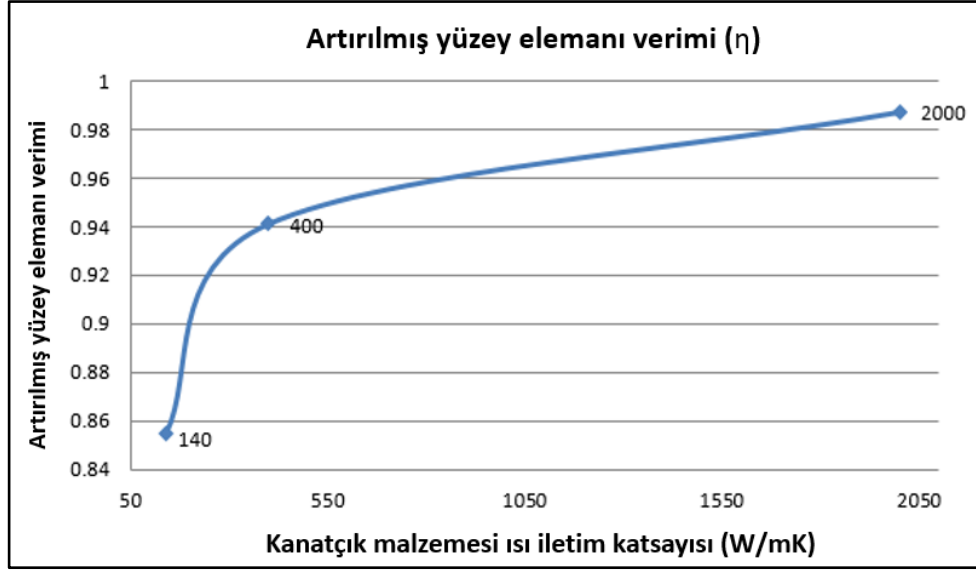
Şekil 3.20’ de artırılmış yüzey elemanı merkezleri arası açıklık değerinin 6mm’den fazla olduğu durumlarda paralel sıralı yapı kanatçıkların veriminin pin yapı kanatçıkların veriminden daha yüksek olduğu görülmektedir. Bu farklılığın sebebinin özellikle pin yapı kanatçıklar üzerinde oluşan ısı transfer katsayısının paralel sıralı kanatçıklar üzerinde oluşan ısı transfer katsayısının üç katına kadar çıkabiliyor olmasıdır. Bu durumda pin yapı kanatçıkların, artırılmış yüzeyler boyunca üzerinde oluşan sıcaklık düşümü paralel sıralı yapı kanatçıklara göre daha fazla olmakta ve bu nedenle verimin düşmesine sebep olmaktadır. Yukarıda yapılan örnek hesaplamada görüldüğü gibi ($m \cdot M_c$) değerinin sifira yakın olması, artırılmış yüzey elemanı veriminin %100’e yaklaşmasını sağlamaktadır. M_c değerinin sabit olması durumunda m değerinin küçük değerler alması ile $m \cdot M_c$ değeri de küçük değerler alacaktır. m değeri ise h_k , p , k ve A_c değerlerinin fonksiyonudur. Bu çalışmada kullanılan tüm kanatçıkların ısı iletim katsayısı (k), Alüminyum 5052 alaşımı malzemenin sahip olduğu 140 W/mK’dir ve bu değer daha da artması uzunluğu 40 mm olan artırılmış yüzeylerin üzerindeki ısı transfer katsayısını (h_k) çok artırmayacaktır. Bu nedenle k değerinin birkaç kat artması

durumunda h değeriindeki artış göreceli olarak az olacak ve bu nedenle m değeri k değerinin artışıyla azalacaktır. Bu şekilde ısı iletim katsayısının (k) artmasının verimi de artıracağını söyleyebiliriz. Bu düşünceye yönelik olarak 12mm artırılmış yüzey elemanı merkezleri arası açıklık değerine sahip dairesel kesitli pin yapılı kanatçık üzerinde üç farklı ısı iletim katsayısı ile aynı şartlar altında simülasyonlar tekrarlanmıştır. Bu durumda elde edilen verim değerleri Çizelge 3.1’ de gösterilmiştir.

Çizelge3.1. Taban sıcaklığı 100°C olan, merkezleri arasında 12 mm boşluk bulunduran dairesel kesitli pin yapılı artırılmış yüzeylerden oluşan kanatçığa ait ısı iletim katsayısının değiştirilmesi durumunda elde edilen m , $m*M_c$ ve artırılmış yüzey elemanı verimi (η) değerlerinin değişim çizelgesi

k	h_k	p	L	M_c	A_c	m	$m*M_c$	η
140	22,502	0,006283	0,04	0,0405	3,14E-6	17,92923	0,726134	0,854793
400	23,125	0,006283	0,04	0,0405	3,14E-6	10,75291	0,435493	0,941236
2000	23,433	0,006283	0,04	0,0405	3,14E-6	4,840764	0,196051	0,987382

Çizelge 3.1’ de görüldüğü gibi ısı iletim katsayısının (k) birkaç kat artışı, ısı transfer katsayısının (h_k) az miktarda artışına ve $m*M_c$ değerinin hızlı şekilde düşmesine sebep olmuştur. Bu şekilde artırılmış yüzey elemanı veriminin arttığı görülmektedir. Şekil 3.21’de ise kullanılan kanatçık malzemesinin ısı iletim katsayısının artması sonucunda artırılmış yüzeylerin veriminin değişimini gösteren grafik yer almaktadır.



Şekil 3.21. Taban sıcaklığı 100°C olan, merkezleri arasında 12 mm boşluk bulunduran dairesel kesitli pin yapıları artırılmış yüzeylerden oluşan kanatçığa ait ısı iletim katsayısının değiştirilmesi durumunda elde edilen artırılmış yüzey elemanı veriminin ısı iletim katsayısına göre değişimi grafiği (Grafik eğrileri üzerindeki sayılar ilgili simülasyonda kullanılan ısı iletim katsayısını göstermektedir)

Şekil 3.21’de görüldüğü gibi ısı iletim katsayısının 140 W/mK değerinden 400 W/mK değerine yükselmesi artırılmış yüzey elemanı veriminin %9 civarında artışını sağlarken aynı şekilde ısı iletim katsayısının 400 W/mK değerinden 2000 W/mK değerine yükselmesi artırılmış yüzey elemanı veriminin sadece %4 civarında artışını sağlamıştır. Alüminyum alaşımı malzeme 140 W/mK, saf bakır malzeme 400 W/mK ve elmas ise 2000-2200 W/mK civarında ısı iletim katsayılarına sahip örnek malzemelerdir. Ayrıca 1700 W/mK kadar ısı iletim katsayısına sahip kompozit malzemeler de geliştirilmiştir. (Anonim 2014i) Genellikle malzemenin daha yüksek ısı iletim katsayısına sahip olması, maliyetinin de daha yüksek olması dezavantajını da beraberinde getirmektedir. Bu nedenle kanatçıkların performanslarının artırılması gerektiği durumlarda söz konusu kanatçık malzemesinin değiştirilmesi ve ısı iletim katsayısının artırılmasının yapıya sağlayacağı katkı özellikle incelenmeli ve maliyet unsuru göz önünde bulundurulmalıdır.

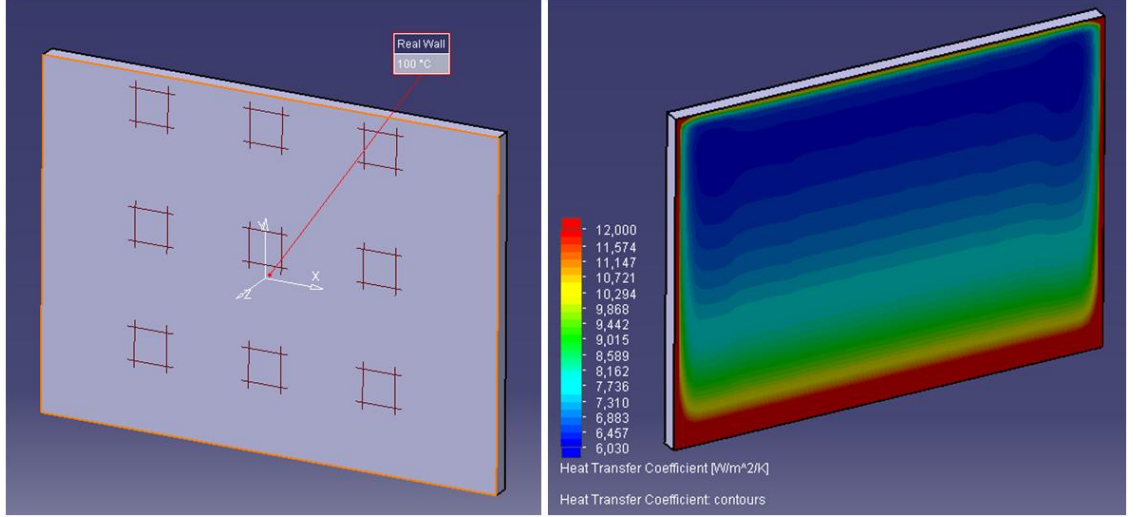
5.1.5. Artırılmış Yüzey Etkenliği Değerlerinin Artırılmış Yüzey Tiplerine Göre Hesaplanması ve Kıyaslanması

Bu bölümde ise kanatçık tabanında artırılmış yüzeylerin olması ve olmaması durumları, doğal taşınım yoluyla ortamdaki akışkana transfer edilen termal güç performansı açısından birbiriyle kıyaslanmıştır. Yani kanatçıklar üzerinde artırılmış yüzeylerin olması durumunda artırılmış yüzeylerden ortamdaki akışkana transfer edilen termal güç ile kanatçıklar üzerinde artırılmış yüzeylerin olmaması durumunda artırılmış yüzeylerin farazi taban kesit yüzey alanlarından ortamdaki akışkana transfer edilen termal güç arasında bir oran vardır. Bu oranın olabildiğince büyük olması bu artırılmış yüzey elemanlarının etkenliğini gösterir ve bu değer ile orantılı olarak çok daha fazla termal gücün ortamdaki akışkana transfer edilmesini mümkün kılar. Ama bazen artırılmış yüzeylerin çok sık olması ve kullanılan kanatçık malzemesine ait ısı iletim katsayısının yeterli olmaması gibi durumlarda artırılmış yüzey elemanı etkenliği düşük olabilir ve bu durum kanatçıklardan transfer edilebilecek termal gücü azaltır ve kullanılan kanatçık malzemesinin israf edilmesine sebep olabilir. Burada yapılan hesaplamalar kanatçık üzerindeki tek bir artırılmış yüzey elemanı için yapılmıştır. Hesaplamalarda kullanılan ısı transfer katsayısı değerleri ise artırılmış yüzeylerin olması ve olmaması gibi durumlarda elde edilen söz konusu yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısı değerleridir. Artırılmış yüzey elemanı etkenliği ($\epsilon_{\text{artırılmış yüzey}}$) şu şekilde hesaplanır:

$$\epsilon_{\text{artırılmış yüzey}} = \frac{Q(\text{kanat var})}{Q(\text{kanat yok})} = \frac{\text{Taban kesit alanı } A_B \text{ olan kanat üzerinden transfer edilen ısı güç}}{\text{Alanı } A_B \text{ olan yüzey alanı üzerinden transfer edilen ısı güç}}$$

Bir yüzey üzerinde kanat olmaması ve olması durumlarında, ısının transfer edildiği yüzeyler üzerindeki ısı transfer katsayısı bazı durumlarda birbirine çok yakın veya aynı olabilir ama yüzeye eklenen kanatların ortamdaki hava akış koşullarını değiştirmesinden dolayı genelde bu yüzeyler üzerindeki ısı transfer katsayısı da değişir ve farklılık gösterir. Bu nedenle gerçek artırılmış yüzey elemanı etkenliğinin hesaplanması için kanat olmaması durumunda kanatçıktaban yüzeyinde oluşacak olan ortalama ısı transfer katsayısı değeri de tespit edilmelidir. Bu nedenle sabit 100°C taban sıcaklığı sınır

koşulu altında artırılmış yüzey olmayan yüzey üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısı hesaplanmıştır. Yapılmış olan çalışmalar ile ilgili resimler Şekil 3.22’ de görülebilmektedir.



Şekil 3.22.Artırılmış yüzeyleri olmayan kanatçığın simülasyon sınır koşullarının gösterilmesi (solda) ve üst yüzeyi üzerindeki ısı transfer katsayısı dağılımı (sağda)

Şekil 3.22’ de görüldüğü gibi kanatçığın bir yüzüne 100°C sabit sıcaklık sınır koşulu uygulanmıştır (solda). Gerçekleştirilen simülasyon sonucunda sabit sıcaklık sınır koşulu uygulanmış olan yüzeyin diğer tarafındaki yüzeyde oluşan ısı transfer katsayısı yüzey plotu alınmıştır. Yüzey üzerinde hesaplanmış olan ısı transfer katsayısı dağılımı görülmektedir ve dağılımın daha kolay anlaşılabilmesi için değer renk ölçeği 12 W/m²K ile sınırlandırılmıştır (sağda). Bu renk ölçeğine göre 12W/m²K ve daha yüksek ısı transfer katsayısına sahip bölgeler de kırmızı renk ile ifade edilmektedir. Kullanılan plaka geometrisinin diğer kanatçık geometrilerinden tek farkı üzerinde artırılmış yüzey geometrilerinin olmamasıdır.

Şekil 3.22’de sağda bulunan resimde yüzey üzerindeki ısı transfer katsayısı dağılımı görülmektedir ve bu yüzey üzerinde hesaplanan ortalama ısı transfer katsayısı değeri 8,196 W/m²K’dir. Bu bilgiler ile örnek bir artırılmış yüzey elemanı etkenliği hesabı yapılabilir. Örneğin 8mm artırılmış yüzeyelemanı merkezleri arası açıklık değerine

sahip kare kesitli pin yapılı kanatçığa ait bir artırılmış yüzey elemanının ortalama etkenliği hesaplanarak Şekil 3.23'teki değer ile karşılaştırılabilir. İlgili terimler ve değerleri şu şekildedir:

$$T_b = 100^\circ\text{C} \text{ (kanatçık taban sıcaklığı)}$$

$$T_a = 25^\circ\text{C} \text{ (ortam sıcaklığı)}$$

$$\Delta T = T_b - T_a = 75^\circ\text{C}$$

$$h_k = 11,911 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ (artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısı değeri – Şekil 3.15)}$$

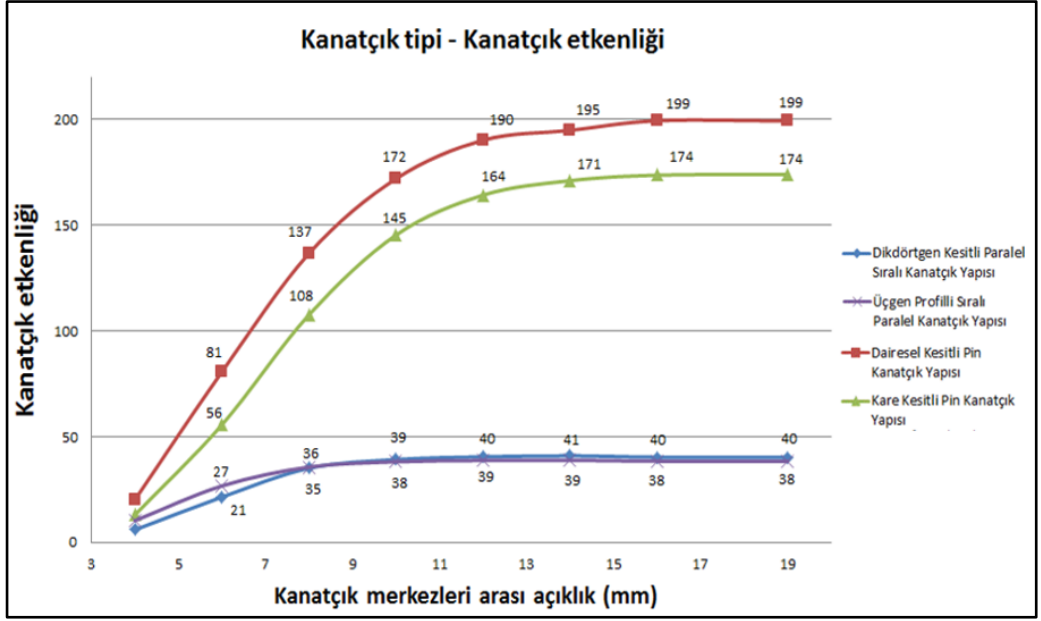
$$h_b = 8,196 \text{ W/m}^2\text{K} \text{ (artırılmış yüzeylerin olmaması durumunda farazi kanat dip noktasındaki kesit alanı üzerinde hesaplanan ortalama ısı transfer katsayısı)}$$

$$A_c = 4e-6 \text{ m}^2 \text{ (artırılmış yüzey elemanı kesit alanı - kanat kesiti sabittir)}$$

$$A_k = 324e-6 \text{ m}^2 \text{ (bir artırılmış yüzey elemanına ait toplam yüzey alanı - kanat kesiti sabittir)}$$

$$\epsilon_{\text{artırılmış yüzey}} = \frac{Q_f(\text{kanat var})}{Q_f(\text{kanat yok})} = \frac{\eta * h_k * A_k * \Delta T}{h_b * A_c * \Delta T} = \frac{(0,914) * (11,911) * (0,000324) * (100 - 25)}{(8,196) * (0,000004) * (100 - 25)} = 107,6$$

Şekil 3.23'te bu çalışmada incelenmiş olan tüm artırılmış yüzey tiplerine ait etkenlik değerlerinin artırılmış yüzey elemanı merkezleri arası açıklık değerlerine göre değişimi grafik üzerinde gösterilmiştir. Görüldüğü gibi örnek hesaplama sonucunda bulunan 107,6 ortalama etkenlik değeri Şekil 3.23'teki 8mm artırılmış yüzey elemanı merkezleri arası açıklık değerine sahip kare kesitli pin yapılı kanatçığa ait etkenlik değeri olan 108 ile uyum göstermektedir.



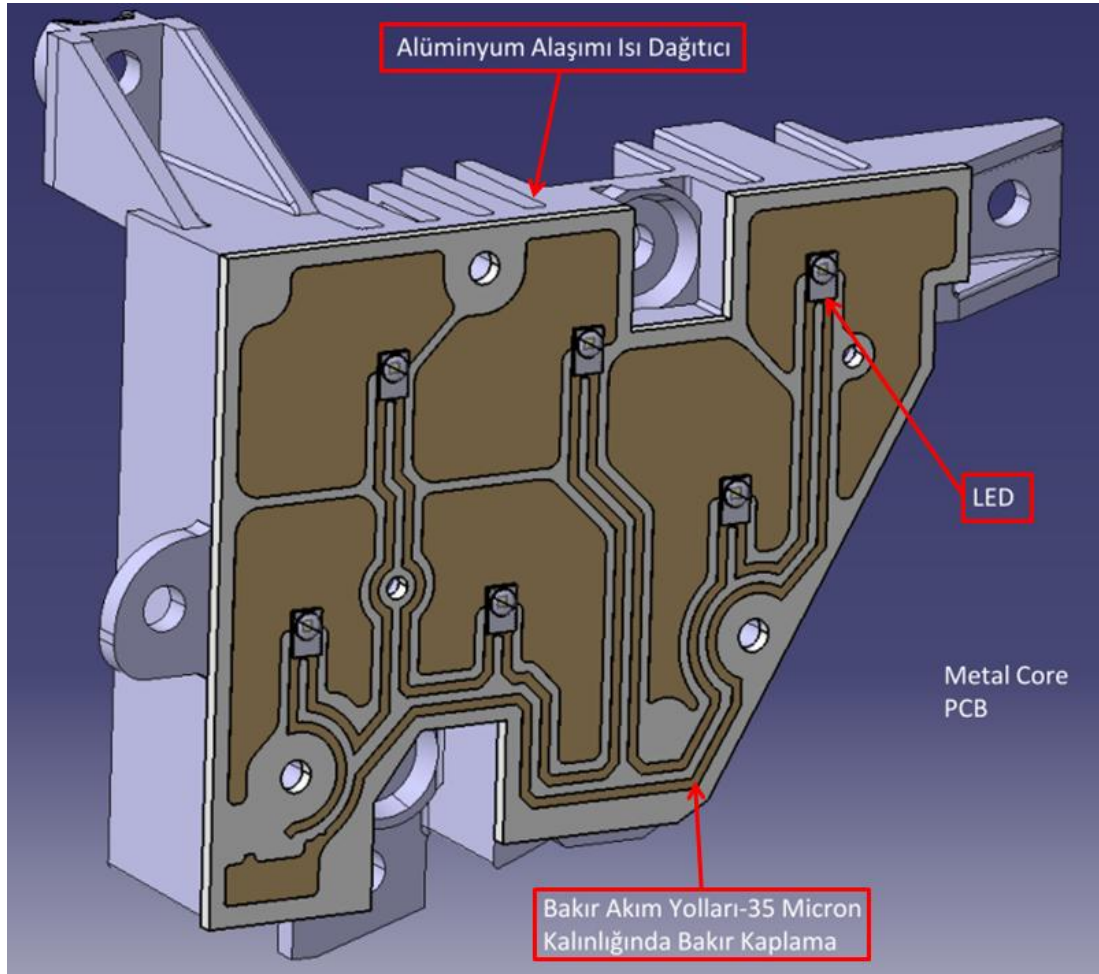
Şekil 3.23. Artırılmış yüzey elemanlarına ait ortalama etkenliğinin, artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki uzaklık ve tipine göre değişim grafiği (Grafik eğrileri üzerindeki sayılar ilgili kanatçığa ait artırılmış yüzey elemanlarının etkenliğini göstermektedir ve grafik üzerindeki değerler virgülden sonraki haneler gösterilmediği için tam sayıdır)

Şekil 3.23' teki grafikte görüldüğü gibi paralel sıralı yapıları kanatçıkların etkenliğinin pin yapıları kanatçıkların etkenliğinden çok daha düşük olduğu görülmektedir. Bu farklılığın sebebinin özellikle pin yapıları kanatçıklar üzerinde oluşan ısı transfer katsayısının paralel sıralı kanatçıklar üzerinde oluşan ısı transfer katsayısının üç katına kadar çıkabiliyor olmasıdır. Ayrıca bu farklılığın en büyük nedeni bu çalışmada incelenmiş olan pin yapıları artırılmış yüzey elemanlarına ait p/A_c oranının paralel sıralı yapıları artırılmış yüzey elemanlarına ait p/A_c oranından daha fazla olmasıdır. p/A_c oranının artması, ilgili artırılmış yüzeylerin etkenliğinin ve kanatçığın ısı transfer performansının artmasını sağlar.

5.2. Uygulama Örneği 1: LED'li DRL Termal Simülasyonu ve Test Sonuçları

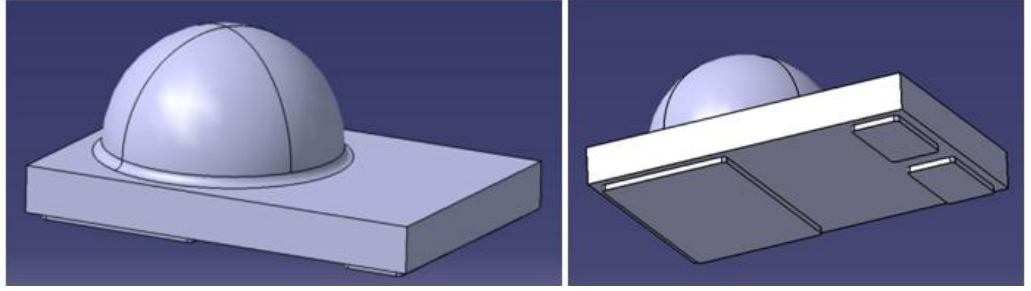
Bu uygulama örneğinde, MCPCB ve metal soğutucudan oluşan bir DRL ünitesinin termal davranışı incelenmiştir. Normal koşullarda bu DRL ünitesi bir farın içinde

bulunmakta ve gerekli durumlarda çalıştırılmaktadır ama burada yapılan çalışmada DRL ünitesi farın içinde değildir ve tek başına dış ortama açık halde incelenmiştir. Test ve simülasyon çalışmasında ürünün incelendiği ortam sıcaklığı 22°C'dir. Bu uygulama örneğinde FloEFD V5 yazılımının LED modülü kullanılmıştır. Bu uygulama örneğinde incelenen ürüne ait geometri Şekil 3.24' te görülmektedir.



Şekil 3.24. Bir otobüse ait farın DRL fonksiyonuna ait PCB ve soğutucu (DRL fonksiyonu, altıtane Philips Luxeon Rebel LED ışık kaynağından oluşmaktadır)

Kullanılan LED çeşidi, Philips Luxeon Rebel LED'dir ve bu LED, FloEFD V5 yazılımı LED modülü içerisindeki kütüphanede bulunmaktadır. Simülasyon için kütüphanedeki bu LED elemanı kullanılmıştır. Kullanılan LED'in geometrisi de Şekil 3.25' te görülmektedir.



Şekil 3.25. Simülasyonda kullanılan LED'lere ait geometrinin görünümü (LED'lere ait termal, elektriksel ve optik davranış bilgileri FloEFD V5 yazılımı içerisindeki LED modülünde mevcut olduğundan dolayı LED'in iç detayları simülasyona dahil edilmemiştir)

Bakır tabaka tarafından alınan ve alüminyum alaşımı kanatçığa aktarılan ısı enerjisi, kanatçık tarafından ortamdaki akışkan olan havaya artırılmış temas yüzeyi yardımıyla transfer edilmektedir.

5.2.1. Termal simülasyon için yapılan kabuller ve uygulanan sınır koşulları

Uygulanan sınır koşulları ve yapılan kabuller aşağıda belirtilmiştir:

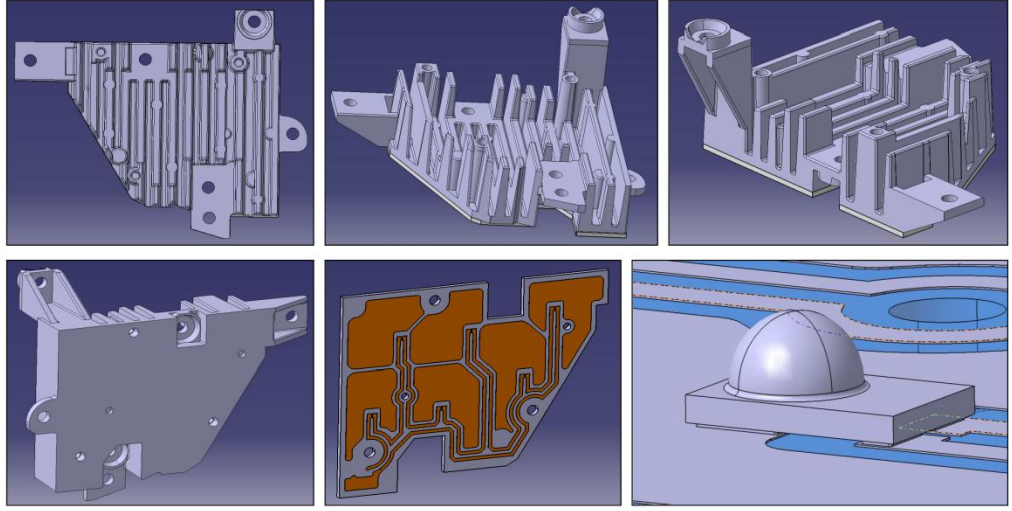
- Ortam sıcaklığı test sırasında 22°C olarak ölçülmüş ve simülasyon için de aynı şekilde 22 °C olarak uygulanmıştır.
- Yapılan simülasyonda ve testte geçerli olan taşınım mekanizması sadece doğal taşınım mekanizmasıdır. Sistem içerisinde zorlanmış taşınım etkileri mevcut değildir.
- LED'ler birbirine seri olarak bağlıdır ve hepsi aynı akım ile sürülmektedir. LED'ler simülasyonda 350 mA ile ve testte 352 mA ile sürülmüştür. 2 mA akım farkının sistem üzerinde oluşturacağı sıcaklık farkı ihmal edilmiştir.
- LED'lerin modellenmesi için FloEFD V5 LED modülü kullanılmıştır ve bu LED'e ait termal, elektriksel ve optik davranış bilgileri bu modüle ait kütüphanede mevcuttur.

- Kullanılan LED'ler beyaz ışık yaymaktadır ve artan LED çip sıcaklığıyla ortaya çıkan ışık düşümü (degradation) miktarı kırmızı ve amber renkli LED'lere göre daha azdır.
- MCPCB üzerindeki bakır kaplama akım yollarının kalınlığı 35 mikrondur. Bakır akım yolları ve alüminyum PCB arasındaki yalıtkan katmanın termal davranışa olan etkisinin çok sınırlı olacağı düşünülmüş ve bu nedenle simülasyon geometrisine dahil edilmemiştir.
- Kanatçık malzemesi Etial 160 alüminyum alaşımı malzemedir ve yüzey emissivity değeri olarak "aşırı oksitlenmiş alüminyum yüzey" emissivity değeri kullanılmıştır ve bu değer 0,27'dir. Bu veri FloEFD V5 kütüphanesinden seçilmiştir.
- MCPCB'nin kaplamasız kenar yüzeylerinin emissivity değeri ticari "alüminyum sac yüzeyi" emissivity değeri olan 0,09 ile tanımlanmıştır. Bu veri FloEFD V5 kütüphanesinden seçilmiştir.
- Kanatçığa ait yüzeyler ve MCPCB'nin kenarındaki yüzeyler dışındaki tüm yüzeylerin emissivity değeri, simülasyonda default değer olarak tanımlanmış olan 0,85 değeridir. Sistemdeki boyalı yüzeyler ve LED yüzeyleri gibi epoksi veya plastikten oluşan yüzeyler hemen hemen siyah cisim gibi davranırlar ama bu test dahilinde ulaşılan sıcaklıklar 120°C'nin altında olacağı için radyasyonun etkisi sınırlı kalacaktır. Bu nedenle 0,85 emissivity değeri default değer olarak makul görülmüştür.
- MCPCB ve kanatçık, birbirine civatalarla sabitlenmiştir ve bu nedenle bu iki parça arasında temas direnci oluşmaktadır. Bu nedenle bu iki parça arasındaki temas yüzeyine kontak termal direnci tanımlanmıştır ve bu tanımlama 10 mikron kalınlığında hava boşluğu tanımlaması ile yapılmıştır.

5.2.2. Kanatçık ve MCPCB'nin tanıtılması

Otomotiv endüstrisinde LED'lerin soğutulması amacıyla, metal kanatçıklar sıklıkla kullanılmaktadır. Kanatçık malzemesi olarak ise ısı iletim katsayısının yüksekliği, hafifliği ve uygun fiyatı nedeniyle genellikle alüminyum tercih edilmektedir. Bazı

durumlarda söz konusu geometri döküm yoluyla üretilir ve döküm işleminin sağlıklı gerçekleştirilmesi için sıvı alüminyuma belirli oranlarda farklı metaller eklenir. Bu nedenle ortaya çıkan yeni malzemenin ısı iletim katsayısı ve yoğunluğu saf alüminyumdan farklı olmaktadır. Bu uygulama örneğinde kullanılan kanatçık, döküm yoluyla Etial 160 isimli alüminyum alaşımından üretilmiştir. Şekil 3.26’ da bu uygulama örneğinde kullanılan parçalar detaylı şekilde gösterilmiştir. Üründe kullanılan malzemelerin termofiziksel özellikleri FloEFD V5 yazılımının kütüphanesinden alınmıştır ve bu özellikler aşağıda listelenmiştir.



Şekil 3.26.MCPCB, alüminyum alaşımı soğutucu ve kullanılan LED’ingörünümü

5.2.2.1. Kanatçığa ait bilgiler

Malzeme: Etial 160 Alüminyum Alaşımı

Yoğunluk: 2760 Kg/m³

Isı İletim Katsayısı: 96,14 W/mK

5.2.2.2. MCPCB’ye ait bilgiler

Malzeme: AL 5052 Alüminyum Alaşımı

Yoğunluk: 2680 Kg/m³

Isı İletim Katsayısı: 140 W/mK

5.2.2.3. PCB üzerindeki bakır tabakaya ait bilgiler

Kalınlık: 35 mikron

Malzeme: Bakır

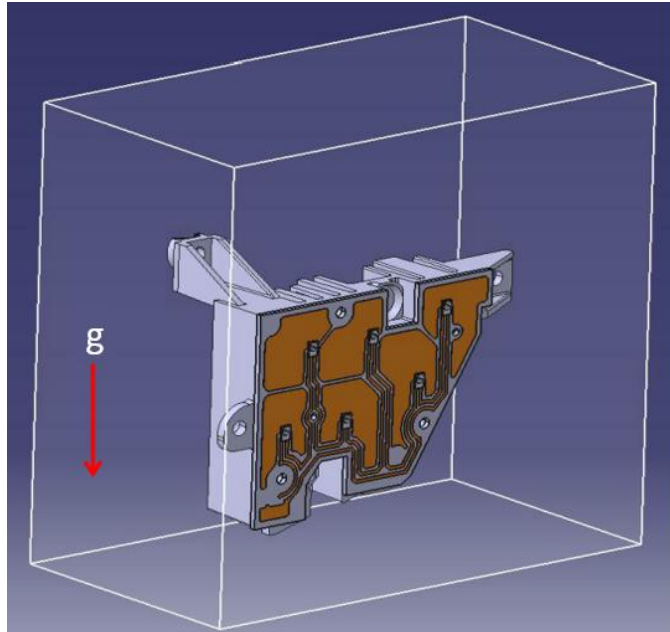
Yoğunluk: 8960 Kg/m³

Isı İletim Katsayısı: 400 W/mK

5.2.3. Simülasyon inputları

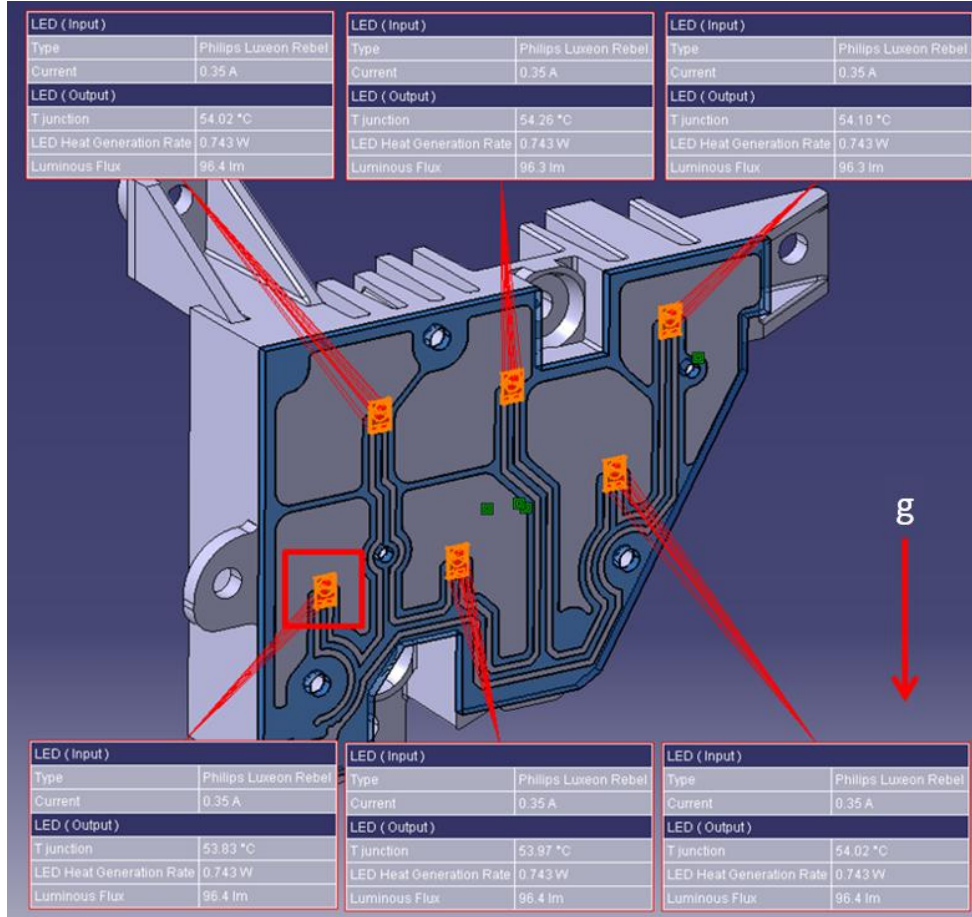
5.2.3.1. Sürme akımı ve ortam sıcaklığı

LED'lerin ışık çıkışının kontrol edilebilmesi için LED akımının kontrol edilmesi gereklidir. LED'lerin sabit voltajla çalıştırılmaları, çip sıcaklığının LED akımı üzerinde önemli ölçüde değişkenlik oluşturmasından dolayı tercih edilmezler. Bu nedenle bu uygulama örneği kapsamındaki test ve simülasyon çalışmalarında sabit akım uygulaması tercih edilmiştir. Şekil 3.27' de hesaplama domaini gösterilmiştir.



Şekil 3.27. Simülasyon modeli ve modelin etrafındaki hesaplama domaininin görünümü (Yerçekim ivmesinin yönü kırmızı ok ile gösterilmiştir (g))

Ayrıca yerçekim ivmesinin yönü de Şekil 3.27 ve Şekil 3.28’ de gösterilmiştir. Model, simülasyondaki yerleşim koşullarının gerçek çalışma koşullarındaki ile benzer olması için bu şekilde konumlandırılmıştır. Bu şekilde soğutucu üzerindeki kanatçıkların daha etkin çalışması sağlanabilmiştir.



Şekil 3.28. Simülasyonda LED’lere uygulanan akım değerleri ve simülasyon sonucunda ortaya çıkan LED çip sıcaklıklarının görünümü (FloEFD V5 LED modülü yardımıyla LED’lerin ürettikleri ısı enerjisi ve ürettikleri ışık miktarları da hesaplanabilmektedir)

Tüm LED’ler birbirine seri olarak bağlıdır ve bu nedenle simülasyon ortamında hepsi aynı anda 350 mA akım ile sürülmüştür. LED’ler üzerindeki voltaj değeri sabit akım koşullarında bile değişkenlik gösterebilir. Çünkü LED’lerin artan çip sıcaklığıyla iç dirençleri düşmekte ve üzerinde oluşan voltaj değeri de düşüş göstermektedir. Bu nedenle yukarıdaki şekilde görüldüğü gibi birbirine seri bağlı ve aynı akım ile çalışan

LED'ler üzerinde oluşan farklı çip sıcaklıkları bu LED'lere ait voltaj değerlerinin de farklılık göstermesine sebep olmaktadır. Şekil 3.28' de LED'lerin ürettiği termal güç değerleri de gösterilmiştir. Bir LED üzerinde üretilen ısı miktarının hesaplanma metodu aşağıda gösterilecektir. Simülasyon ortam sıcaklığı testin yapıldığı ortam sıcaklığı olan 22°C ile aynı seçilmiştir.

5.2.3.2. Çip güç değerlerinin hesaplanması

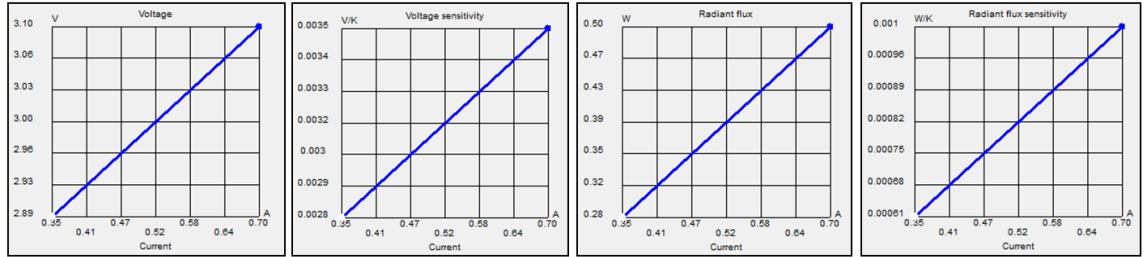
Işığa dönüşen faydalı elektriksel güç toplam elektriksel güçten çıkarılmalıdır. Bu şekilde ısıya dönüşen net elektriksel güç tespit edilebilir. LED'in ışık verimliliği ne kadar yüksek olursa birim zamanda ısıya dönüşen enerji oranı da o kadar az olacaktır. Bu durumda ısıya dönüşengüçdeğeri $P_H = V_F * I_F - \Phi_e$ olarak hesaplanabilir.

Sabit akım ile çalışan LED'ler üzerindeki voltaj, artan sıcaklıkla düşer ve sıcaklık değişimi ile voltaj değişimi arasında lineer kabul edilebilecek bir orantı mevcuttur. Bu değer voltaj duyarlılık katsayısıdır (Voltage Sensitivity- S_{VF}). Bu durumda artan çip sıcaklığı ile LED voltajı arasındaki değişim $V_F = V_{F0} - S_{VF} * (T_J - T_0)$ olarak hesaplanabilir.

Sabit akım ile çalışan LED'lerden çıkan ışık miktarı, artan sıcaklıkla düşer ve sıcaklık değişimi ile ışık çıkışı miktarındaki düşüş arasında lineer kabul edilebilecek bir orantı mevcuttur. Bu değer ışık çıkışı duyarlılık katsayısıdır (Radiant Flux Sensitivity- S_{Φ_e}). Bu durumda artan sıcaklık ile ışık çıkışı miktarı arasındaki değişim $\Phi_e = \Phi_{e0} - S_{\Phi_e} * (T_J - T_0)$ olarak hesaplanabilir.

T_0 referans sıcaklığı, farklı LED çip sıcaklıkları ile ortaya çıkan yeni voltaj ve ışık çıkışı miktarlarının hesaplanması için bu verilerin ölçüldüğü referans sıcaklık değeridir. Artan veya azalan sıcaklık etkisiyle ortaya çıkan yeni voltaj ve ışık çıkışı miktarları bu referans sıcaklık değerindeki verilere yeniden hesaplanan verilerin eklenmesi veya

çıkarılmasıyla hesaplanabilmektedir. Bu şekilde farklı LED çip sıcaklıklarındaki ışık çıkışı verimi ve net olarak ısıya dönüşen elektriksel güç hesaplanabilmektedir.Şekil 3.29’da ise bu uygulama örneğinde kullanılan LED’in elektriksel ve optik davranış parametrelerinin akıma göre değişim grafikleri yer almaktadır.



Şekil 3.29.FloEFD V5 LED modülü içerisinde mevcut olan sıcaklığa bağlı elektriksel ve optik davranış parametrelerinin akıma göre değişim grafiklerinin görünümü

Şekil 3.30’da ise bu uygulama örneğinde kullanılan LED’in FloEFD V5 LED modülü içerisinde mevcut olan sıcaklığa bağlı elektriksel ve optik davranış parametrelerinin 350mA ve 700mA’lık akımlara karşılık gelen değerlerigösterilmektedir.

<p>Property:</p> <p>Voltage</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Current</th> <th>Voltage</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.35 A</td> <td>2.89 V</td> </tr> <tr> <td>0.7 A</td> <td>3.1 V</td> </tr> </tbody> </table>	Current	Voltage	0.35 A	2.89 V	0.7 A	3.1 V	<p>Property:</p> <p>Voltage sensitivity</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Current</th> <th>Voltage sensitivity</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.35 A</td> <td>0.00276 V/K</td> </tr> <tr> <td>0.7 A</td> <td>0.00354 V/K</td> </tr> </tbody> </table>	Current	Voltage sensitivity	0.35 A	0.00276 V/K	0.7 A	0.00354 V/K
Current	Voltage												
0.35 A	2.89 V												
0.7 A	3.1 V												
Current	Voltage sensitivity												
0.35 A	0.00276 V/K												
0.7 A	0.00354 V/K												
<p>Property:</p> <p>Radiant flux</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Current</th> <th>Radiant flux</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.35 A</td> <td>0.2777 W</td> </tr> <tr> <td>0.7 A</td> <td>0.5038 W</td> </tr> </tbody> </table>	Current	Radiant flux	0.35 A	0.2777 W	0.7 A	0.5038 W	<p>Property:</p> <p>Radiant flux sensitivity</p> <table border="1"> <thead> <tr> <th>Current</th> <th>Radiant flux sensitivity</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>0.35 A</td> <td>0.00061 W/K</td> </tr> <tr> <td>0.7 A</td> <td>0.00103 W/K</td> </tr> </tbody> </table>	Current	Radiant flux sensitivity	0.35 A	0.00061 W/K	0.7 A	0.00103 W/K
Current	Radiant flux												
0.35 A	0.2777 W												
0.7 A	0.5038 W												
Current	Radiant flux sensitivity												
0.35 A	0.00061 W/K												
0.7 A	0.00103 W/K												

Şekil 3.30.FloEFD V5 LED modülü içerisinde mevcut olan sıcaklığa bağlı elektriksel ve optik davranış parametrelerinin akıma karşılık gelen değerleri

$T=T_0=80^{\circ}\text{C}$ LED ip sıcaklığında ve 350 mA sabit akım koşullarında,

$$V_F = 2,89 \text{ V}$$

$$I_F = 0,35 \text{ A}$$

$$\Phi_e = 0,2777 \text{ W}$$

$$P_H = V_F * I_F - \Phi_e = (2,89)*(0,35)-0,2777= 0,7338 \text{ W}$$

$$V_F * I_F = (2,89)*(0,35)=1,0115 \text{ W}$$

$$\text{Elektriksel Gücün Isıya Dönüşüm Oranı} = (0,7338)/(1,0115)=0,7254$$

LED çiplerinin sıcaklığının 80°C olması durumunda, sabit 350 mA akım ile çalışırken harcanan elektriksel gücün %72,54'ü ısıya ve %27,46'sı da ışığa dönüşmektedir.

FloEFD LED modülü yardımıyla yapılan termal simülasyon sonucunda maksimum LED ip sıcaklığı $57,03^{\circ}\text{C}$ olmuştur ve bu sıcaklıkta LED'in verimliliği ip sıcaklığının 80°C olması durumuna göre farklılık gösterecektir.Referans sıcaklık değeri olan 80°C LED ip sıcaklığının altındaki sıcaklık değerlerinde LED ile ilgili güç hesaplamaları aşağıda gösterilmiştir.Simülasyon sonuçları üzerinden yapılan hesaplamalar yardımıyla elde edilen güç değerleri ile test düzeneği üzerinde ölçülerek hesaplanan güç değerleri birbiriyle kıyaslanacaktır. İlgili hesaplamalar aşağıda gösterilmiştir:

$$\Delta T = T_J - T_0 = 57,03 - 80 = -22,97^{\circ}\text{C}$$

350 mA akım ile çalışma koşulundaLED ip sıcaklığının $57,03^{\circ}\text{C}$ olması durumunda,LED üzerindeki voltajve üretilen ışık gücü aşağıda hesaplanmıştır.

$$V_F = V_{F0} - S_{VF}*(T_J - T_0)=2,89-(0,00276)*(-22,97)=2,9533 \text{ V}$$

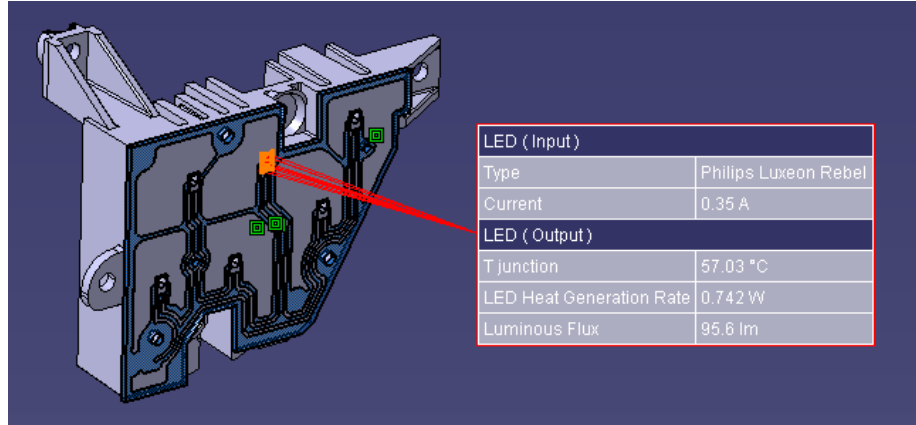
$$V_F * I_F = (2,9533) * (0,35) = 1,03365 \text{ W}$$

$$\Phi_e = \Phi_{e0} - S_{\Phi_e} * (T_J - T_0) = 0,2777 - (0,00061) * (-22,97) = 0,2917 \text{ W}$$

$$P_H = V_F * I_F - \Phi_e = (2,9533) * (0,35) - 0,2917 = 0,74195 \text{ W}$$

$$\text{Elektriksel Gücün Isıya Dönüşüm Oranı} = (0,74195) / (1,03365) = 0,7177$$

LED çipi 57,03°C sıcaklıkta, sabit 350 mA akım ile çalışırken harcanan elektriksel gücün %71,77'si ısıya ve %28,23'ü de ışığa dönüşmektedir. LED çipinin daha düşük sıcaklıklarda çalışması durumunda daha yüksek verimle çalıştığı görülmektedir. Şekil 3.31'de ise simülasyon sonucunda hesaplanan LED çipi sıcaklığı, LED'in ürettiği termal güç ve ışık akısı değerleri görülmektedir.



Şekil 3.31. Simülasyon sonucunda hesaplanan LED çipi sıcaklığı, LED'in ürettiği termal güç ve ışık akısı

Simülasyon sonucunda LED çipi tarafından üretilen termal güç değeri her LED için yaklaşık olarak 0,742 W olarak hesaplanmıştır ve bu değer LED çipinde üretilen termal güce tekabül etmektedir. Hazırlanan test düzeneği üzerinde yapılan ölçümlerde test sırasında 352mA sabit akım tespit edilmiştir ve bu akım değerinde seri bağlı 6 LED'in uçlarında 17,44V toplam potansiyel fark ölçülmüştür. Bu durumda aşağıdaki hesaplamalar yapılabilir:

Toplam Harcanan Elektriksel Güç = (17,44)*(0,352)=6,13888 W

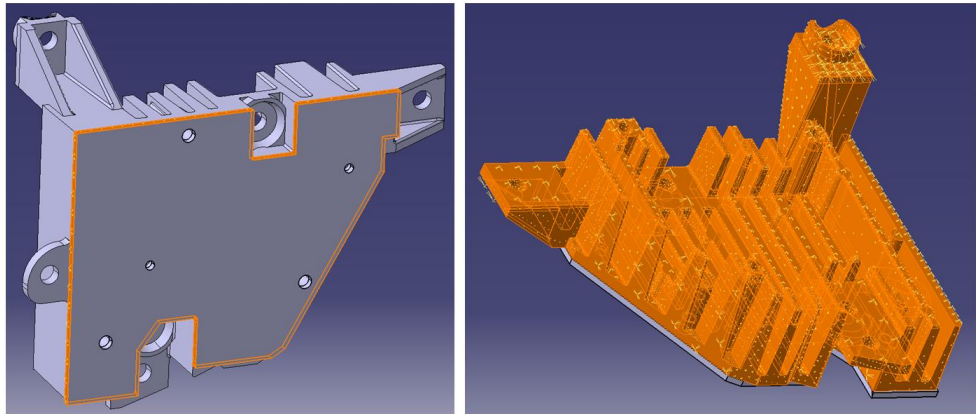
$P_H(6 \text{ LED}) = (6,13888)*(0,7177)=4,4058$

$P_H(1 \text{ LED}) = (4,4058)/6 = 0,7343 \text{ W}$

Test sonucunda elde edilen termal güç olan 0,7343 W ile FloEFD yazılımının LED modülü yardımıyla hesaplanan termal güç olan 0,742 W birbirine çok yakındır.

5.2.3.3. Yüzey neşretme katsayısı (emissivity) değerleri

Soğutucuya ait kanatçık yüzeylerinin neşretme katsayısı, bu yüzeylerden ışıyım yoluyla ortama transfer edilen ısı güç miktarını etkileyecektir. Soğutucunun yüzey alanı miktarı, incelenen geometrinin toplam yüzey alanının büyük kısmını oluşturduğu için bu yüzeylere ait neşretme katsayısı yüksek öneme sahiptir. Aslında düşük sıcaklıklarda ışıyım yoluyla yapılan ısı transferinin toplam ısı transferi içindeki payı genelde ihmal edilebilir düzeydedirama bu çalışma bir kıyaslama çalışması olduğu için bu etki de hesaba katılmıştır.Şekil 3.32’ de ise simülasyonda yüzey emissivite değerlerinin tanımlandığı yüzeyler gösterilmiştir.



Şekil 3.32. Simülasyonda yüzey emissivite değerlerinin tanımlandığı yüzeylerin görünümü (Boyasız MCPCB kesim yüzeylerini (solda) ve kanatçığa ait yüzeyler (sağda) görülmektedir)

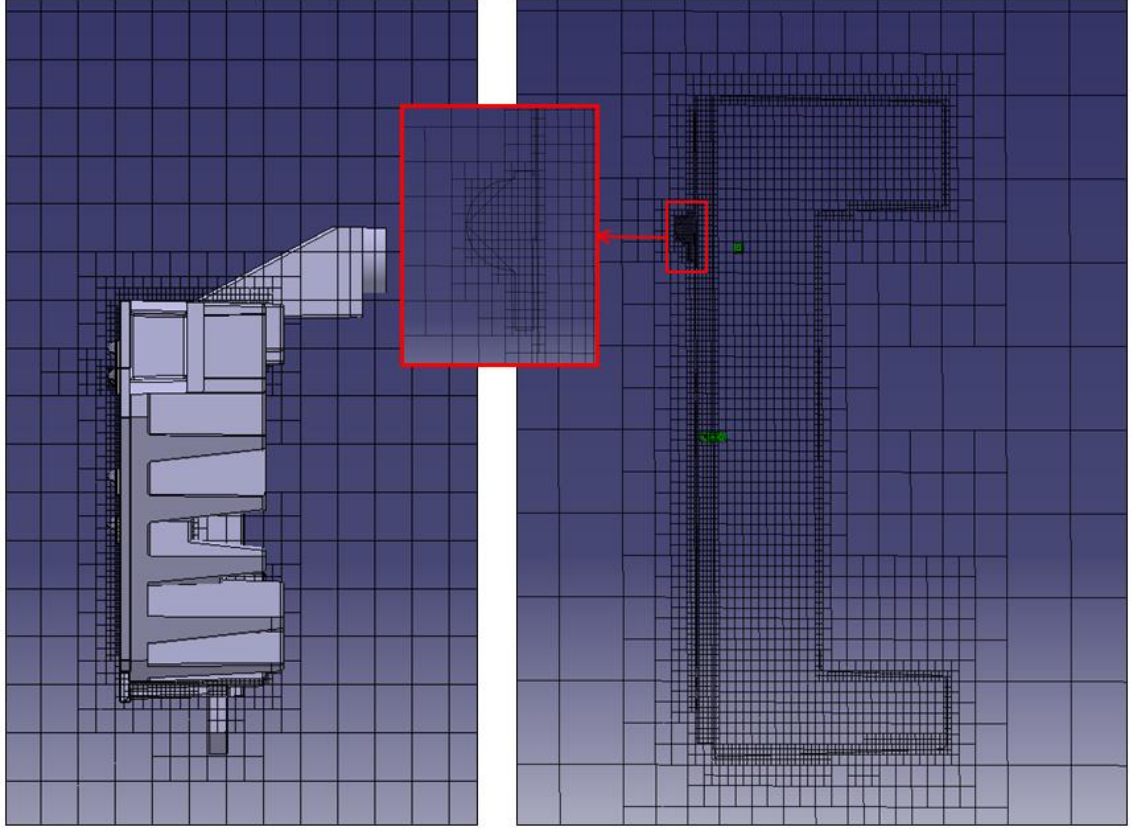
Şekil 3.32’desolda gösterilen yüzeyler için kullanılan yüzey emissivite değeri 0,09’dur. Bu yüzeyler için yüzey emissivite değeri olarak FloEFD kütüphanesindeki ‘‘Aluminium, commercial sheet’’ isimli alüminyum ticari sac malzemeye ait yüzey neşretme katsayısı (emissivity) değeri seçilmiştir. Şekil 3.32’ de sağda gösterilen yüzeyler için kullanılan yüzey emissivite değeri ise 0,27’dir ve aşırı oksitlenmiş alüminyum alaşımı yüzeyler için bu değer kullanılmıştır. Çizelge 3.2’ de, bu uygulama örneği çalışmasında tanımlanan yüzey neşretme katsayısı değerleri listelenmiştir. Çizelgede görüldüğü gibi söz konusu yüzey neşretme katsayıları 400 K sıcaklığa sahip yüzeyler içindir. Bu uygulama örneğinde hesaplanan ve ölçülen yüzey sıcaklıkları 400 K’ den az olmasına rağmen bu durum ihmal edilmiş ve 400 K değerindeki yüzey neşretme katsayısı değeri daha aşağıdaki sıcaklık değerleri için de kullanılmıştır. Şekil 3.32’de gösterilen yüzeyler haricindeki tüm yüzeyler için kullanılan genel yüzey emissivite değeri 0,85’tir.

Çizelge3.2.MCPCB kenarındaki kesim yüzeyleri (Alüminyum, ticari sac) ve alüminyum alaşımı kanatçığa (Alüminyum, oksitlenmiş yüzey) ait yüzeyler için uygulanan emissivite değerlerine ait çizelge (FloEFD V5 yazılım kütüphanesi)

Yüzey tipi	Alüminyum, ticari sac	Alüminyum, oksitlenmiş yüzey
Referans sıcaklık	400 K	400 K
Yüzey neşretme katsayısı (emissivity)	0,09	0,27

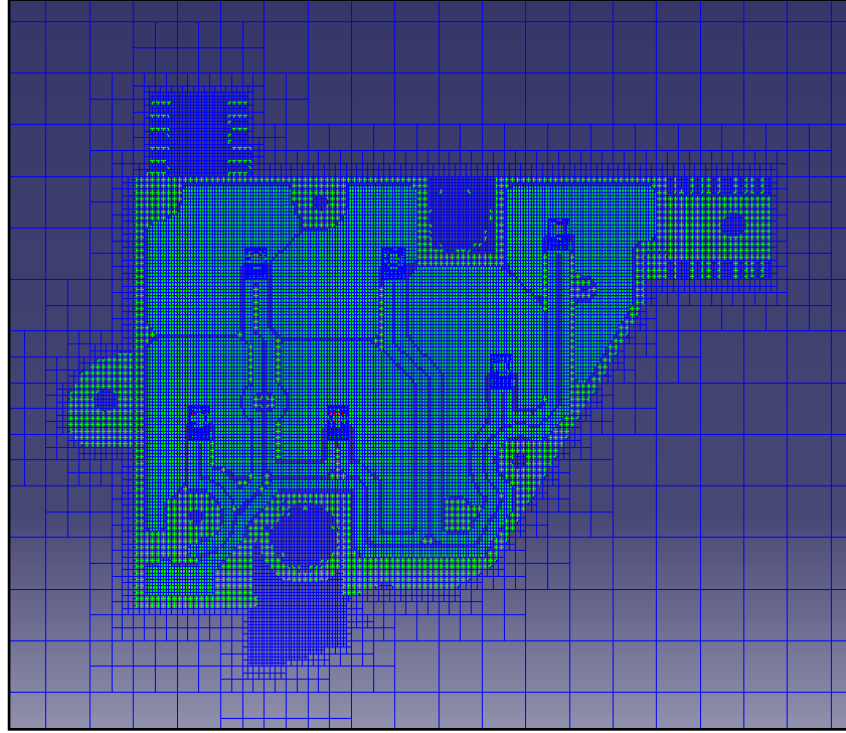
5.2.3.4. Sonlu hacimler ağı görünümü

Bu uygulama örneği çalışması bünyesinde öncelikle söz konusu geometri için ağdan bağımsız hücre boyutları ve ağ yapısı tespit edilmiş ve bu ağ yapısı ile gerçekleştirilen termal simülasyon sonuçları test sonuçları ile kıyaslanmıştır. Şekil 3.33’ te söz konusu ürünün bir LED çipinin merkezine yerleştirilmiş olan kesit düzlemi üzerindeki sonlu hacimler ağ yapısının görünümü yer almaktadır.



Şekil 3.33.Bir LED çipinin merkezine yerleştirilmiş olan kesit düzlemi üzerindeki sonlu hacimler ağ yapısının görünümü

Şekil 3.33' te görüldüğü gibi LED ve PCB bölümleri soğutucuya göre daha küçük hücre boyutlarıyla mesh edilmiştir. Ayrıca soğutucuya ait kanatçıkların aralarındaki hücre sayısı da bu bölgelerdeki hava akışının hassas şekilde simüle edilebilmesi için kontrol edilmiş ve optimum seviyede ayarlanmıştır. Ayrıca Şekil 3.34' te görüldüğü gibi katı parçaları oluşturan hacim elemanları ve katı ile akışkan ara yüzünü oluşturan hacim elemanlarının boyutları, geometrinin ve sınır tabakalardaki hava akışının daha hassas modellenebilmesi için küçük boyutlarda seçilmiş iken sadece akışkanı oluşturan hacim elemanlarının boyutları göreceli olarak daha büyük seçilmiştir.



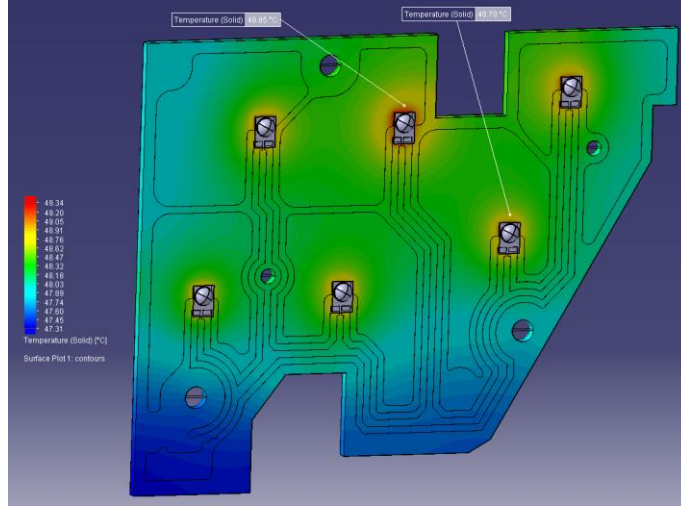
Şekil 3.34.Hesaplama domaini üzerinden alınmış mesh yapısı görüntüsü

5.2.4. Simülasyon sonuçları

5.2.4.1. MCPCB üzerindeki sıcaklık dağılımı

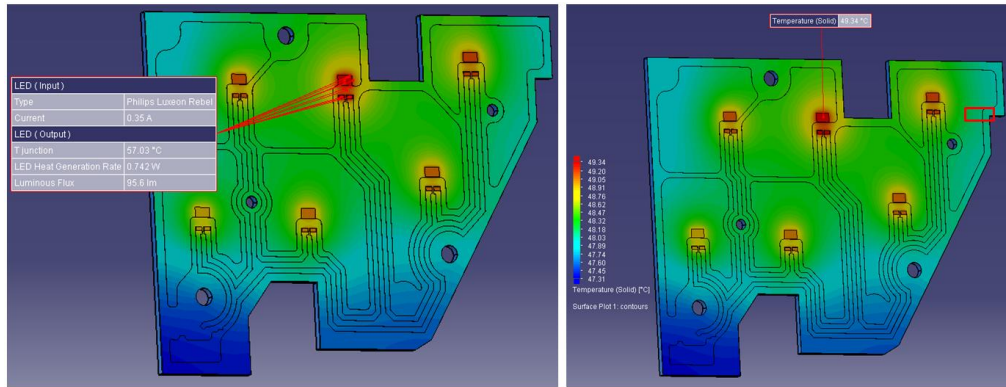
Bu uygulama örneğinde kullanılan LED PCB'si Al 5052 (Alüminyum alaşımı) malzemedir ve 140 W/mK ısı iletim katsayısına sahiptir. Genellikle metal çekirdekli PCB'lerin yüksek ısı iletim katsayıları nedeniyle bu tür PCB'ler üzerinde oluşan sıcaklık dağılımı tatmin edici derecede uniform davranışlıdır ve sıcaklık gradyanları düşüktür. FR4 PCB gibi düşük ısı iletim katsayısına sahip PCB'ler üzerinde oluşan sıcaklık dağılımları ise genelde uniform davranışlı değildir ve sıcaklık gradyanları yüksektir. FR4 PCB'ler üzerindeki bakır kaplama tabakasının kalınlığı ve alanı sıcaklık değerlerini önemli ölçüde etkilerken MCPCB'ler üzerindeki bakır kaplama tabakasının kalınlığı ve alanı göreceli olarak daha az etkiye sahiptir. Bu nedenle MCPCB'ler üzerindeki bakır kaplama geometrisinin detayları bazı durumlarda ihmal edilebilirken FR4 PCB'ler üzerindeki bakır kaplama geometrisinin detayları ihmal edilemez.Şekil

3.35' te görüldüğü gibi MCPCB üzerindeki hesaplanan maksimum sıcaklık $49,34\text{ }^{\circ}\text{C}$ ve minimum sıcaklık $47,31\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir.



Şekil 3.35.MCPCB üzerinde hesaplanmış olan sıcaklık dağılımı görünümü

Şekil 3.36' da görüldüğü gibi hesaplanan maksimum LED çip sıcaklığı ise $57,03\text{ }^{\circ}\text{C}$ 'dir. Görüldüğü gibi sıcaklık gradyanları oldukça düşüktür ve maksimum ile minimum sıcaklıklar arasındaki fark yaklaşık olarak 2°C civarındadır.



Şekil 3.36.LED çip sıcaklığı değeri (solda $57,03^{\circ}\text{C}$) ve MCPCB üzerindeki LED dip sıcaklığı değerlerinin görünümü (sağda $49,34^{\circ}\text{C}$)

Şekil 3.36’ da görülen LED’in çip sıcaklığı (T_{junction}) ve dip sıcaklığı verilerinin yardımıyla söz konusu LED’in termal direnç değeri kolaylıkla hesaplanabilir. Bu uygulamadaki test ve simülasyon çalışmasında kullanılan LED tipi Philips Luxeon Rebel DS58 LED’dir. Bu LED beyaz ışık yaymaktadır ve Çizelge 3.3’te bu LED’e ait teknik veriler gösterilmiştir.

Çizelge3.3. Philips Luxeon Rebel DS58 LED ürüne ait teknik bilgilerin görünümü (Anonim 2009 - Philips Lumileds Technical Datasheet DS58)

Color	Forward Voltage (V)			Typical Dynamic Resistance (R_s)	Typical Temperature Coefficient of Forward Voltage ($\text{mV}/^\circ\text{C}$)	Typical Thermal Resistance Junction to Thermal Pad ($^\circ\text{C}/\text{W}$)
	Min.	Typ.	Max.			
Automotive White	2,55	3,05	3,75	0,3	-3,0	10
Red-Orange	2,31	2,9	3,51	1,5	-3,0	12
Amber	2,31	2,9	3,51	1,3	-2,5	12

Görüldüğü gibi LED’in çipi (junction) ile tabanı (thermal pad) arasındaki termal direnç değeri Çizelge 3.3’te $10^\circ\text{C}/\text{W}$ olarak belirtilmiştir. Simülasyon sonucunda LED’in alt dip noktasında, bakır tabaka üzerinde çıkan sıcaklık ve LED çipi arasındaki sıcaklık farkı kontrol edilebilir. FloEFD LED modülü yardımıyla yapılmış olan hesaplamaların doğruluğu bu şekilde incelenebilir.

$$(57,03-49,34) = 7,69^\circ\text{C}$$

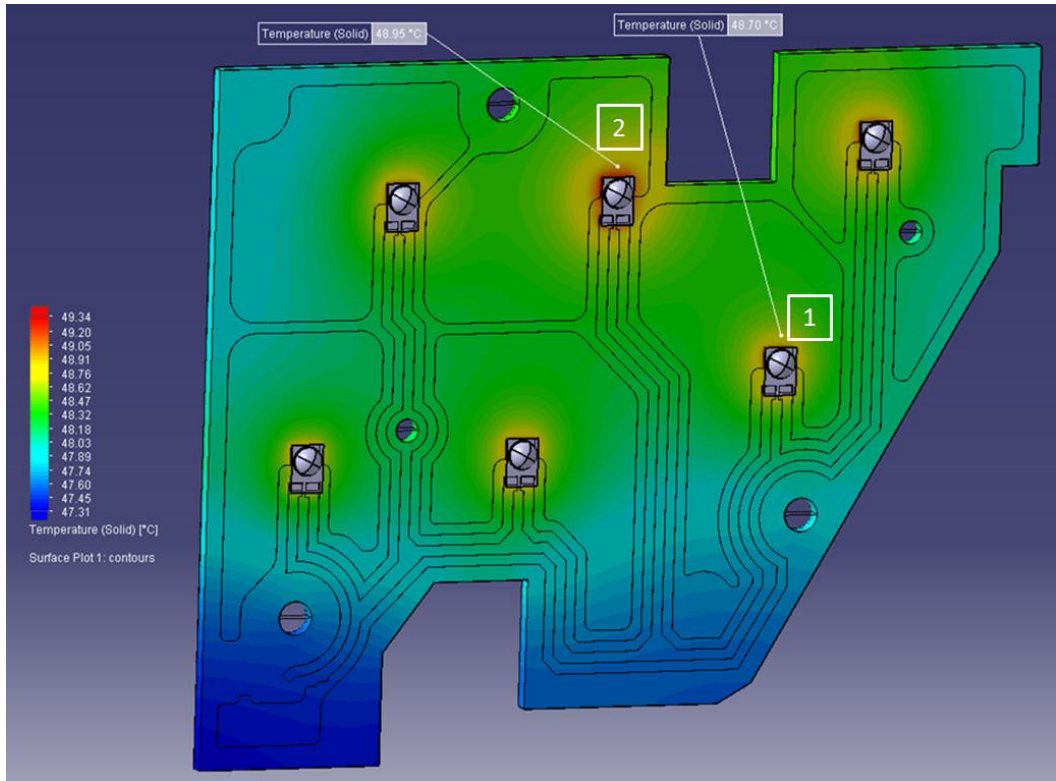
$$P_H(1 \text{ LED}) = 0,742\text{W}$$

$$R_{J-Th} = (T_j - T_{th}) / P_H = (57,03 - 49,34) / 0,742 = 10,363^\circ\text{C}/\text{W}$$

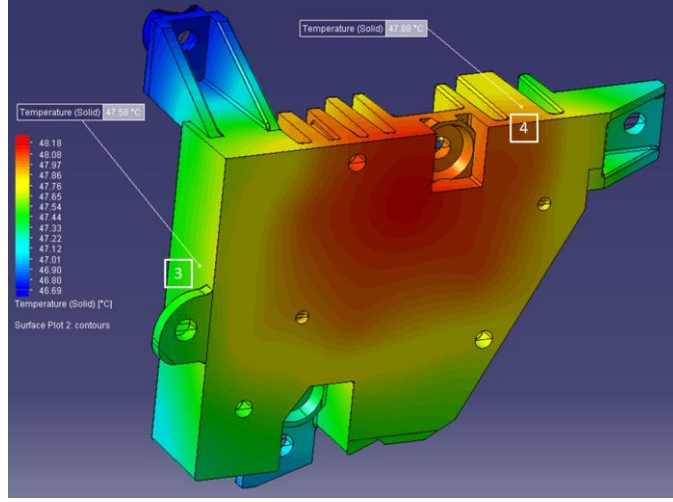
Yukarıdaki hesaplamada görüldüğü gibi termal direnç değeri 10,363 °C/W olarak hesaplanmıştır ve bu değer Philips Luxeon Rebel DS58 LED'in ilgili teknik dokümanlarında gösterilen 10 °C/W'lik termal direnç değeriyle uyum göstermektedir.

5.2.4.2. MCPCB ve kanatçık üzerindeki sıcaklık dağılımı

MCPCB üzerinde iki noktada termokupllar ile ölçüm gerçekleştirilmiştir. Termal simülasyon sonucunda bu noktalarda hesaplanan sıcaklık değerleri ve test sırasında ölçülen sıcaklık değerleri kıyaslanmıştır. Bu şekilde FloEFD V5 yazılımı ile elde edilen sonuçların doğrulanmasına yönelik yapılan bu çalışmada simülasyon ile test sonuçları arasındaki benzerlik ve uyum irdelenmiştir. Şekil 3.37 ve Şekil 3.38' de MCPCB ve soğutucu üzerindeki sıcaklık dağılımları gösterilmiştir.

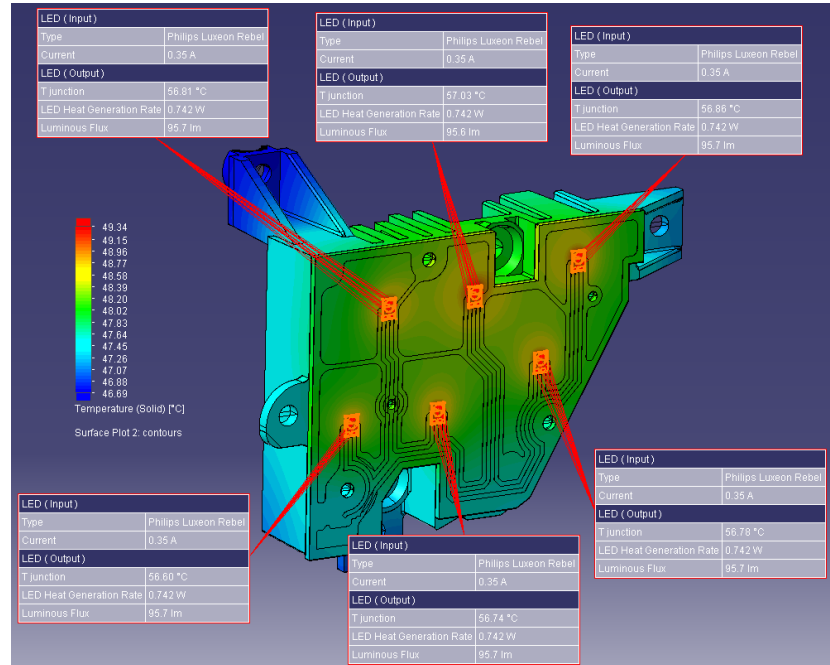


Şekil 3.37. Test sırasında termokupllar ile MCPCB üzerinde sıcaklık ölçümü yapılan noktalarda simülasyon sonucunda hesaplanan sıcaklık değerlerinin görünümü (1 ve 2 nolu ölçüm lokasyonlarında hesaplanan sıcaklık değerleri)



Şekil 3.38. Test sırasında termokupllar ile kanatçık üzerinde sıcaklık ölçümü yapılan noktalarda simülasyon sonucunda hesaplanan sıcaklık değerlerinin görünümü (3 ve 4 nolu ölçüm lokasyonlarında hesaplanan sıcaklık değerleri)

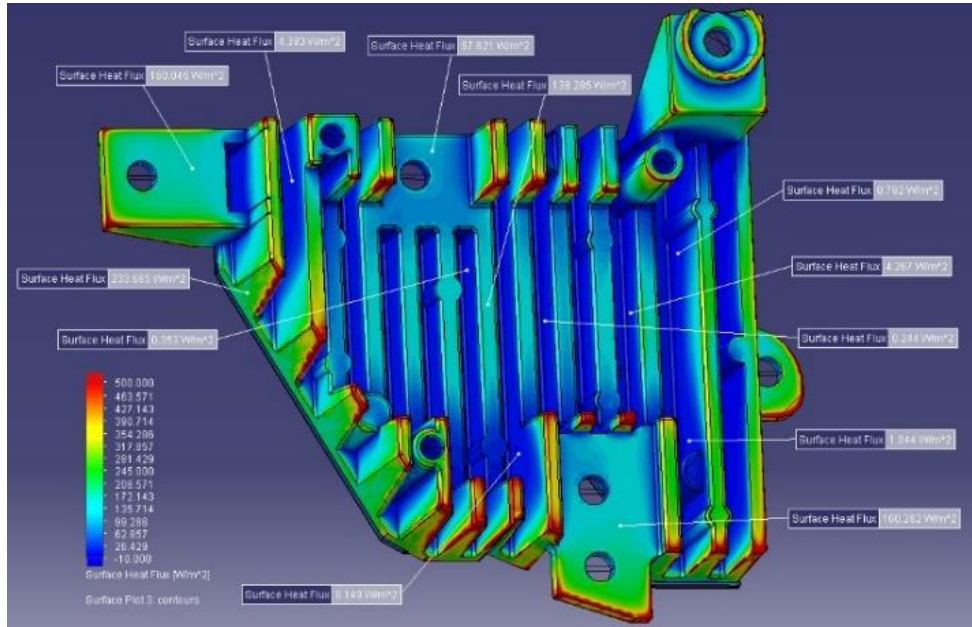
Şekil 3.39’da ise simülasyon sonucunda hesaplanan LED çipi sıcaklıkları, LED’lerin ürettiği ısıl güç ve ışık miktarları gösterilmektedir.



Şekil 3.39. Simülasyon sonucunda hesaplanan LED çip sıcaklığı, LED’lerin ürettiği ısıl güç ve ışık miktarı değerleri

5.2.4.3. Doğal taşınım yüzey ısı akısı

Soğutucu gövdesi üzerindeki kanatçıklar arasındaki mesafe değeri 3 mm'dir. Kanatçıkların yaklaşık ortalama yüzey sıcaklığı ise 46 °C civarındadır. Bölüm 4.6' da açıklandığı üzere kanatçık yüzeyleri ve ortamdaki havanın sıcaklığı arasındaki farkın az olması, optimum kanatçıklar arası açıklık değerinin de fazla olmasını gerektirmektedir. Şekil 3.40' tasoğutucu gövdenin yüzeylerinde hesaplanan doğal taşınım ısı akısı değerleri görülmektedir.

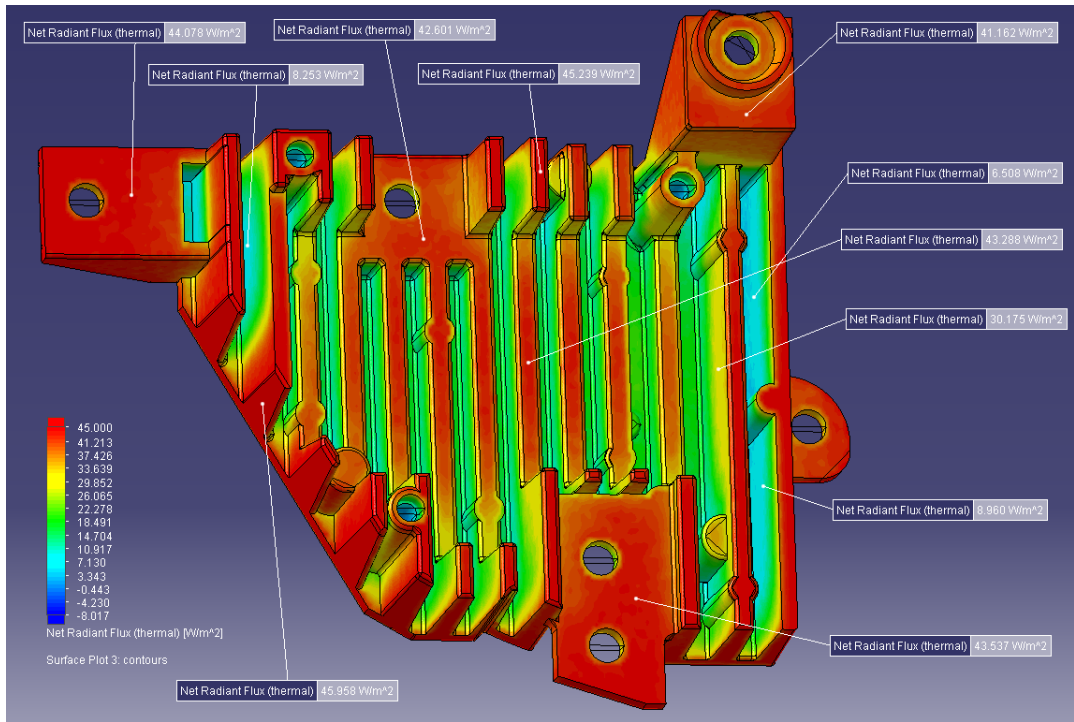


Şekil 3.40. Simülasyon sonucunda hesaplanan kanatçık yüzeylerindeki doğal taşınım ısı akısı değerleri

Görüldüğü gibi kanatçıklar arasındaki mesafenin bu testin gerçekleştirildiği koşullara göre yeterli olmaması bu bölgelerdeki hava akış hızının az olmasına sebep olmakta ve birbirine yakın konumda olan iki sıcak yüzey cidarlarında oluşan termal sınır tabakaların birleşmesine ve doğal taşınım ile ısı transferinin zorlaşmasına sebep olmaktadır. Görüldüğü gibi kanatçıkların açıkta bulunan yüzeyleri üzerindeki ısı akısı değerleri, kanatçıkların birbirine yakın kısımlarındaki ısı akısı değerlerine göre çok daha yüksektir. Bu nedenle kanatçıklar arasındaki uzaklıkların optimize edilmesi gereklidir.

5.2.4.4. Net ışı nım yüzey ısı akısı

Net ışı nım yüzey akısı, birim soğutucu yüzeyinden ışı nım yoluyla transfer edilen net güç miktarını ifade etmektedir. Pozitif değerler söz konusu yüzeylerden net ışı nım gücü çıkışı olduğunu belirtirken negatif değerler söz konusu yüzeylerden net ışı nım gücü girişinin olduğunu belirtmektedir. Şekil 3.41’de soğutucu gövdenin yüzeylerinde hesaplanan net ışı nım ısı akısı değerleri görölmektedir.

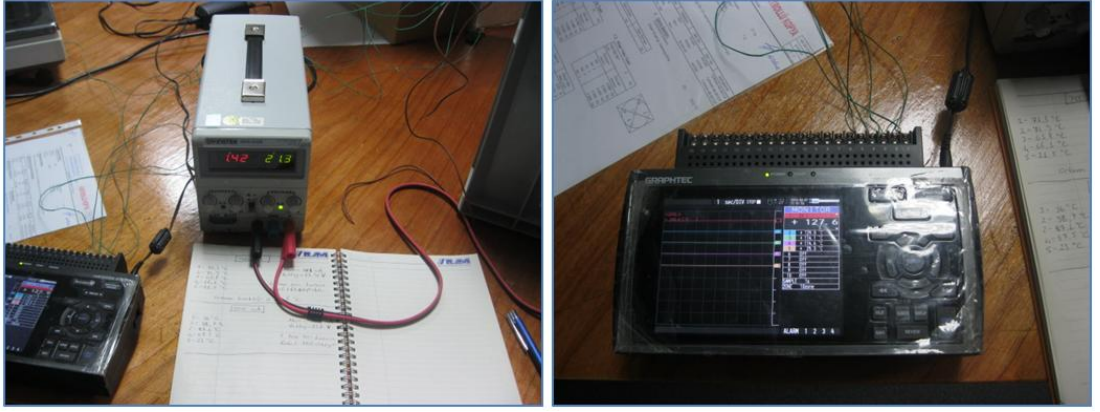


Şekil 3.41. Simülasyon sonucunda hesaplanan kanatçık yüzeylerindeki net ışı nım ısı akısı değerleri

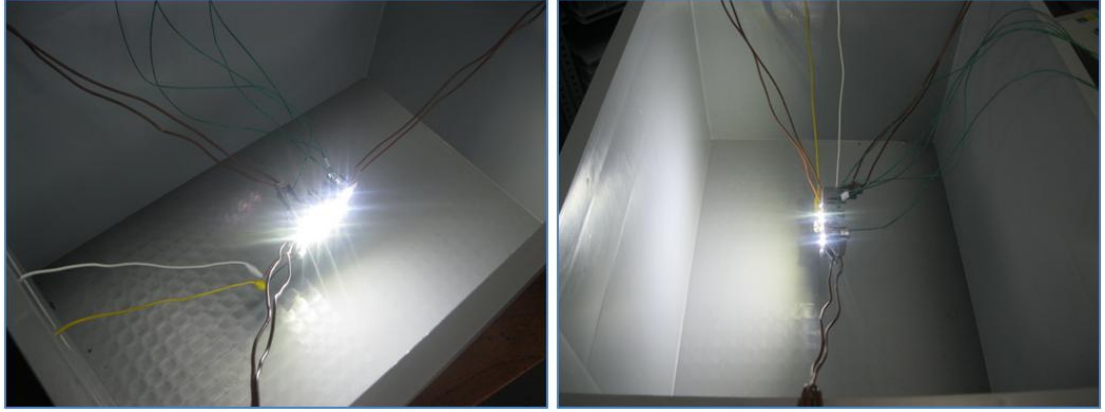
Fark edildiği gibi kanatçıkların iç bölgelerindeki karşılıklı yüzeylerin sıcaklıklarının birbirine çok yakın olması bu yüzeylerden atılan net ışı nım ısı akısının az olmasına sebep olmakta ve birim yüzeyden yapılan ışı nımla ısı transferinin azalmasına sebep olmaktadır. Göröldüğü gibi kanatçıkların açıkta bulunan yüzeyleri üzerindeki ısı akısı değerleri, kanatçıkların birbirine yakın kısımlarındaki ısı akısı değerlerine göre daha yüksektir.

5.2.5. Test sonuçları

Testin hassas şekilde gerçekleştirilebilmesi için aşağıdaki şekillerde görülen güç sağlayan cihazlar ve ölçüm yapmayı sağlayan cihazlar kullanılmıştır. Şekil 3.42 ve Şekil 3.43' te deney düzeneğinde kullanılan güç kaynağı, sıcaklık ölçüm cihazı ve üzerinde ölçüm yapılan DRL ünitesi görülmektedir.



Şekil 3.42.Sabit voltaj sağlayabilen GWINSTEK SPS-606 güç kaynağı (solda) ve sıcaklık ölçümü için kullanılan data toplama cihazı Graphtec GL820 Midi Data Logger (sağda) ürünlerin görünümü



Şekil 3.43.Deney düzeneğinin görünümü (PCB ve soğutucunun ortamdaki hava akışlarından etkilenmesini engellemek için üzerinde ölçüm yapılan düzenek yan tarafları kapalı bir kasa içinde test edilmiştir ve ortam sıcaklığında bulunmaktadır)

Kullanılan tüm cihazların isimleri ve teknik bilgileri, deneyin ölçüm hassasiyetinin anlaşılması açısından Şekil 3.44’ te listelenmiş ve gösterilmiştir.

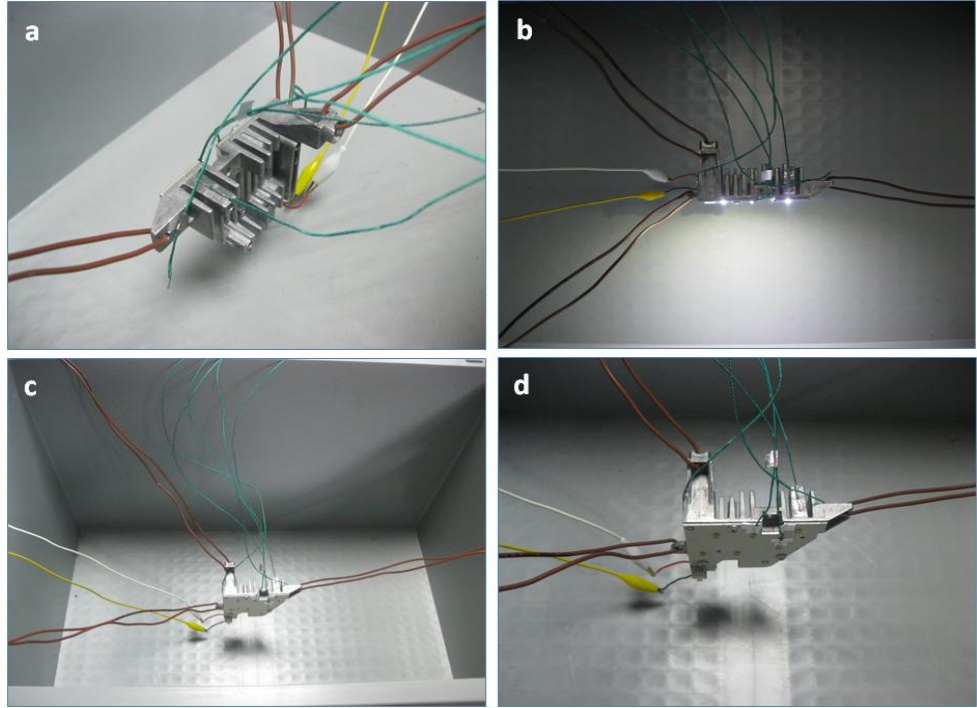
Ölçülen Büyüklükler	Cihazı Adı	Ölçüm Cihazı Markası	Ölçüm Aralığı	Ölçüm Hassasiyeti
Yüzey Sıcaklığı	K Tipi Termokupl 2m	Tekon 20T2KCCEA	-40°C ile 400°C arası	300°C için ± 1.5 C (°C sıcaklık değeri x 0.004)
Ortam Sıcaklığı	K Tipi Termokupl 2m	Tekon 20T2KCCEA	-40°C ile 400°C arası	300°C için ± 1.5 C (°C sıcaklık değeri x 0.004)
Sıcaklık	Sıcaklık Ölçüm Cihazı	Graphtec GL820 Midi Data Logger	-200°C ile +1370°C	Her +1°C için $\pm 0.05\%$
Akım Ölçer	Fluke Akım Ölçer	Fluke 87 True RMS Multimeter	+1000V ile -1000V +10A ile -10A	$\pm 1.00005V$ $\pm 2.002A$
Sağlanan Büyüklükler				
LEDler için Sabit Akım	LuxDrive BuckPuck Ayarlanabilir Maksimum 1000 mA LED Driver	LuxDrive 1000 mA BuckPuck 3023-D-E-1000P	200 mA - 900 mA	10%
LED Sürücü için Besleme Güç Kaynağı	GwINSTEK Güç Kaynağı	GwINSTEK SPS-606	0-60V	± 5 mV

Şekil 3.44.Deney düzeneğinde kullanılan cihazlar ve teknik özellikleri

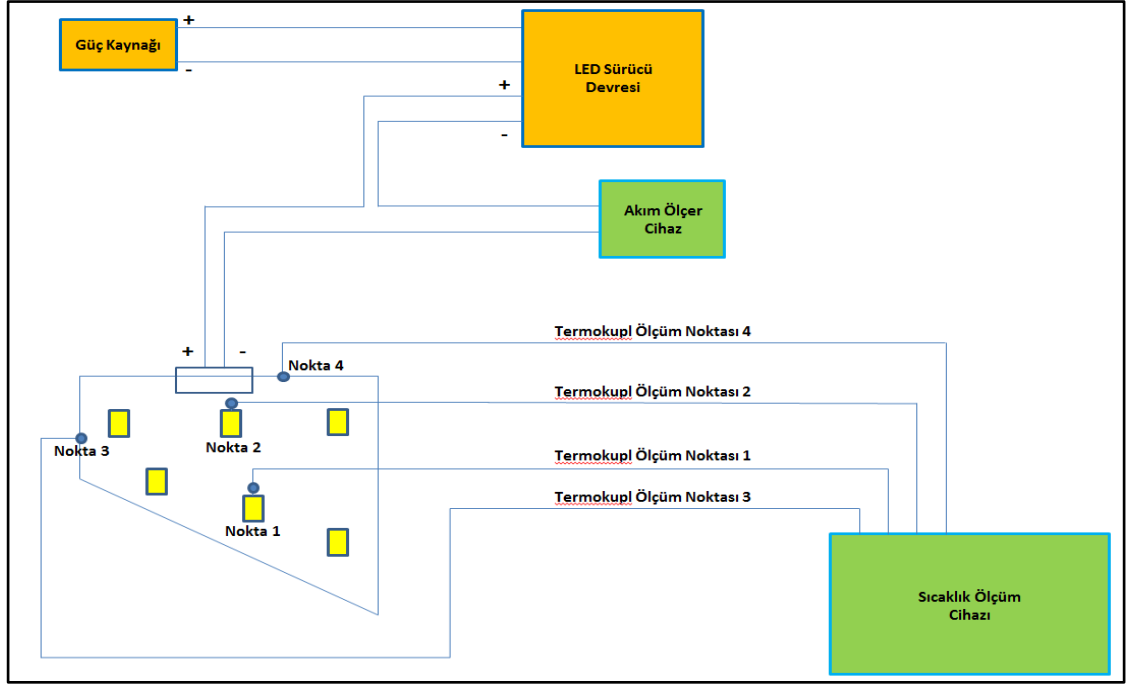
Kullanılan BUCKPUCK LED sürücüsünün akım hassasiyeti Şekil 3.44’ te görüldüğü gibi %10’dur. Bu değer hassasiyet açısından olumsuz bir durumdur. Kullanılan test düzeneğindeki LED sürücü bileşen sadece akımı sabitlemek için kullanılmış ve bu cihazdan çıkan akım miktarı her zaman Fluke akım ölçüm cihazıyla ölçülmüştür. Bu nedenle devreye uygulanan akımın hassasiyetini akımölçerlerin ölçüm hassasiyeti olarak değerlendirmek gerekmektedir. LED sürücünün kullanılmasının sebebi istenen akımı sağlamak değil sadece akımın sabit kalmasını sağlamaktır. İstenen akım değerinin sağlanıp sağlanmadığı akımölçerden okunan değere bakılarak belirlenmiştir.

5.2.5.1. Deney düzeneği ve Şeması

İncelenen DRL ünitesinin test sırasındaki pozisyonu ve üzerine yerleştirilen termokuplların konumları Şekil 3.45’ te gÖsterilmiştir. Şekil 3.46’ da ise deney düzeneğine ait Őema gÖrÖlmektedir.

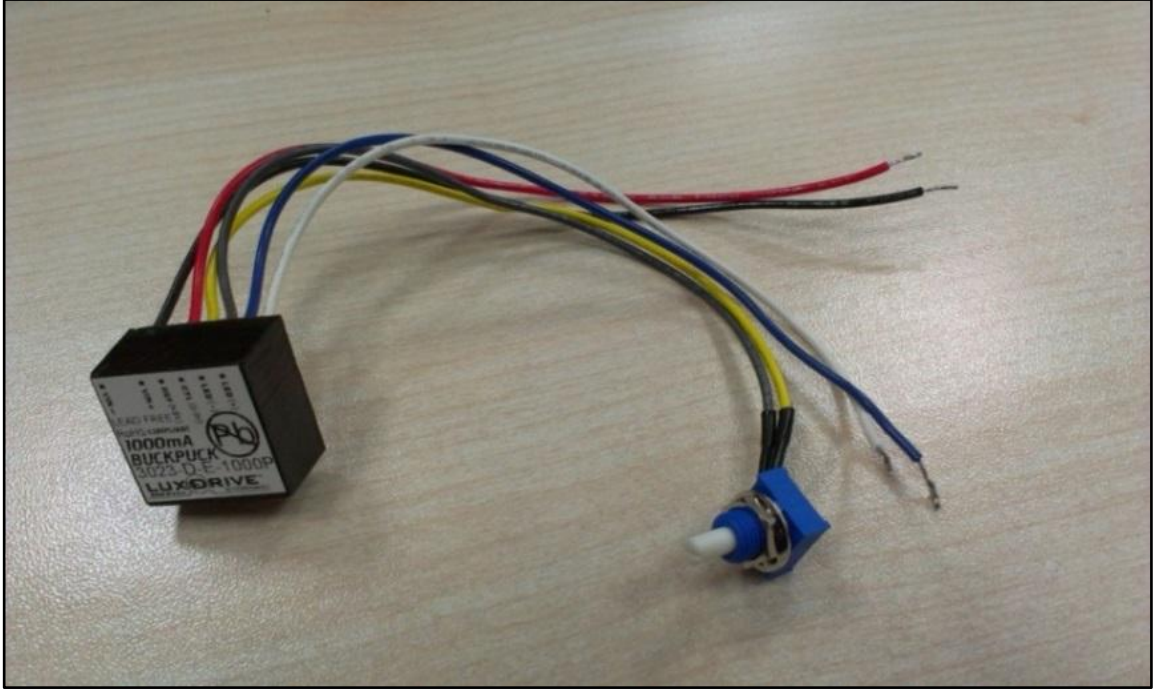


Şekil 3.45.Deney düzeneğinin gÖrÖnÖmü (MCPCB ve kanatçık üzerinde sıcaklık Ölçümü yapan termokupllar ve yapıŐtırıldıkları bölgeler gÖrÖlmektedir)



Şekil 3.46.Deney şemasının görünümü

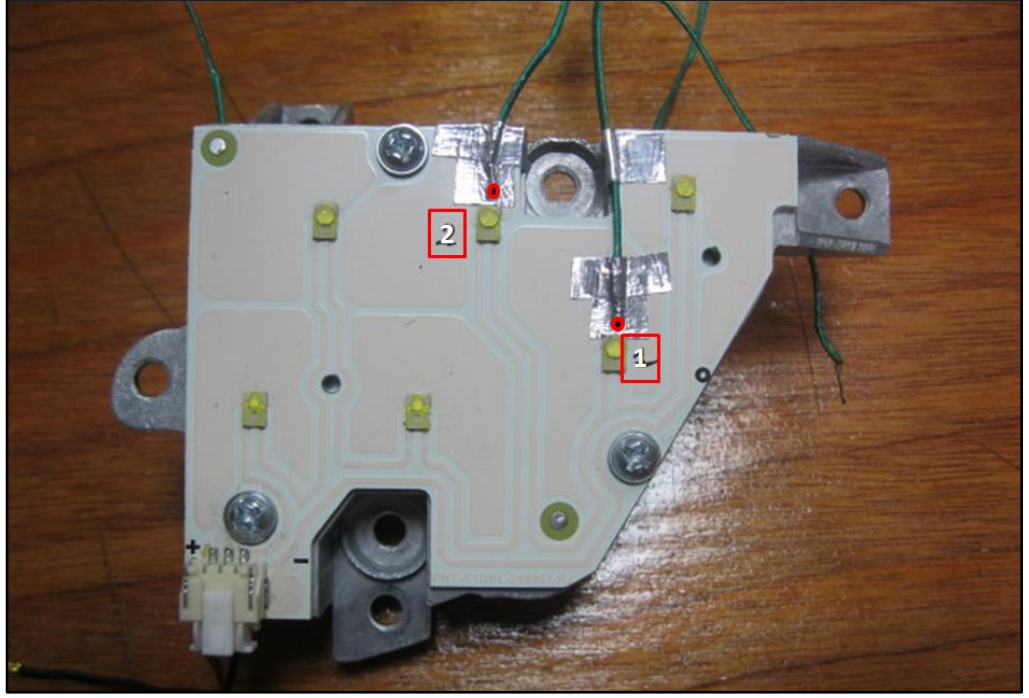
Görüldüğü gibi deney düzeneğinde kullanılan LED sürücüsü güç kaynağından aldığı besleme yardımıyla sabit akım sağlamaktadır. Sağlanan akım değeri, akımölçer cihaz ile sürekli olarak ölçülmekte ve sağlanan akım net olarak bilinmektedir. LED'lerin sabit akımla sürülmesi için Şekil 3.47' de gösterilen LED Driver kullanılmış ve 352 mA sabit akım ile LED'ler sürülmüş ve bu besleme koşuluyla sistemin rejime girmesi sağlanmış ve ölçüm sonuçları gözlemlenmiştir.



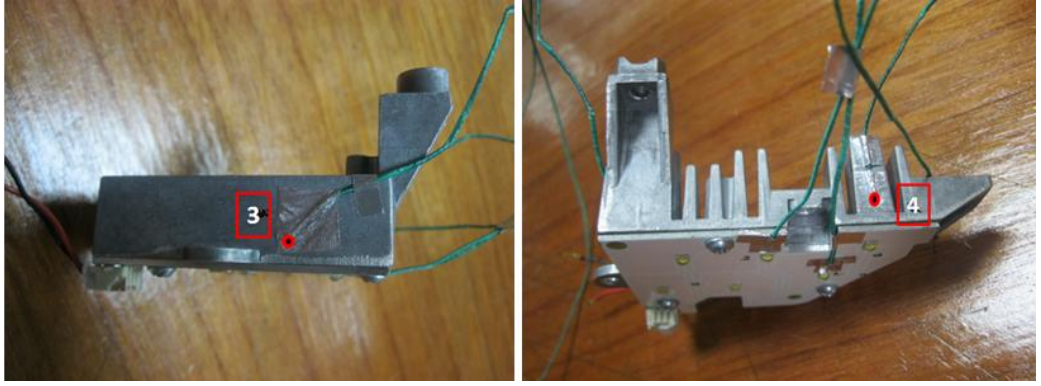
Şekil 3.47.LED'lere sabit akım sağlayabilmek için kullanılan BUCKPUCK LED sürücü cihazın görünümü

5.2.5.2. Sıcaklık ölçüm lokasyonları

Sabit akım ile beslenerek ısınması sağlanan DRL ünitesi üzerinde termokupllar yardımıyla sıcaklık ölçümü yapılmıştır.Şekil 3.48 ve Şekil 3.49'da MCPCB ve kanatçık üzerindeki sıcaklık ölçüm noktaları detaylı şekilde gösterilmiştir.



Şekil 3.48.MCPCB üzerinde sıcaklığı ölçülen noktaların görünümü



Şekil 3.49.Kanatçık üzerinde sıcaklığı ölçülen noktaların görünümü

Bu noktalar üzerinde ölçülen sıcaklık değerleri termal simülasyon sonucunda hesaplanan sıcaklık değerleriyle kıyaslanmıştır.

5.2.5.3. Test ve simülasyon sonuçlarının kıyaslanması

Çizelge3.4’ te, ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki hata oranları görülmektedir.

Çizelge3.4.Hesaplanan ve ölçülen sıcaklıklar arasındaki hata oranlarının görünümü

Kıyaslama Tablosu	Simülasyon Sonuçları (°C)	Test Sonuçları (°C)	Hata Oranı (%)
CH 1	48,7	47,8	1,883
CH 2	48,95	48	1,979
CH 3	47,58	45,2	5,265
CH 4	47,88	45,3	5,695

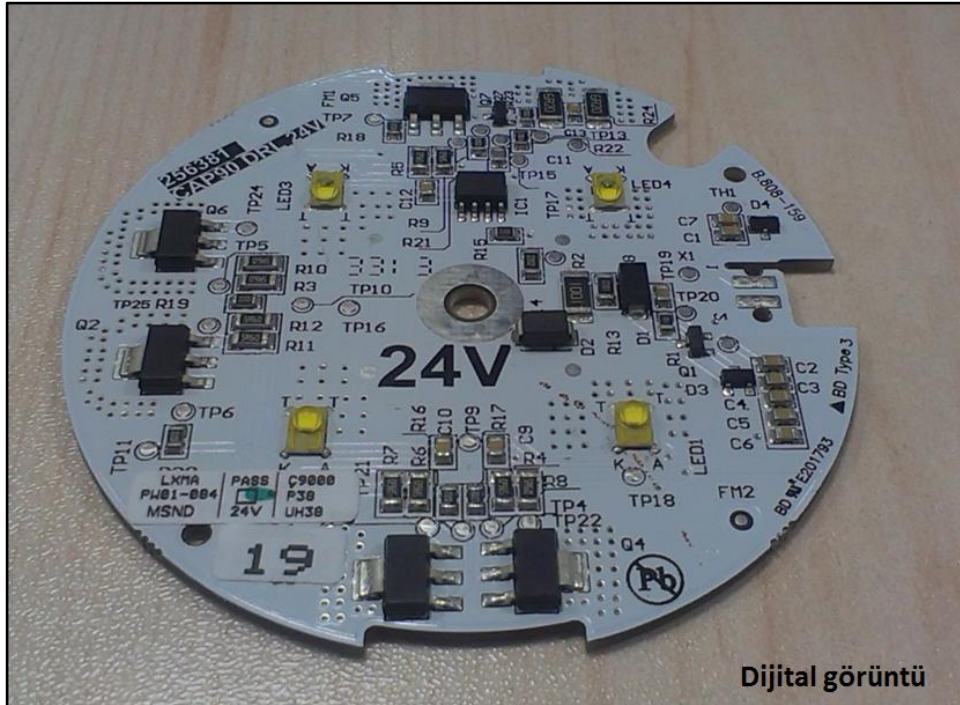
MCPCB üzerinde LED’lerin dip bölgelerinde ölçülen ve hesaplanan sıcaklık değerleri arasındaki hata oranı %2’yi geçmezken kanatçık üzerinde ölçülen ve hesaplanan sıcaklıklar arasındaki hata oranı maksimum %5,7 civarındadır.

5.3. Uygulama Örneği 2: DRL Ürün Termal Simülasyon Çalışması

Bu uygulama örneğinde ise bir FR4 PCB ve metal soğutucu gövdeden oluşan DRL ünitesinin termal davranışı incelenmiştir. Uygulama örneği 1 isimli çalışmada incelenen yapı bir farın DRL ünitesidir. Bu uygulama örneğinde incelenen yapı ise başlı başına bir DRL üründür ve bir farın içindeki ünite değildir. Ürünün içerisindeki FR4 PCB’de bulunan LED’ler dışındaki elektronik komponentler sabit akım sağlayıcı elemanlardır ve sağlanan belirli besleme voltajı aralıklarında ürünün kararlı şekilde çalışmasını temin ederler. Bu ürün 30°C, 50°C ve 80°C olmak üzere üç farklı ortam sıcaklığında test ve simülasyon çalışması bazında incelenmiştir. Bu uygulama örneğinde FLOEFD yazılımının LED modülü kullanılmamıştır. Farklı kabuller yardımıyla benzer bir simülasyon çalışması gerçekleştirilmiştir. Ürünün 12V ve 24V gerilim ile çalıştırılabilen iki farklı sürümü olması rağmen bu çalışmada 24V gerilim ile çalıştırılabilen sürümü incelenmiştir.

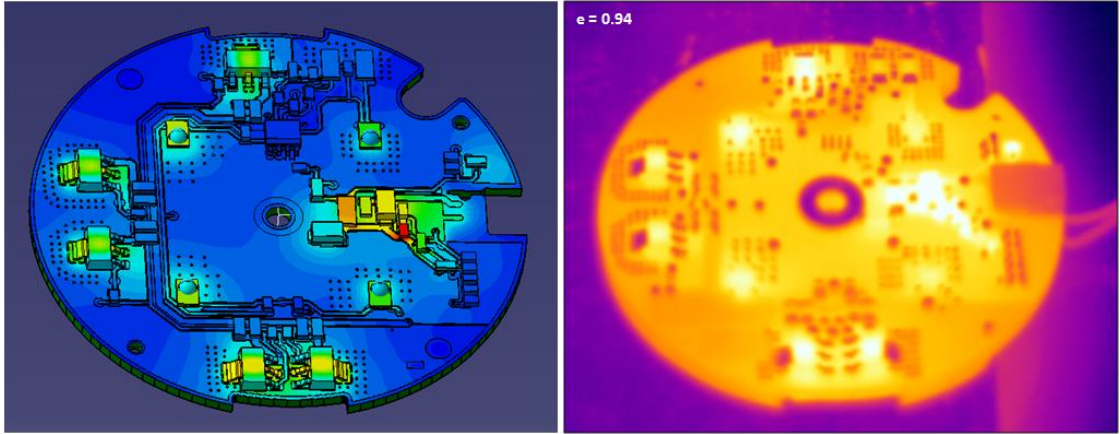
5.3.1. Termal kamera görüntüsü ve simülasyon sonuçlarının sıcaklık dağılımı olarak kıyaslanması

Bu çalışmada incelenen PCB üzerindeki sıcaklık dağılımı, yapılan çalışmanın güvenilirliğini kanıtlamak açısından çok önemlidir. Aksi takdirde, simülasyon ile hesaplanan ürün üzerindeki sıcaklık dağılımının ve test sonucunda tespit edilen sıcaklık dağılımının birbiriyle örtüşmediği bir durumda PCB ve diğer parçalar üzerindeki sıcaklıkları kıyaslamak yeterli bir kriter olmayacaktır. Sağlıklı bir inceleme ve araştırma yapılabilmesi için hem simülasyon ile sağlanan sanal sıcaklık dağılımı hem de test ile elde edilen gerçek sıcaklık dağılımı birbiriyle örtüşmelidir. Ayrıca bu çalışmanın ardından simülasyon ile hesaplanan ve test ile ölçülen sıcaklık değerleri birbiriyle kıyaslanmalı ve bu değerler arasındaki hata oranları hesaplanmalıdır. Bu koşullar sağlandığı takdirde söz konusu simülasyon araçları diğer ürünlerin geliştirilme safhalarında da güvenle kullanılabilir. Şekil 3.50’de 24V gerilim ile çalıştırılabilen bir DRL ürüne ait FR4 PCB görülmektedir.



Şekil 3.50. Ürüne ait PCB'nin dijital görüntüsü

Şekil 3.51’de solda bulunan resimde ise FloEFD yazılımında gerçekleştirilmiş termal simülasyon sonucunda ortaya çıkan sıcaklık dağılımı görülmektedir. Şekil 3.51’de sağda görülen resim ise aynı PCB’nin 24V sabit voltaj ile çalıştırılması durumunda üzerindeki sıcaklık dağılımının termal kamera ile kaydedilmiş görüntüsünü göstermektedir.

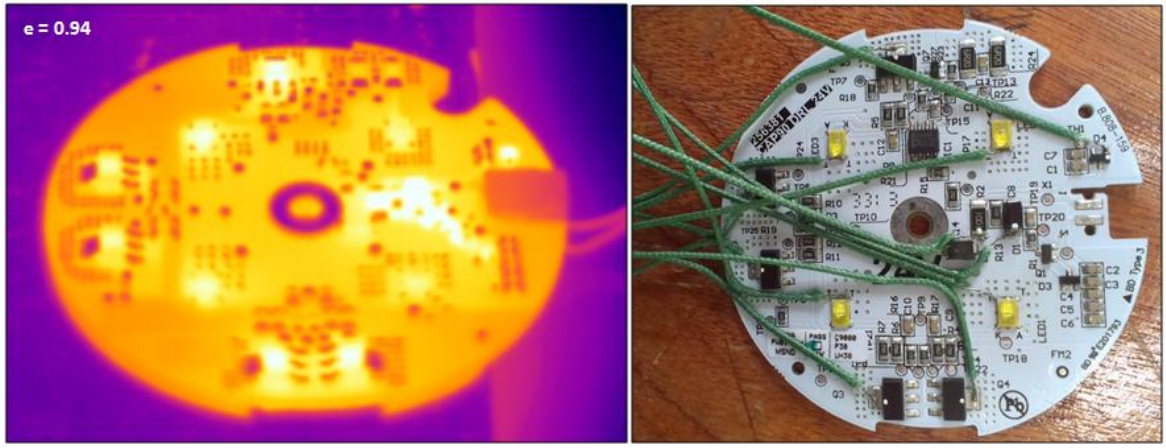


Şekil 3.51. Ürüne ait termal simülasyon (solda) ve termal kamera görünümü (sağda)

Söz konusu termal kameranın test sırasında doğru ölçüm yapabilmesi için termal kamera ölçüm emissivite katsayısı 0,94 olarak belirlenmiştir. Şekil 3.51’deki iki resim birbiriyle kıyaslandığında termal simülasyon ile elde edilen sıcaklık dağılımı ve termal kamera ile görüntülenen sıcaklık dağılımlarının birbiriyle çok uyumlu olduğu görülebilmektedir. Termal kamera görüntüsünde daha parlak sarı renkte olan bölgelerin sıcaklığı daha fazladır. Dijital görüntü, termal kamera görüntüsü ve termal simülasyon görüntülerinde tüm PCB konumları aynıdır ve bu yüzden kolayca benzerlikler kıyaslama yapılarak fark edilebilir. Termal kamera görüntüsündeki yüksek sıcaklığa sahip bölgelerin aynı şekilde simülasyon görüntüsünde de yüksek sıcaklığa sahip bölgeler olduğu görülmektedir. Böylece termal simülasyon ile hesaplanan sıcaklık dağılımının gerçeğe uygun olduğu söylenebilir.

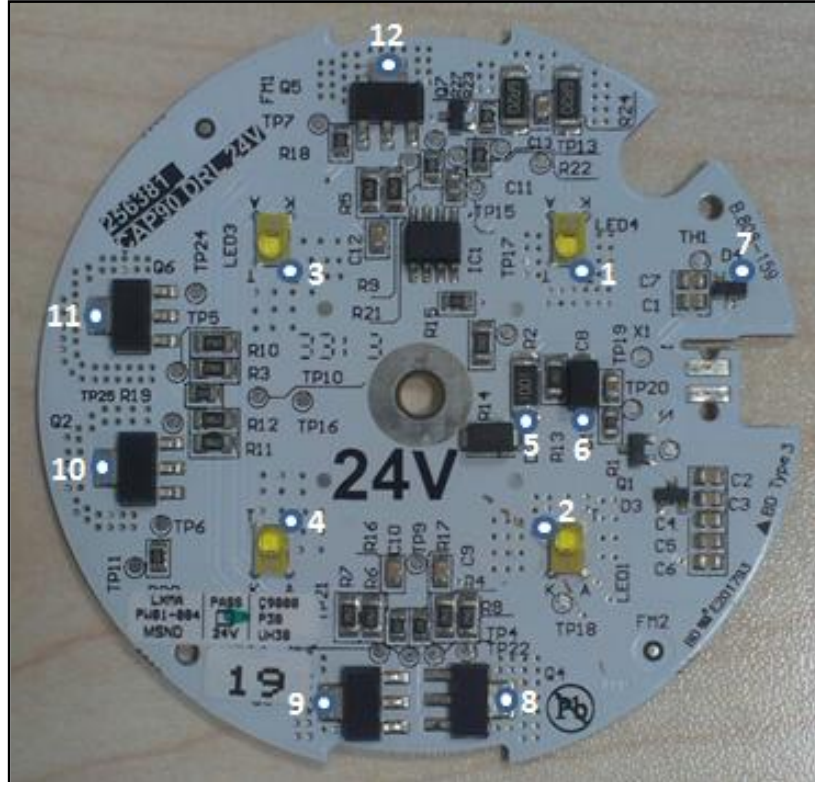
5.3.2. Ölçüm noktalarının termal kamera yoluyla tespit edilmesi ve termokupl konumları

Yapılan çalışma sırasında üretilmiş olan bir prototip PCB mevcut bulunduğundan dolayı termokupl ölçüm noktalarının termal kamera ile yapılan ölçüm sonrasında tespit edilmesine karar verilmiştir. Şekil 3.52 ve Şekil 3.53’ te testte kullanılan ölçüm prototipi PCB ve bu PCB üzerindeki ölçüm noktalarının konumları görülmektedir.



Şekil 3.52.DRLürüne ait PCB’nin termal kamera görüntüsü ve PCB üzerine yerleştirilmiş olan termokuplların görünümü

Şekil 3.52’de görüldüğü gibi termal kamera ölçüm görüntüsü yardımıyla PCB üzerinde maksimum sıcaklık oluşabilecek bölgeler simülasyon yapılmadan önce tespit edilmiş ve kritik sıcaklıkların oluşabileceği bölgelere termokupl takılmıştır. Termokuplların yerleştirildiği noktaların daha net anlaşılması için Şekil 3.53’ te termokupl yapıştırılan noktalar ve ölçüm numaraları PCB üzerinde açık şekilde gösterilmiştir. Görüldüğü gibi termal kamera görüntüsünde yüksek sıcaklığa sahip olduğu tespit edilen 12 noktaya termokupl yapıştırılmıştır ve aynı zamanda ortam sıcaklığı da ölçülmüştür. Termal simülasyon ve termal test sonucunda bulunan değerler kıyaslanarak yaklaşım oranları tespit edilmeye çalışılmıştır.

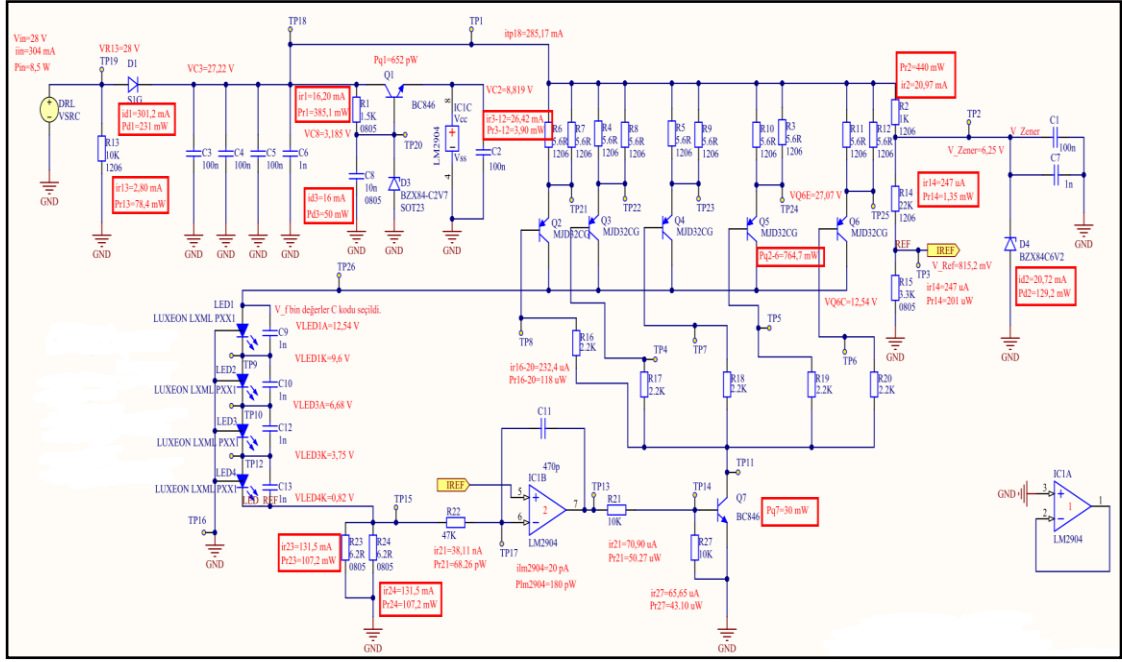


Şekil 3.53.DRL ürüne ait PCB üzerindeki termokupl ölçüm noktalarının ve ölçüm numaralarının gösterilmesi

Termal kamera görüntüsünde mor renkli bazı lokal soğuk bölgeler görülmektedir. Bu bölgeler metal yüzeyler olduğu için parlaktır ve düşük emissiviteye sahiptir. Bu nedenle sahip oldukları gerçek sıcaklık değerlerinden daha soğuk görülmektedir. Diğer tüm yüzeyler boya ile kaplı ve plastik yüzeyler olduklarından dolayı birbirine çok yakın emissivite değerlerine sahiptir (Yaklaşık 0,94). Resimdeki gerçek sıcaklık dağılımına sahip bölgeler parlak metal yüzeyleri dışındaki tüm bölgelerdir.

5.3.3. PCB komponentleri tarafından tüketilen elektriksel güç değerleri

PCB üzerindeki elektronik komponentler tarafından tüketilen elektriksel güç değerleri ALTIUM yazılımında hesaplanmış ve yapılan ölçümlerle bulunan güç değerlerinin uyumluluğu tespit edilmiştir. Şekil 3.54' te komponentler tarafından tüketilen elektriksel güç değerleri elektronik devre şeması üzerinde belirtilmiştir.



Şekil 3.54.DRL ürüne ait PCB'nin ALTIUM yazılımında tasarlanmış olan elektronik devre şeması ve güç değerlerinin görünümü

PCB üzerindeki elektronik komponentlerin ürettiği güç değerleri ve bu değerlerin simülasyonda kullanılması aşamasında bazı kabuller yapılmıştır. Bu kabuller aşağıda açıklanmıştır.

- Elektronik komponentler içerisinde $1mW$ 'ın altındaelektriksel güç tüketen komponentlere ait güç değerleri simülasyona dahil edilmemiş ve göz ardı edilmiştir
- $30^{\circ}C$, $50^{\circ}C$ ve $80^{\circ}C$ ortam sıcaklıkları için LED'ler haricindeki elektronik komponentler tarafından tüketilen elektriksel güç değerleri sabit kabul edilmiştir
- LED'ler tarafından tüketilen elektriksel güç değerleri sıcaklığa bağımlı olarak yapılan voltaj ve akım ölçümlerinden elde edilen hesaplamalara göre simülasyonlarda uygulanmıştır
- LED'ler için ışığa dönüşüm verimi her sıcaklıkta sabit kabul edilmiştir

5.3.4. LED'ler tarafından üretilen termal güç değerleri

Çizelge 3.5' te DRL ürün PCB'si üzerinde bulunan LED'lerden bir tanesinin değişken sıcaklık değerlerinde tükettiği akım ve voltaj değerleri ölçülerek listelenmiştir.

Çizelge3.5.PCB üzerindeki LED'lerin dip noktalarındaki sıcaklık değerlerine karşılık gelen voltaj, elektriksel güç ve ürettikleri termal güç miktarlarının gösterimi

LED Sıcaklığı (°C)	Dip Voltajı (V)	Akım (A)	Tüketilen Elektriksel Güç (W)	Üretilen Isıl Güç (W)	Kabul Edilen Işığa Dönüşüm Verimi (%)
30	3,005	0,264	0,793	0,5753	27,45
40	2,975	0,265	0,787	0,5709	27,45
50	2,946	0,265	0,782	0,5674	27,45
60	2,918	0,266	0,777	0,5634	27,45
70	2,893	0,267	0,772	0,5599	27,45
80	2,869	0,267	0,767	0,5566	27,45
90	2,843	0,269	0,764	0,5542	27,45
100	2,821	0,269	0,760	0,5513	27,45
110	2,799	0,270	0,756	0,5483	27,45
120	2,777	0,271	0,752	0,5453	27,45

Bu veriler 30°C, 50°C ve 80°C ortam sıcaklığında yapılan sıcaklık ölçüm testlerinden ayrıca yapılan bir test ile elde edilmiştir. Görüldüğü gibi LED dip noktasındaki sıcaklığın ve dolayısıyla LED çip sıcaklığının artışıyla LED üzerinden akan akım hemen hemen sabit kalırken (264 mA'den 271 mA'e yükseliyor), LED üzerinde oluşan voltaj değeri 90 °C sıcaklık artışıyla ilk durumdaki voltaja göre yaklaşık olarak %7,5 civarında düşüş göstermiştir. Bu sırada artan sıcaklık LED üzerinden akan akımın da yaklaşık olarak %2,6 civarında artmasına sebep olmuştur. Artan sıcaklığın akımı etkilemesi genelde istenmeyen bir durumdur ve elektronik devrenin stabilitesinin sıcaklık ile değişmesi nedeniyle ortaya çıkan bir olgudur. Bölüm5.3.3.2'de Philips Luxeon RebelDS58 beyaz ışık veren LED'in 350 mA akım koşulunda (Reference Junction Temperature: 80°C) yaklaşık olarak %27,45 ışık verimine sahip olduğu gösterilmişti. Bu çalışmada ise aynı şekilde 260 mA ve 275 mA arasındaki akım değerlerinde de bu LED'in 350 mA akım değerindeki aynı ışık verimi ile çalıştığı kabul

edilmiştir. Ayrıca devre üzerindeki dört LED birbirine seri olarak bağlı olduğu için tüm LED'ler üzerinden akan akım değeri aynıdır ve bu nedenle tükettikleri güç değerleri de birbirlerine çok yakındır. Güç değerlerindeki farkın oluşmasına sebep LED çiplerinde oluşan sıcaklık farkıdır ve yapılan testlerde LED'lerin birbirleri arasındaki sıcaklık farkının maksimum 6°C civarında olduğu görülmüştür ve bu sıcaklık farkının oluşturacağı güç tüketim farkı ihmal edilebilir düzeydedir. Bu nedenle simülasyonlarda tüm LED'lere uygulanan termal güç değerleri birbiriyle aynı kabul edilmiş ve Çizelge 3.5 ve Çizelge 3.6' daki hesaplanmış güç değerleri uygulanmıştır. Örneğin 80°C ortam sıcaklığında yapılan testte LED'lerin dip bölgelerinde ölçülen sıcaklıkların ortalaması Çizelge 3.7' de görüldüğü gibi 109,7°C olarak tespit edilmiştir. Ardından Çizelge 3.6' da bu değere en yakın değer olan 110°C LED dip sıcaklığındaki termal güç değeri LED'lere uygulanmıştır. Bu şekilde LED'lerin termal güç değerleri en hassas şekilde simülasyona girdi olarak tanımlanmaya çalışılmıştır.

Çizelge 3.6. PCB üzerindeki LED'lerin dip noktalarında ölçülen sıcaklık değerlerine karşılık gelen voltaj, elektriksel güç ve ürettikleri termal güç miktarları çizelgesi

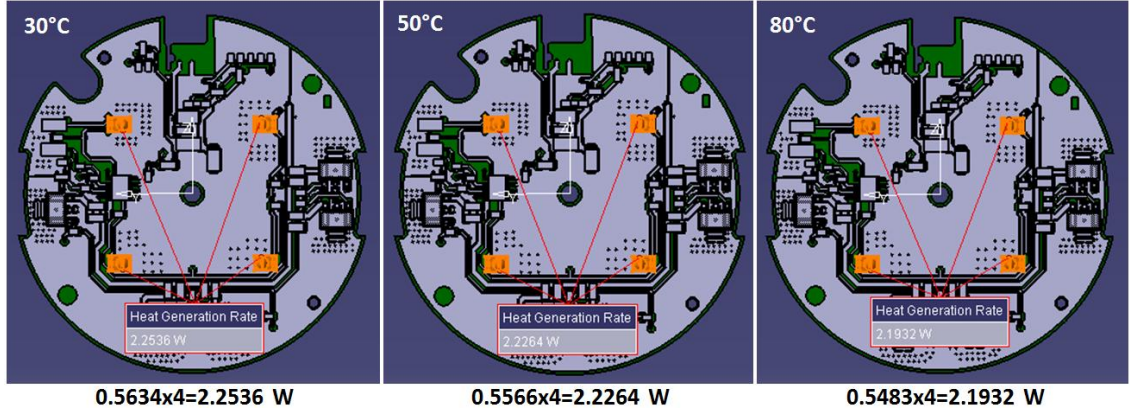
LED Dip Sıcaklığı (°C)	LED Voltajı (V)	Akım (A)	Tüketilen Elektriksel Güç (W)	Üretilen Isıl Güç (W)	Kabul Edilen Işığa Dönüşüm Verimi (%)
30	3,005	0,264	0,793	0,5753	27,45
40	2,975	0,265	0,787	0,5709	27,45
50	2,946	0,265	0,782	0,5674	27,45
60	2,918	0,266	0,777	0,5634	27,45
70	2,893	0,267	0,772	0,5599	27,45
80	2,869	0,267	0,767	0,5566	27,45
90	2,843	0,269	0,764	0,5542	27,45
100	2,821	0,269	0,760	0,5513	27,45
110	2,799	0,270	0,756	0,5483	27,45
120	2,777	0,271	0,752	0,5453	27,45

Çizelge 3.7’ de görüldüğü gibi 30°C, 50°C ve 80°C ortam sıcaklığında yapılan sıcaklık ölçüm testlerinde LED’lerin dip noktalarındaki sıcaklık değerleri ölçülmüş ve ortalama değerleri her bir test için ayrıca bulunmuştur. Simülasyona girilmesi gereken LED termalgüçleri önceden yapılan testler ile bu şekilde önceden tespit edilmiş ve simülasyona daha hassas girdi bilgileri sağlanmıştır.

Çizelge3.7.30°C, 50°C ve 80°C ortam sıcaklıklarında yapılan testler sonucunda ürün içerisindeki LED dip noktalarında ölçülen sıcaklıklar

30°C Ortam sıcaklığında ölçülen LED dip noktası sıcaklıkları				50°C Ortam sıcaklığında ölçülen LED dip noktası sıcaklıkları				80°C Ortam sıcaklığında ölçülen LED dip noktası sıcaklıkları			
CH1	CH2	CH3	CH4	CH1	CH2	CH3	CH4	CH1	CH2	CH3	CH4
58	60,4	64,1	63,1	77,7	80,3	84	83,1	106,2	108,8	112,4	111,4
Ortalama LED dip sıcaklığı (°C)			61,4	Ortalama LED dip sıcaklığı (°C)			81,275	Ortalama LED dip sıcaklığı (°C)			109,7

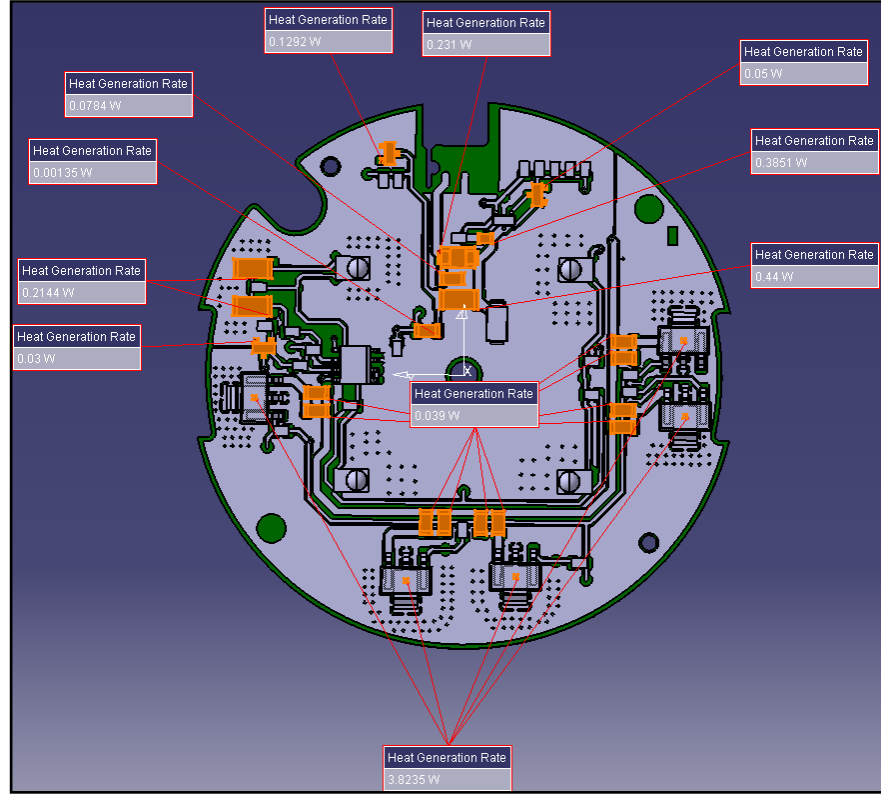
30°C, 50°C ve 80°C ortam sıcaklığında yapılan sıcaklık ölçümlerinde tespit edilen LED dip noktası sıcaklıklarının ortalama değerlerine göre Çizelge 3.6’ dan seçilen termal güç değerleri PCB üzerindeki dört LED için tanımlanmış ve Şekil 3.55’ te gösterilmiştir.



Şekil 3.55.PCB üzerindeki LED'ler ve ürettikleri yaklaşık termal güç miktarlarının farklı ortam sıcaklığı durumlarına göre gösterilmesi

5.3.5. PCB komponentleri tarafından tüketilen elektriksel güç ve üretilen termal güç değerleri

Bu çalışmada LED'ler dışındaki tüm PCB komponentlerinin tükettikleri tüm elektriksel gücün ısıya dönüştüğü kabul edilmiştir. Bu nedenle herhangi bir verim hesabı yapılmamış ve ALTIUM yazılımında hesaplanarak belirlenen tüketim elektriksel güç değerleri simülasyonda termal güç değerleri olarak uygulanmıştır. Burada kullanılan transistörler haricindeki tüm elektronik komponentler yüksek termal iletkenliğe sahip malzeme modeli ile temsil edilmiştir. Şekil 3.56' da görüldüğü gibi bu komponentlerin boyutları oldukça küçüktür ve birçoğunda ihmal edilemeyecek boyutlarda termal güç üretimi mevcuttur.



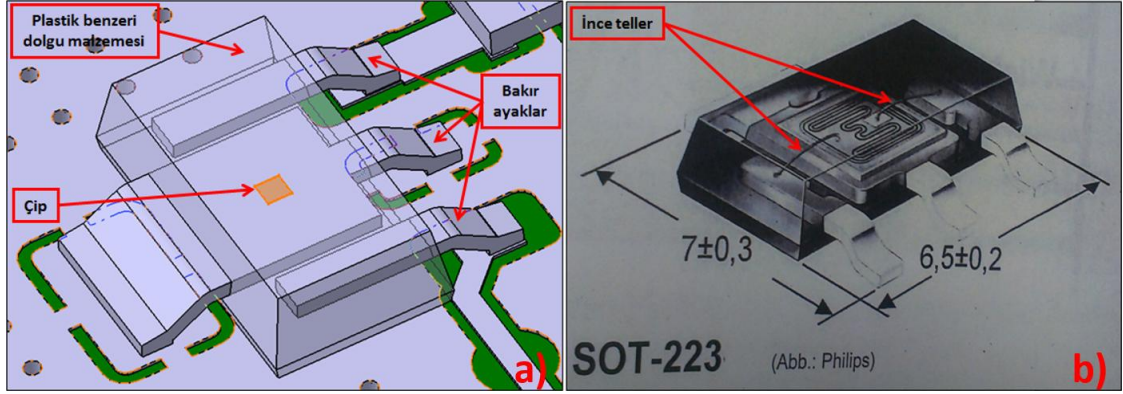
Şekil 3.56.PCB üzerindeki komponentler ve ürettikleri termal güç miktarları

Boyutlarının küçük olması ve termal güç üretmeleri nedeniyle bu komponentlerin üzerindeki sıcaklık dağılımları neredeyse izotermal davranışlıdır. Aynı durum tam olarak ısı üretmeyen komponentler için söylenemese de bu kabulün oluşturacağı hataların kabul edilebilir olduğu düşünülmüştür. Ayrıca küçük boyutlu komponentlerin iç detaylarının da hesaba katılması harcanacak süre açısından bakıldığında elde edilecek fayda ile kıyaslanırsa çok uygun olmayacaktır. Bu çalışmada sadece transistörler iç detayları ile ayrıca modellenerek simülasyonlara dahil edilmiştir. Transistörler ile ilgili detaylı açıklama Bölüm 5.4.6'da bulunmaktadır. Ayrıca LED'ler de elektronik komponentler gibi modellenmiş ve yüksek termal iletkenliğe sahip malzeme modeli ile karakterize edilmiştir. LED'lerin iç detayları hesaba katılmamıştır. LED'lerin de ürettikleri ısı enerjisinin, küçük boyutları nedeniyle LED'ler üzerinde oluşacak sıcaklık dağılımının hemen hemen izotermal olmasına sebep olacağı ve bu nedenle bu şekilde bir kabul ile gerçeğe gayet yakın sonuçlar alınabileceği düşünülmüştür. Ayrıca Bölüm 5.3'te incelenmiş olan bir DRL ürüne ait PCB ve kanatçık bileşenlerinin termal

simülasyon çalışmaları sırasında FloEFD LED modülü kullanılmış olmasına rağmen Bölüm 5.4'te incelenecek olan bütün haldeki DRL ürünün termal simülasyon çalışmaları sırasında FloEFD LED modülü kullanılmamıştır.

5.3.6. Transistör modellemesi

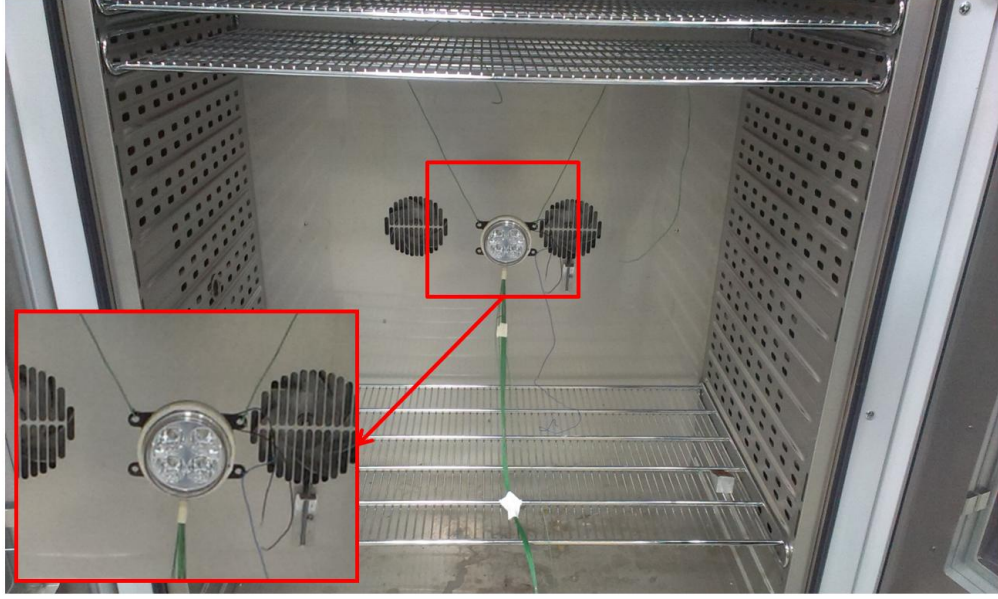
Şekil 3.56' da görüldüğü gibi, elektronik devre üzerindeki diğer komponentlere oranla transistörler daha büyük boyutlara sahiptir ve metal-plastik-yarı iletken gibi bir malzeme bileşiminden oluşmaktadır. Bu nedenle transistör üzerindeki sıcaklık değişimleri diğer komponentlere oranla daha yüksek olabilmektedir. Kullanılan transistör tipi SOT-223'tür. Bu transistör Şekil 3.57' desol tarafta (a)görüldüğü gibi üç bakır ayak, transistör çipi ve bu parçaları sarıp paket haline getiren plastik benzeri bir dolgu malzemesinden oluşmaktadır. Orta bakır ayak üzerine yerleştirilmiş olan çipin ürettiği ısı enerjisi çoğunlukla bu ayak yardımıyla PCB üzerindeki bakır tabakaya iletilmektedir. Şekil 3.57' de sağda (b) görüldüğü gibi çipin diğer ayaklarla elektriksel temasını sağlayan ince teller simülasyon modeline dahil edilmemiş ve ihmal edilmiştir. Dolgu malzemesi olarak ABS plastik malzeme özellikleri, metal ayaklar için bakır malzeme özellikleri tanımlanmıştır. Çip ise küçük boyutu ve ısı üretiyor olması nedeniyle yüksek termal iletkenliğe sahip bir malzeme modeliyle simülasyona dahil edilmiştir. Bu şekilde transistörler üzerinde oluşan sıcaklık değişimleri gerçeğe uygun olarak simüle edilmeye çalışılmıştır.



Şekil 3.57. Simülasyon çalışmasında kullanılan transistörün yapısı a) CATIA yazılımında oluşturulmuş olan ve simülasyon çalışmasında kullanılan 3D transistör modelinin görünümü b) Gerçek bir SOT-223 standart transistörün iç yapısının görünümü ve boyutları (Adams ve Schmidt (2012))

5.3.7. Ölçüm koşullarının tanımlanması

Şekil 3.58 ve Şekil 3.59’da görüldüğü gibi DRL ürün fırının ortasındaki kablolar yardımıyla asılı tutulmaktadır. İçerisindeki PCB üzerinde bulunan termokupllar ise alt kısmından açılan ufak bir delikten dışarı çıkarılmış ve GRAPHTEC sıcaklık ölçüm cihazına bağlanmıştır. Fırın içerisinde 30°C, 50°C ve 80°C olmak üzere üç defa sabit ortam sıcaklığı koşulu oluşturulmuş ve bu sıcaklıklarda ürün 28V besleme gerilimi ile sürekli olarak çalıştırılmak suretiyle üç kez test edilmiştir ve bu sırada termokupllar tarafından ölçülen sıcaklıklar kaydedilmiştir. Her bir test iki saat süreyle gerçekleştirilmiştir ve bu sırada ölçülen tüm sıcaklık değerleri stabil konuma ulaşmıştır. Bu şekilde her üç test için sıcaklık değerleri açısından rejim halinin oluştuğu teyit edilmiştir.



Şekil 3.58.DRL ürünün fırın içine yerleştirilmiş konumdaki görünümü



Şekil 3.59.DRL ürünün test edildiği sabit sıcaklık ortam sınır koşulunu sağlayan fırın(solda) ve test düzeneğinin görünümü (sağda)

Sıcaklık ölçüm cihazı tarafından ölçülerek kaydedilen sıcaklıklar daha sonra cihazdan excel dosyaları olarak alınmış ve simülasyon sonucunda bulunan sıcaklıklar ile birebir

kıyaslanmıştır. Sonraki sayfalarda bu kıyaslamalar sonucunda bulunan ölçüm ve simülasyon sapma değerleri belirtilecektir.

5.3.8. Simülasyonda yapılan kabuller ve ihmaller

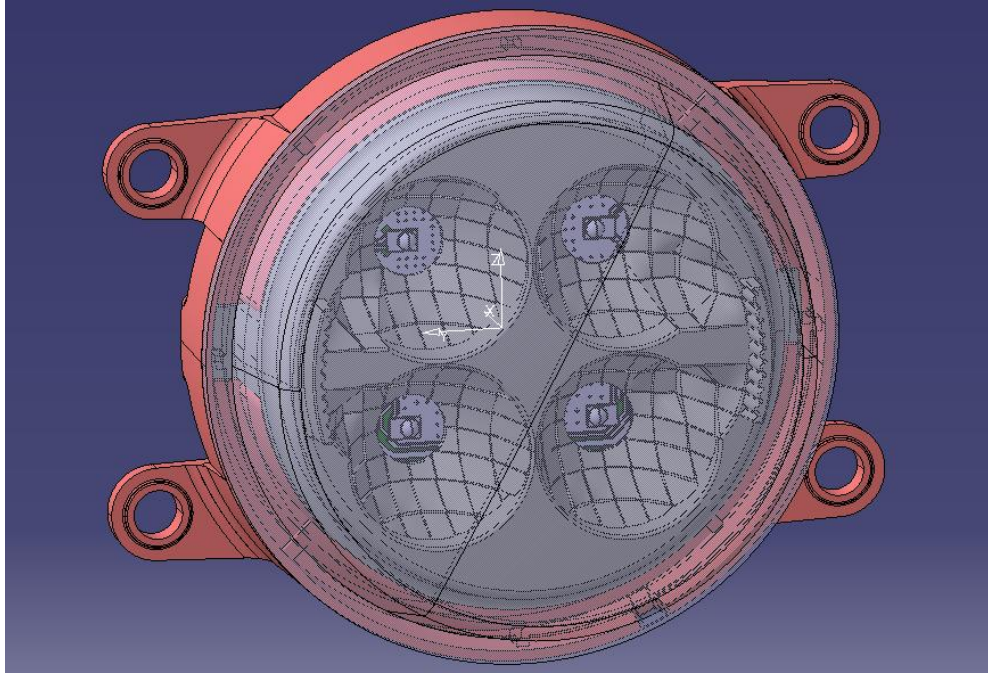
Bu bölümde incelenecek olan DRL ürüne ait termal simülasyon çalışmalarında yapılmış kabuller ve ihmaller şunlardır:

- PCB üzerindeki transistörler haricindeki tüm komponentler iç detaylardan yoksun (bulk) yapılar olarak modellenmiş ve bu şekilde simüle edilmiştir. İç detayları hesaba katılmadan (bulk yapı) modellenen komponentler çok yüksek termal iletkenliğe sahip malzeme özelliği ile simüle edilmiştir.
- Transistörler iç detayları içerecek şekilde modellenmiş ve simüle edilmiştir
- FR4 plakanın her iki tarafında bulunan bakır tabaka kalınlığı 70 mikrondur
- FR4 plaka içerisinden geçerek bakır katmanları arasındaki elektriksel ve termal iletimi sağlayan termal viaların delikler içindeki kalınlığı 20 mikrondur. (Bu detaylar ileride açıklanacaktır)
- LED'ler, transistörler ve tüm komponentlerin bakır plakaya montajı sırasında kullanılan lehim malzemesi modelleme ve simülasyonda ihmal edilmiştir
- FR4 plakanın kalınlığı 1,5 mm' dir
- LED'lerin elektriksel enerjiden ışığa dönüşüm verimliliği %27,45 kabul edilmiştir
- LED'lerden çıkan radyasyonun transparan lens içinden geçerken soğurulması nedeniyle oluşacak olan ısı enerjisi ve bu nedenle lens üzerinde oluşan sıcaklık hesaplaması etkisinin sınırlı olacağı düşüncesiyle ihmal edilmiştir
- Simülasyonda kullanılan yüzey emissivite değeri tüm yüzeyler için 0,85 olarak tanımlanmıştır

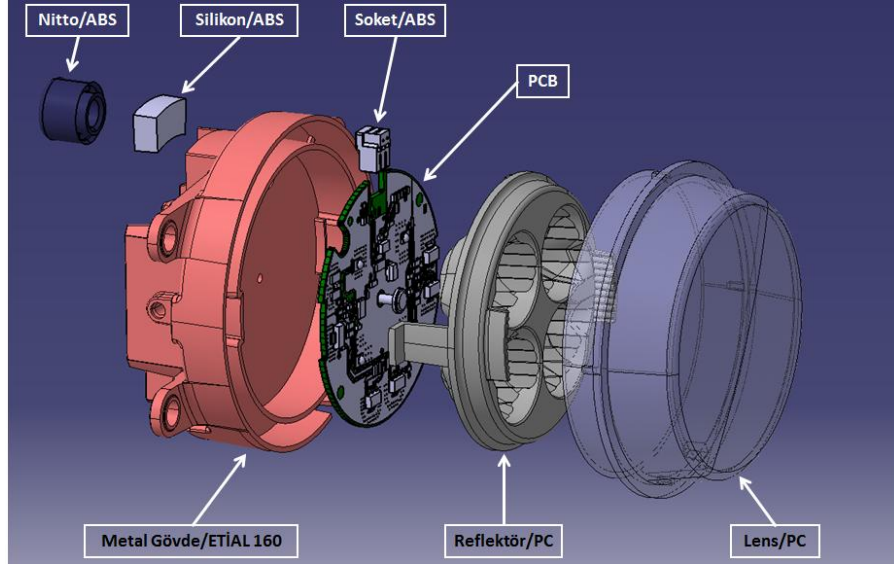
- Reflektör parçası son haliyle alüminyum ile kaplı olarak üretilecektir ama simülasyonda PCB üzerinde hesaplanan sıcaklıklara etkisinin ihmal edilebilecek boyutlarda olacağı düşünülmüş ve yüzeylerine alüminyum kaplama özelliği verilmemiştir
- Son ürün halinde PCB ile metal gövde arasında yalıtkan termal bant kullanılacak olmasına rağmen bu test ve simülasyon çalışmalarında termal bant çalışmaya dahil edilmemiştir.

5.3.9. DRL ürünün tanıtılması

DRL ürüne ait dış detaylar ve patlatılmış görünüm Şekil 3.60 ve Şekil 3.61'de yer almaktadır. Ürün içindeki FR4 PCB'nin metal gövdeye temas ettiği Şekil 3.61'deki patlatılmış resimde görülebilmektedir. Bu sayede PCB'nin diğer tarafındaki komponentler tarafından üretilen ısının metal gövdeye verilmesi ve sistemden atılması sağlanmıştır.



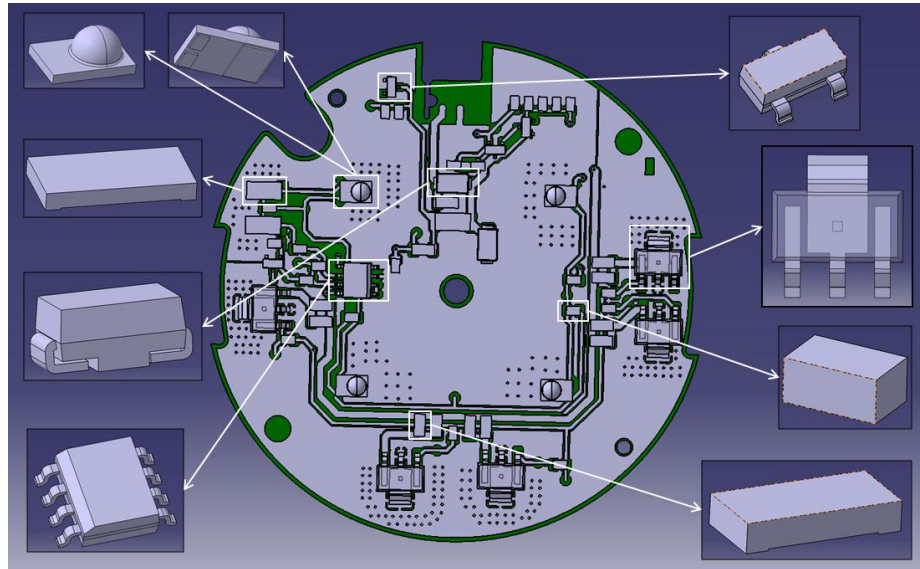
Şekil 3.60. DRL ürünün önden görünüşü



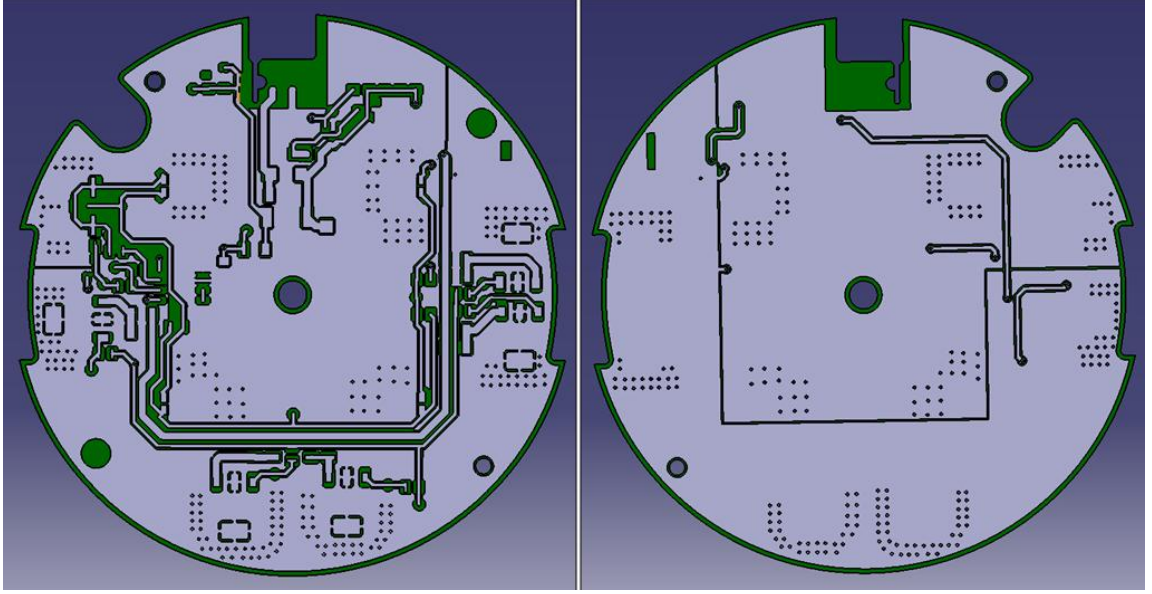
Şekil 3.61.DRL ürünün patlatılmış görüntüsü

5.3.10. DRLPCB'si ve komponentler

PCB zerindeki elektronik komponentler Şekil 3.62' deye PCB' nin n ve arka taraflarında bulunan bakır tabakalar ise Şekil 3.63' tedetaylı şekilde görülmektedir.



Şekil 3.62.PCB zerindeki komponentlerin grnm



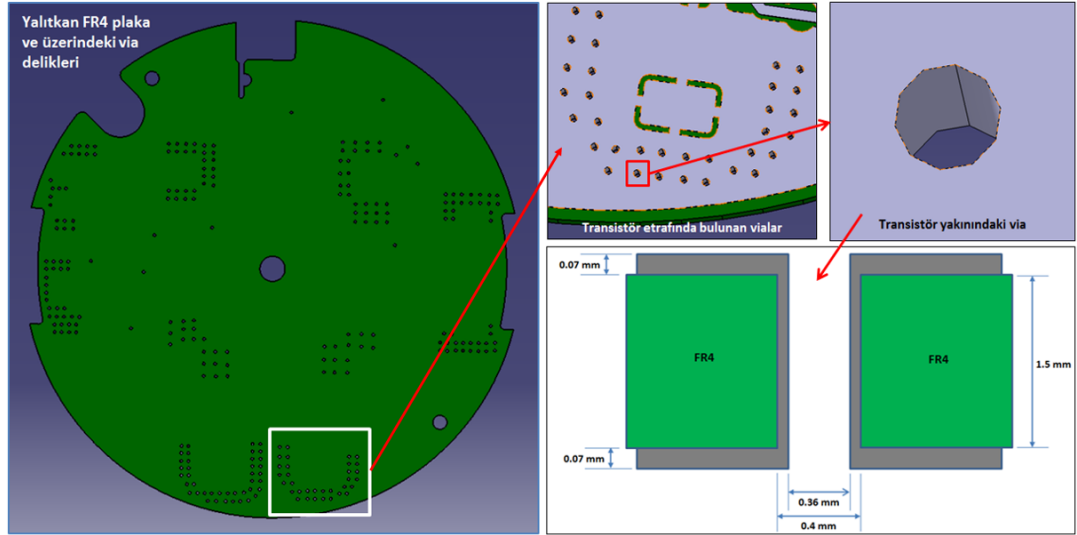
Şekil 3.63.PCB üzerindeki bakır plakaların görünümü. Ön yüz bakır plakası (solda) ve arka yüz bakır plakası (sağda)

PCB üzerindeki elektronik komponentler Şekil 3.62’ de görüldüğü gibi Şekil 3.63’ te solda görülen bakır tabaka üzerine yerleştirilmiştir. LED’ler ile elektronik komponentlerden yayılan ısı enerjisi ilk olarak Şekil 3.63’ te solda görülen bakır tabaka tarafından PCB’ye aktarılmaktadır. Şekil 3.63’ te sağda görülen bakır tabakası ise doğrudan metal gövdeye temas etmekte, LED ve elektronik komponentlerden yayılan ısı enerjisinin metal gövdeye iletilmesini sağlamaktadır.

5.3.11. PCB üzerindeki bakır tabaka kalınlıkları ve vialar

Şekil 3.64’ te bir PCB üzerindeki via, bakır tabaka ve FR4 tabaka kalınlıklarının ölçüsü gösterilmiştir. Görüldüğü gibi alt ve üst bakır tabaka kalınlıkları 70 mikron iken via iç kısmındaki bakır tabaka kalınlığı 20 mikron dur. FR4 plakanın kalınlığı ise 1,5 mm’dir. PCB üzerindeki tüm vialar aynı ölçülere sahip kabul edilmiştir. Viaların iç kısmındaki bakır tabaka kalınlığı, alt ve üst bakır tabaka kalınlıkları, kaplama operasyonu ile elde edilen yaklaşık değerler olduğu için üretim koşullarında tam olarak bu ölçülerin

sağlanması mümkün değildir. Bu çalışmada standart olarak bunun sağlandığı kabul edilmiştir. Şekil 3.64’ te solda FR4 plaka üzerindeki via konumları görülmektedir.



Şekil 3.64. FR4 PCB üzerindeki via deliklerinin görünümü

Şekil 3.64’ te sağda gösterilen PCB, orta kısmı oluşturan yalıtkan FR4 malzeme, her iki taraftaki bakır plakalar ve viayı oluşturan delik içindeki bakır tabakalardan oluşmaktadır. FR4 malzemenin iki tarafındaki bakır plakaların haberleşmesi vialar aracılığıyla sağlanmaktadır. Via delikleri öncelikle FR4 üzerinde açılır ve sonrasında bakır ile kaplanır ve böylece üst ve alt bakır tabakaların elektriksel olarak birbiriyle haberleşmesi sağlanır. PCB’lerde kullanılan vialar elektrik iletmelerinin yanı sıra kendilerini oluşturan bakır kaplama nedeniyle aynı zamanda iyi şekilde ısı enerjisini de iletirler. Termal iletim açısından bakıldığında, viaların sayısı, çapı ve iç kısmında bulunan bakır kaplama kalınlığı gibi parametreler çok önemlidir ve üst ve alt bakır plakalar arasındaki ısı enerjisi transferini önemli ölçüde etkilerler. Bu bölümde incelenen DRL üründe kullanılan viaların amacı, üst bakır plaka üzerinde bulunan komponentlerin ürettiği ısının alt bakır plakaya ve buradan temas yoluyla metal gövdeye iletilmesini sağlamaktır. Bu şekilde komponentler üzerinde üretilen ısının metal gövde üzerindeki kanatçıklar yoluyla verimli şekilde ortamdaki akışkan olan havaya transfer edilmesi ve komponentlerin soğutulması amaçlanmıştır.

5.3.12. Ürünü oluşturan alt parçalar ve malzeme özellikleri

Çizelge 3.8’ de söz konusu DRL ürünün alt parçaları listelenmiştir.

Çizelge 3.8.DRL üründe kullanılan alt parçalar ve malzemeler listesi

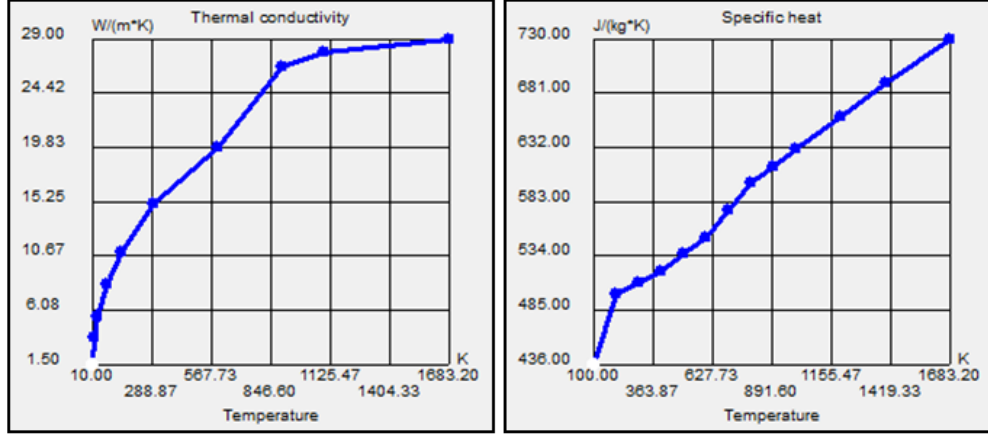
Ürünü Oluşturan Alt Parçalar	Kullanılan Malzeme
Nitto	ABS
Silikon	ABS
Soket	ABS
Metal gövde	Etial 160
Reflektör	PC
PCB kaplama	Bakır
PCB komponentleri (Transistörler haricindeki parçalar)	Yüksek ısı iletkenliğe sahip malzeme
PCB yapısındaki yalıtkan malzeme	FR4
Lens	PC
PCB’yi konumlayan Cıvata	Stainless Steel 321

Çizelge 3.9’da ise malzemelere gelen ısı iletim katsayısı ve özgül ısı değerleri listelenmiştir.

Çizelge 3.9.DRL üründe kullanılan alt parça malzemelerinin ısı iletim katsayısı ve özgül ısı değerleri listesi

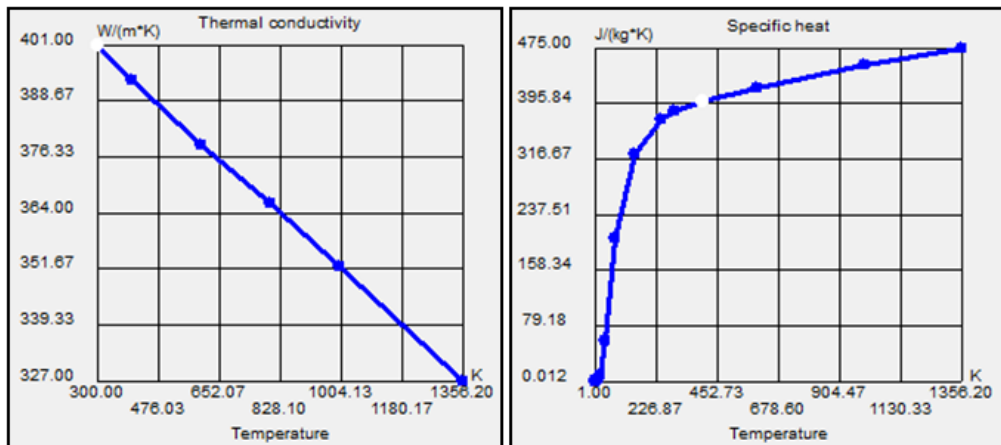
Kullanılan Malzemeler	Isı İletim Katsayısı (W/mK)	Özgül Isı (J/KgK)
ABS Plastik	0,18	2000
PC Plastik	0,2	1200
ETİAL 160 Alüminyum	96,14	950
Stainless Steel 321	17-18	500-550
FR4	0,5	1000
Bakır	390-400	350-400
Yüksek İletkenliğe Sahip Malzeme	2000	1000

Şekil 3.65’ te PCB’yi metal gövdeye konumlayan civatanın malzemesi olan Stainless Steel 321 malzemesinin sahip olduğu termofiziksel özelliklerin sıcaklığa bağlı değişimi grafikler halinde gösterilmiştir.



Şekil 3.65. Stainless Steel 321 malzemeye ait sıcaklığa bağlı termofiziksel bilgilerin görünümü (Isı iletim katsayısı ve özgül ısı)

Şekil 3.66’ da PCB üzerinde bulunan bakır malzemesinin sahip olduğu termofiziksel özelliklerin sıcaklığa bağlı değişimi grafikler halinde gösterilmiştir.



Şekil 3.66. Bakır malzemeye ait sıcaklığa bağlı termofiziksel bilgilerin görünümü (Isı iletim katsayısı ve özgül ısı)

Çizelge 3.9’ da sağdaki bakır ve paslanmaz çelik malzemeler için ısı iletim katsayısı ve özgül ısı değerleri net değerler yerine bazı değer aralıklarıyla belirtilmiştir. Şekil 3.65 ve Şekil 3.66’ da görülebildiği gibi bu malzemelere ait termal özellikler sıcaklığa bağımlı olarak tanımlanmış ve simülasyonda bu şekilde kullanılmıştır.

5.3.13. Test ve simülasyon sonuçlarının kıyaslanması

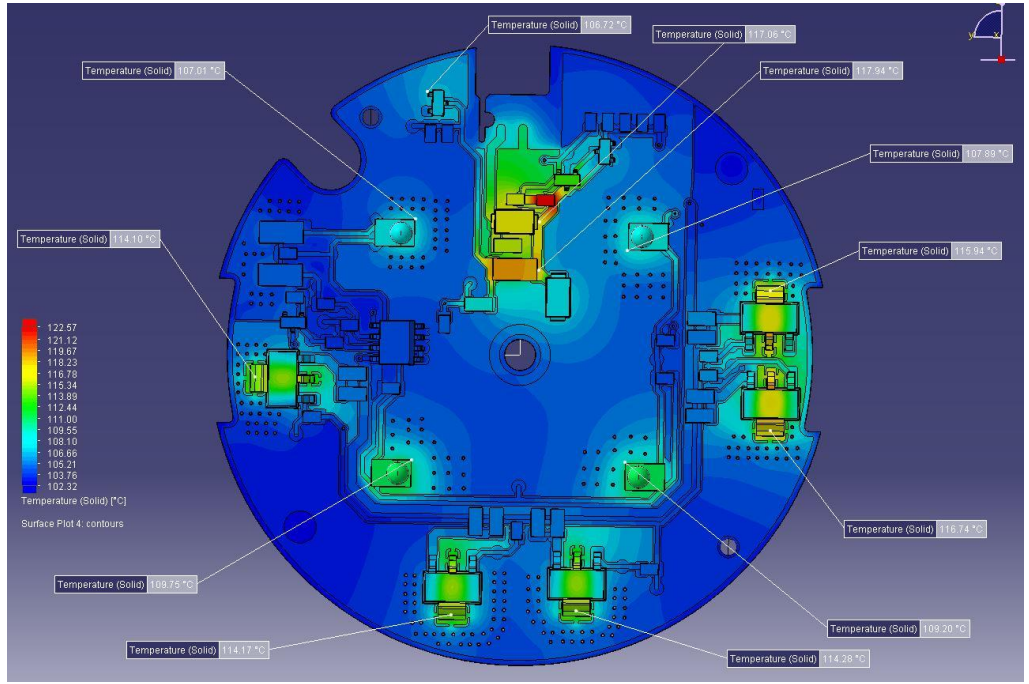
Kıyaslama çalışması üç ayrı ortam sıcaklığı için yapılmıştır ve test ile simülasyonlardan elde edilen sonuçlar Çizelge 3.10’ da karşılaştırılmıştır ve bu çizelgede 30°C, 50°C ve 80°C ortam sıcaklıkları için yapılmış olan çalışmalar görülmektedir. Genel itibariyle tüm çalışmalarda elde edilen mutlak hata değerlerinin %5’ten az olduğu görülmektedir.

Çizelge3.10.Yapılan testler ve simülasyonlar sonucunda elde edilen sonuçların birbiriyle kıyaslanması durumunda ortaya çıkan hata oranları

Test ve Simülasyon Kıyaslaması (30°C Ortam Sıcaklığı)	LEDLER				KOMPONENTLER			TRANSİSTÖRLER				
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10	CH11	CH12
Test ile Ölçülen Sıcaklıklar (°C)	57,9	60,3	64	63	68,3	71,6	56,5	68,4	70,7	67,7	68,9	71
Simülasyon ile Hesaplanan Sıcaklıklar (°C)	61,03	61,56	63,36	63,05	71,65	70,59	60,39	69,47	70,23	67,71	67,61	67,62
Hata Oranı (%)	-5,41	-2,09	1,00	-0,08	-4,90	1,41	-6,88	-1,56	0,66	-0,01	1,87	4,76
Test ve Simülasyon Kıyaslaması (50°C Ortam Sıcaklığı)	LEDLER				KOMPONENTLER			TRANSİSTÖRLER				
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10	CH11	CH12
Test ile Ölçülen Sıcaklıklar (°C)	77,2	79,8	83,5	82,6	87,6	90,7	75,9	88,1	90,4	87,9	88,6	90,5
Simülasyon ile Hesaplanan Sıcaklıklar (°C)	79,32	80,2	81,74	81,57	90,23	89,33	79,1	88,1	88,87	86,42	86,35	86,25
Hata Oranı (%)	-2,75	-0,50	2,11	1,25	-3,00	1,51	-4,22	0,00	1,69	1,68	2,54	4,70
Test ve Simülasyon Kıyaslaması (80°C Ortam Sıcaklığı)	LEDLER				KOMPONENTLER			TRANSİSTÖRLER				
	CH1	CH2	CH3	CH4	CH5	CH6	CH7	CH8	CH9	CH10	CH11	CH12
Test ile Ölçülen Sıcaklıklar (°C)	105	107,6	111,2	110,2	115	118	103,5	116	118,2	116,6	116,4	118,2
Simülasyon ile Hesaplanan Sıcaklıklar (°C)	107,01	107,89	109,75	109,2	117,94	117,06	106,72	115,94	116,74	114,28	114,17	114,1
Hata Oranı (%)	-1,91	-0,27	1,30	0,91	-2,56	0,80	-3,11	0,05	1,24	1,99	1,92	3,47

5.3.14. Simülasyon sonuçlarının incelenmesi

Şekil 3.67’ de 80°C ortam sıcaklığında yapılan simülasyon sonucunda FR4 PCB üzerinde hesaplanan sıcaklık dağılımı görülmektedir. Görüldüğü gibi maksimum LED dip nokta sıcaklığı 109,75°C olarak hesaplanmıştır ve PCB üzerindeki sıcaklık dağılımının Şekil 3.51’de sağda görülen termal kamera görüntüsü ile uyumlu olduğuna dikkat edilmelidir. Bu durumda LED çip sıcaklığı kolaylıkla hesaplanabilir.

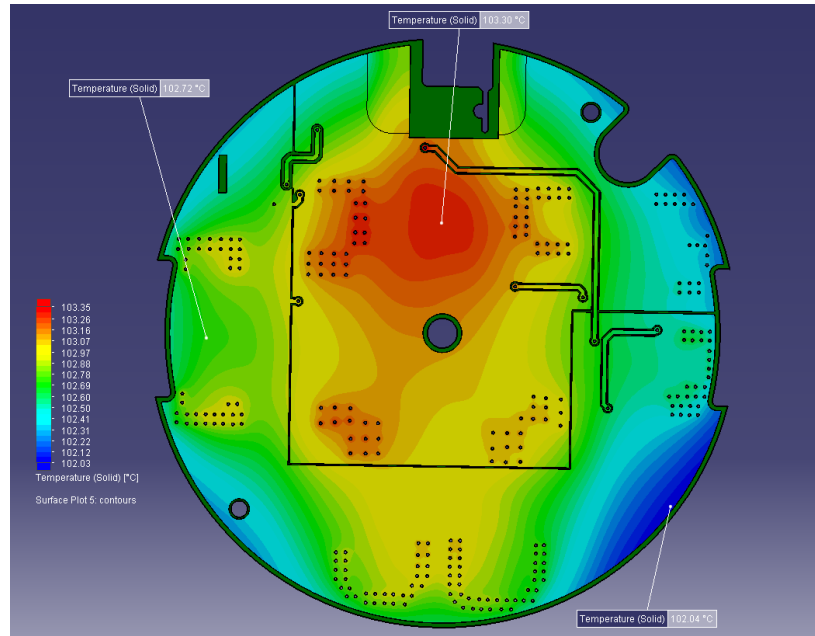


Şekil 3.67.80°C ortam sıcaklığı sınır şartı ile yapılan simülasyon sonucunda PCB üzerinde hesaplanan sıcaklık değerleri(PCB’nin ön yüzüne ait sıcaklık dağılımı)

80°C ortam sıcaklığında LED’lerin ürettiği termal gücün 0,5483W civarında olduğu Şekil 3.55’te görülebilmektedir. Bu üründe kullanılan LED’lerin çipi ile lehimleme noktaları arasındaki termal direnç değeri (Typical Thermal Resistance Junction to Thermal Pad) Çizelge3.3’te görüldüğü gibi 10°C/W’tır. Bu durumda LED çip sıcaklığı aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

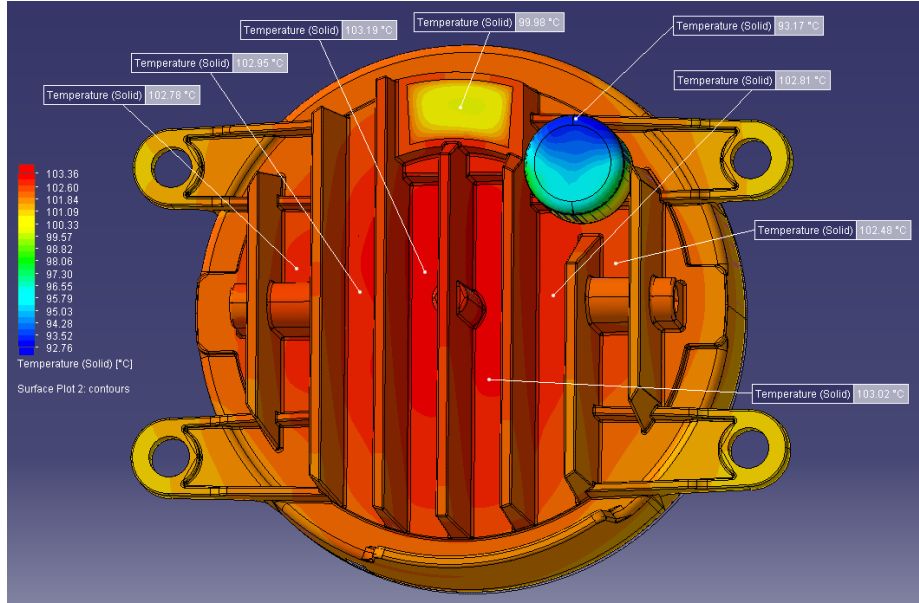
$$T_j = 109,75 + 10 * (0,5483) = 115,233^\circ\text{C}$$

Bu üründe kullanılan LED olan Philips Luxeon Rebel LED çipinin ulaşabileceği maksimum güvenli sıcaklık sınır değeri 150°C olduğu için 80°C ortam sıcaklığı koşulunda LED'lerin güvenli sınırlar içinde çalıştığı tespit edilmiştir. Şekil 3.67' de görüldüğü gibi PCB üzerinde hesaplanan maksimum sıcaklık değeri 122,57°C olmaktadır ve bu sıcaklık değeri aynı zamanda FR4 malzeme üzerinde de oluşmaktadır. Kullanılan FR4 malzemesinin camı geçiş sıcaklığı 130°C olduğundan dolayı PCB üzerinde yüksek termal gerilmelerin oluşması ve zamanla PCB katmanlarının bozulması riski düşüktür. PCB üzerindeki termal gerilmelerin çalışma şartlarında yüksek değerlere çıkması ve bu durumun sürekli tekrar etmesi zamanla PCB üzerindeki komponentlerin sabitleyici lehimlerinde çatlakların oluşmasına ve bir süre sonra da söz konusu lehimin koparak devrenin bozulması sebep olabilir. Bu nedenle FR4 malzemenin sıcaklığı mümkün olduğunca kendi camı geçiş sıcaklığının altında olmalıdır. Bu şekilde PCB üzerindeki termal gerilmelerin oluşturacağı riskler en aza indirilebilir. Şekil 3.68' de alt bakır plakanın (metal gövdeye temas eden kısım) sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.68. 80°C ortam sıcaklığı sınır şartı ile yapılan simülasyon sonucunda PCB üzerinde hesaplanan sıcaklık değerleri (PCB'nin arka yüzüne aitsıcılık dağılımı)

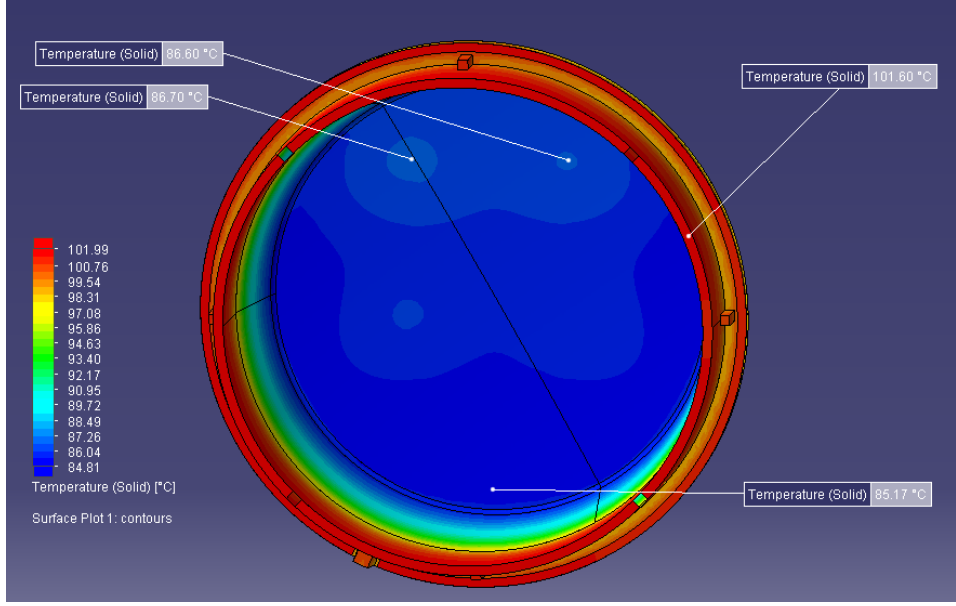
Dikkatlice incelendiğinde alt bakır plaka üzerindeki sıcaklık dağılımının izotermal davranışa sahip olduğu görülmektedir. Maksimum ve minimum sıcaklık farkı yaklaşık olarak 1,3°C civarındadır. Alt bakır plakanın metal gövdeye doğrudan temas etmesi, üzerindeki sıcaklık değişiminin az olmasını sağlamaktadır.Şekil 3.69’da ise metal gövde üzerinde hesaplanan sıcaklık dağılımı görülmektedir.



Şekil 3.69.Alüminyum alaşımı gövde üzerindeki sıcaklık dağılımı görünümü

Bu tasarımda alt bakır plakanın en önemli görevi PCB'nin ön tarafında bulunan komponentlerin ürettiği ısı enerjisinin alüminyum alaşımı metal gövdeye iletilmesidir. Bu yol vasıtasıyla elektronik komponentlerin ürettiği ısı enerjisi metal gövde üzerinden çok daha verimli şekilde ortamdaki havaya taşınım ve ışıınım yoluyla transfer edilebilmektedir. Şekil 3.69'da görüldüğü gibi metal gövde üzerinde hesaplanan maksimum sıcaklık 103,36°C'dir ve gövde üzerindeki en yüksek ve en düşük sıcaklık değerleri arasındaki fark 4°C civarındadır.Gövde malzemesi ısı iletim katsayısının yüksek olması yoluyla bu fark düşürülebilir ve bu şekilde metal gövde üzerindeki artırılmış yüzey alanlarından birim zamanda transfer edilen ısı enerjisi miktarı artırılabilir. Bu nedenle gövde alüminyum alaşımından üretilmiş ve gövdenin arkasına kanatçıklar eklenmiştir.

Şekil 3.70'te ise 80°C ortam sıcaklığında DRL ürünün çalıştırılması durumunda PC lens üzerinde hesaplanan sıcaklıklar görülmektedir. Görüldüğü gibi maksimum 101°C sıcaklık hesaplanmıştır. PC malzemenin vicat sıcaklığı ise 144°C civarındadır ve lensin zarar görmesine sebep olacak bir risk durumu tespit edilmemiştir.



Şekil 3.70.PC lens üzerindeki sıcaklık dağılımı

6. SONUÇ

Bu tezin kapsamında LED'lerin elektriksel davranışları gereği ışık çıkışını kontrol edebilmek için mutlaka akım kontrolü ile sürülmeleri gerektiği ve LED'lerin davranışlarının sıcaklığa güçlü şekilde bağımlı olduğu Bölüm 3'te açıklanmıştır. Ayrıca LED'lerin akım kontrolü ile sürülmeleri konusundaki zorunluluk LED'lerin yanında bir takım akım düzenleyici elektronik komponentlerin de kullanılmasını gerekli hale getirmektedir. Bu sebepler nedeniyle otomotiv sektöründe LED'lerin soğutulması için kanatçıklar sıkça kullanılmaktadır.

Bölüm 4.6'da dikdörtgen kesitli paralel sıralı artırılmış yüzey yapısına sahip alüminyum alaşımı bir kanatçık, artırılmış yüzeylerinin 80 °C sabit sıcaklığa sahip olması ve 25°C ortam sıcaklığında sadece doğal taşınım mekanizmasıyla çalışması koşulu ile termal performans açısından incelenmiştir. Artırılmış yüzey elemanlarının merkezleri arasındaki açıklık değeri artışının termal performans üzerindeki etkisi Elenbaas formülasyonları, Bar Kohen – Rohsenow formülasyonları ve FloEFD yazılımıyla incelenmiş ve üç yöntem ile elde edilen veriler birbiriyle kıyaslanmıştır. Her iki analitik yöntem ile elde edilen artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısı, ortalama Nusselt sayısı ve transfer edilen toplam ısı güç değerlerinin FloEFD yazılımıyla elde edilen veriler ile örtüştüğü görülmüştür. Her bir açıklık değeri için Elenbaas formülasyonları ile elde edilen artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısının FloEFD sonuçlarına göre ortalama %16,129 mutlak fark ve Bar Kohen – Rohsenow formülasyonları ile elde edilen artırılmış yüzeyler üzerindeki ortalama ısı transfer katsayısının FloEFD sonuçlarına göre ortalama %14,606 mutlak fark gösterdiği tespit edilmiştir. Her iki analitik yöntem ile bulunan sonuçların değişen artırılmış yüzey elemanı merkezleri arasındaki açıklık değerlerine göre genellikle FloEFD yazılımıyla elde edilen sonuçlardan daha yüksek olduğu görülmüştür.

Bölüm 5.1' de dört farklı artırılmış yüzey tipine sahip alüminyum alaşımı kanatçık geometrilerinin sağladığı termal performans, değişen artırılmış yüzey elemanı merkezleri arası açıklık değerlerine göre FloEFD yazılımı yardımıyla incelenmiştir.

Çalışma kapsamında dikdörtgen kesitli paralel sıralı artırılmış yüzey yapısı, üçgen profilli paralel sıralı artırılmış yüzey yapısı, dairesel kesitli pin artırılmış yüzey yapısı ve kare kesitli pin artırılmış yüzey yapısına sahip kanatçıklar incelenmiştir ve çalışma kapsamında taban alanı sabit tutulmuştur. Tüm kanatçıklarda taban sıcaklığı sabit 100°C olarak tanımlanmış ve kanatçıklar 25°C ortam sıcaklığında çalıştırılmıştır. Artırılmış yüzey elemanmerkezleri arasındaki açıklık değerinin artışıyla bu yüzeyler üzerinde hesaplanan ortalama ısı transfer katsayısının pin yapılı kanatçık tipleri için 24 W/m²K' e ve paralel sıralı yapılı kanatçık tipleri için 8 W/m²K' e kadar yükseldiği tespit edilmiştir. Yapılan çalışma sonucunda sabit taban alanı koşuluyla kanatçıktan doğal taşınım yoluyla en fazla ısı güç transfer edebilen kanatçığın üçgen profilli paralel sıralı artırılmış yüzey yapısına sahip kanatçık olduğu tespit edilmiştir. Söz konusu çalışma sınır koşullarında dört artırılmış yüzey tipine ait optimum açıklık değerleri araştırılmıştır. Yapılan çalışmaya göre dikdörtgen kesitli paralel sıralı artırılmış yüzey ile kare kesitli pin yapılı artırılmış yüzey tipleri için optimum açıklık değeri 8 mm civarında iken üçgen profilli paralel sıralı artırılmış yüzey ile dairesel kesitli pin yapılı artırılmış yüzey tipleri için optimum açıklık değerinin 6 mm civarında olduğu tespit edilmiştir. Aynı zamanda söz konusu çalışma sınır koşullarında dört artırılmış yüzey tipine ait verimler ve etkenlik değerleri, açıklık değerlerine göre incelenmiştir. Açıklık değerlerinin artışıyla artırılmış yüzey elemanı verimlerinin pin yapılı artırılmış yüzey tipleri için % 85' e kadar ve paralel sıralı yapılı artırılmış yüzeyler için ise % 94' e kadar düşüş gösterdiği görülmüştür. Açıklık değerlerinin artışıyla artırılmış yüzey elemanı etkenliklerinin ise pin yapılı artırılmış yüzey tipleri için 199' a ve paralel sıralı yapılı artırılmış yüzey tipleri için 40' a kadar yükseliş gösterdiği görülmüştür.

Bölüm 5.2'deki bir farın DRL ünitesi üzerinde yapılan uygulama örneği çalışması FloEFD LED modülü kullanılarak gerçekleştirilmiştir ve çalışma sonucunda sıcaklıklar açısından maksimum mutlak hata oranının %5,7 civarında olduğu tespit edilmiştir. Bölüm 5.3' teki DRL aydınlatma ürününün incelendiği uygulama örneğinde ise FloEFD LED modülü kullanılmamıştır ve elde edilen maksimum mutlak hata oranları 30°C ortam sıcaklığında %6,88 iken 50°C ortam sıcaklığında %4,22 ve 80°C ortam sıcaklığında %3,47' dir. Uygulama örnekleri kapsamında yapılan simülasyon çalışmaları sonucunda elde edilen sonuçların gerçek verilere yaklaşım oranı %95 civarındadır ve bu

yaklaşım oranı ürün geliştirme safhasında söz konusu termal simülasyon yönteminin kullanılabilmesi için yeterlidir.

KAYNAKLAR

Anonim, 2002. Application Brief AB20-4. Thermal Management Considerations for Superflux LEDs. [http://www.philipslumileds.com/uploads/226/AB20-4PDF-\(28.02.2014\).](http://www.philipslumileds.com/uploads/226/AB20-4PDF-(28.02.2014).)

Anonim, 2007. Energy Efficiency and Renewable Energy. Thermal Management of White LEDs. [http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/thermal_led_feb07_2.pdf-\(28.02.2014\).](http://apps1.eere.energy.gov/buildings/publications/pdfs/ssl/thermal_led_feb07_2.pdf-(28.02.2014).)

Anonim, 2009. Technical Datasheet DS58. Luxeon Rebel Automotive Specification. [http://www.philipslumileds.com/uploads/161/DS58-pdf-\(15.02.2014\).](http://www.philipslumileds.com/uploads/161/DS58-pdf-(15.02.2014).)

Anonim, 2010. Application Note. Optimizing PCB Thermal Performance for Cree XLamp LEDs. [http://www.cree.com/xlamp_app_notes/pcb_thermal-\(01.03.2014\).](http://www.cree.com/xlamp_app_notes/pcb_thermal-(01.03.2014).)

Anonim, 2014a. Light-emitting diode. [http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode-\(29.08.2014\).](http://en.wikipedia.org/wiki/Light-emitting_diode-(29.08.2014).)

Anonim, 2014b. FloEFD Türkiye distribütör firmasının internet sitesindeki teknik bilgiler. [http://www.ex-en.com.tr/74B1B4D0D38C4F899E223A62A1E4F176/floefd-\(24.06.2014\).](http://www.ex-en.com.tr/74B1B4D0D38C4F899E223A62A1E4F176/floefd-(24.06.2014).)

Anonim, 2014c. Akkor ampuller hakkında temel bilgiler. [http://en.wikipedia.org/wiki/Incandescent_light_bulb-\(21.10.2014\).](http://en.wikipedia.org/wiki/Incandescent_light_bulb-(21.10.2014).)

Anonim, 2014d. AUDI R8 aracına ait LED içeren bir far görünümü. [http://toplowridersites.com/audi-r8-led-headlamp/-\(05.07.2014\).](http://toplowridersites.com/audi-r8-led-headlamp/-(05.07.2014).)

Anonim, 2014e. AUDI R8 aracına ait LED'li arka stop ürünün görünümü. [http://www.autostead.com/2010-audi-r8-5-2/-\(16.10.2014\).](http://www.autostead.com/2010-audi-r8-5-2/-(16.10.2014).)

Anonim 2014f. Bir LED'in kesit görünümü. [http://nwlightingnetwork.com/news/led-tech-talk-1-white-leds-are-blue-leds-\(21.05.2014\).](http://nwlightingnetwork.com/news/led-tech-talk-1-white-leds-are-blue-leds-(21.05.2014).)

Anonim 2014g. AUDI marka otomobil farındaki DRL ünitesinin görünümü. [http://imgarcade.com/1/2013-audi-headlights/-\(25.07.2014\).](http://imgarcade.com/1/2013-audi-headlights/-(25.07.2014).)

Anonim 2014h. Graphtec GL820 Midi Logger görünümü. [http://www.dataq.com/products/graphtec/gl820/-\(06.08.2014\).](http://www.dataq.com/products/graphtec/gl820/-(06.08.2014).)

Anonim 2014i. K tipi termokupl örneği. [http://www.pcbprotos.com/tr/prototip-kartlari/250-soic-8-to-dip-breakout-adaptor.html-\(18.02.2014\).](http://www.pcbprotos.com/tr/prototip-kartlari/250-soic-8-to-dip-breakout-adaptor.html-(18.02.2014).)

Anonim, 2014i. TPG material technical datasheet. TPG Thermal Management Material. [http://epp.fnal.gov/DocDB/0005/000507/001/tpg.pdf-\(09.11.2014\).](http://epp.fnal.gov/DocDB/0005/000507/001/tpg.pdf-(09.11.2014).)

Arik M., Weaver S., 2004. Chip Scale Thermal Management of High Brightness LED Packages, *Fourth International Conference on Solid State Lighting, Bellingham, Vol. 5530, pp. 214-223*

- Adam J., Schmidt W.D. 2012.** Thermo-Design. FED-Geschäftsstelle, Stuttgart, Germany
- Cengel, Y.A. 2011a.***Doğal Taşınım: Isı ve Kütle Transferi*, Çeviri: Tanyıldızı V., Dağtekin İ., İzmir, s. 517-519
- Cengel, Y.A. 2011b.***Doğal Taşınım: Sürekli Isı İletimi*, Çeviri: Tanyıldızı V., Dağtekin İ., İzmir, s. 167
- Cengel, Y.A. 2011c.***TABLO A-15: Havanın 1 atm basınç özellikleri*, Çeviri: Tanyıldızı V., Dağtekin İ., İzmir, s. 860
- Chen F., Wang K., Mao Z., Fu X., Li C., Zhao M., Liu S., 2012.** Application Specific LED Packaging for Automotive Forward-lighting Application and Design of Whole Lamp Module, *IEEE Conference*, pp. 182-186
- Deng Y., Liu J., 2010.** A liquid metal cooling system for the thermal management of high power LEDs, *ELSEVIER International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 37, pp. 788-791
- Fratty H., Stern D., Berner S., Benoit C., 2009.** LED Technologies In Automotive Exterior Lighting, Driving Vision News Technical Survey, www.drivingvisionnews.com
- Fratty H., Stern D., Berner S., Benoit C., 2010.** LED Headlamps, Driving Vision News Technical Survey, www.drivingvisionnews.com
- Fratty H., Stern D., Berner S., Nowak E., 2012.** LED Technologies in Automotive Lighting, Driving Vision News Technical Report, www.drivingvisionnews.com
- Huber R., 2008.** Application Note. Thermal Management of Golden DRAGON LED, OSRAM - Opto Semiconductors
- Jang S., Shin M. W. 2008.** Thermal Analysis of LED Arrays for Automotive Headlamp With a Novel Cooling System, *IEEE Transactions on Device and Materials Reliability*, Vol. 8, No. 3, pp. 561-564
- Kim L., Choi J. H., Jang S. H., Shin M. W., 2006a.** Thermal analysis of LED array system with heat pipe, *Thermochimica Acta*, Vol. 455, pp. 21–25
- Kim L., W. J. Hwang, M. W. Shin, 2006b.** Thermal Resistance Analysis of High Power LEDs with Multi-chip Package, *Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1076-1081
- Kailin P., Guotao R., Peng L., Peng H., 2011.** Thermal Analysis of Multi-chip Module High Power LED Packaging, *International Conference on Electronic Packaging Technology & High Density Packaging, Guilin*, pp. 1124-1127
- Lai Y., Cordero N., 2006.** Thermal Management of Bright LEDs for Automotive Applications, 7th. Int. Conf. On Thermal, *Mechanical and Multiphysics Simulation and Experiments in Micro-Electronics and Micro-Systems, EuroSimE 2006*

- Lai Y., Cordero N., Barthel F., Tebbe F., Kuhn J., Apfelbeck R., Würtenberger D., 2008.** Liquid cooling of bright LEDs for automotive applications, *Applied Thermal Engineering*, Vol. 29, pp. 1239–1244
- Ling O. S., 2012.** Thermal Modeling of High Power LEDs, *Avago Technologies Technical Report*
- Plesca A., 2008.** Optimum Vias Distributon to a Printed Circuit Board, *Journal of Electrical Engineering*, Vol. 59, No. 6, pp. 332–338
- Simons R.E., 2002.** Estimating Natural Convection Heat Transfer for Arrays of Vertical Parallel Flat Plates, *Electronics Cooling Magazine*
- Schäfer R., 2012.** LED Thermo-Electric DVN technical report, Driving Vision News, www.drivingvisionnews.com
- Todorov D. G., Kapisazov L. G., 2008.** Led Thermal Management, *ELECTRONICS' 2008 Conference, Sozopol*
- Weng C. J., 2009.** Advanced thermal enhancement and management of LED packages, *ELSEVIER International Communications in Heat and Mass Transfer*, Vol. 36, pp. 245 – 248
- Yang L., Jang S., Hwang W., Shin M., 2006.** Thermal analysis of high power GaN-based LEDs with ceramic package, *Thermochimica Acta*, Vol. 455, pp. 95–99
- Yang K. S., Wu Y. L., Chen I. Y., Wang C. C., 2009.** An Investigation of Thermal Spreading Device with Thermal Via in High Power LEDs, *International Microsystem Packaging Assembly and Circuits Technology Conference, Taiwan*

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : İbrahim ÖZDİL
Doğum Yeri ve Tarihi : Bursa 07.04.1985
Yabancı Dili : İngilizce

Eğitim Durumu (Kurum ve Yıl)

Lise : Ulubatlı Hasan Anadolu Lisesi (1999-2003)
Lisans : Uludağ Üniversitesi (2003-2007)
Yüksek Lisans : Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri
Enstitüsü Makine Mühendisliği (2011-2015)

Çalıştığı Kurum/Kurumlar ve Yıl : Tekno Tasarım A.Ş. (2007-2008)
: FİGES A.Ş. (2008-2010)
: FARBA A.Ş. (2011-.....)

İletişim (e-posta) : ibrahimozdil_85@hotmail.com
: ibrahim.ozdil@farba.com

Yayınları :