

BİNEK ARAÇLARIN SİNYAL LAMBALARINDA SÜRÜCÜ
DEVRE KARTLARININ ISIL ANALİZİ VE
OPTİMİZASYONU

Ömer ACAR



T.C.
BURSA ULUDAĞ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BİNEK ARAÇLARIN SİNYAL LAMBALARINDA SÜRÜCÜ DEVRE
KARTLARININ ISIL ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Ömer ACAR

501805001

0000-0002-3337-256X

Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman Günday
(Danışman)

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI

BURSA – 2021
Her Hakkı Saklıdır

TEZ ONAYI

Ömer ACAR tarafından hazırlanan “BİNEK ARAÇLARIN SİNYAL LAMBALARINDA SÜRÜCÜ DEVRE KARTLARININ ISIL ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU” adlı tez çalışması aşağıdaki jüri tarafından oy birliği ile Bursa Uludağ Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektronik Anabilim Dalı’nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Danışman : Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman GÜNDAY

- | | | |
|-----------------|--|------|
| Başkan : | Prof. Dr. Güneş YILMAZ
0000-0001-8972-1952
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Telekomünikasyon Anabilim Dalı | İmza |
| Üye : | Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman GÜNDAY
0000-0002-3262-3494
Bursa Uludağ Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Elektronik Anabilim Dalı | İmza |
| Üye : | Dr. Öğr. Üyesi Arif BAŞGÜMÜŞ
0000-0002-0611-3220
Kütahya Dumlupınar Üniversitesi,
Mühendislik Fakültesi,
Devreler ve Sistemler Anabilim Dalı | İmza |

Yukarıdaki sonucu onaylarım

Prof. Dr. Hüseyin Aksel EREN
Enstitü Müdürü

.././.....

B.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.

25/02/2022

Ömer ACAR

EK 8

TEZ YAYINLANMA

FİKRİ MÜLKİYET HAKLARI BEYANI

Enstitü tarafından onaylanan lisansüstü tezin/raporun tamamını veya herhangi bir kısmını, basılı (kâğıt) ve elektronik formatta arşivleme ve aşağıda verilen koşullarla kullanıma açma izni Bursa Uludağ Üniversitesi'ne aittir. Bu izinle Üniversiteye verilen kullanım hakları dışındaki tüm fikri mülkiyet hakları ile tezin tamamının ya da bir bölümünün gelecekteki çalışmalarda (makale, kitap, lisans ve patent vb.) kullanım hakları tarafımıza ait olacaktır. Tezde yer alan telif hakkı bulunan ve sahiplerinden yazılı izin alınarak kullanılması zorunlu metinlerin yazılı izin alınarak kullandığını ve istenildiğinde suretlerini Üniversiteye teslim etmeyi taahhüt ederiz.

Yükseköğretim Kurulu tarafından yayınlanan “**Lisansüstü Tezlerin Elektronik Ortamda Toplanması, Düzenlenmesi ve Erişime Açılmasına İlişkin Yönerge**” kapsamında, yönerge tarafından belirtilen kısıtlamalar olmadığı takdirde tezin YÖK Ulusal Tez Merkezi / B.U.Ü. Kütüphanesi Açık Erişim Sistemi ve üye olunan diğer veri tabanlarının (Proquest veri tabanı gibi) erişimine açılması uygundur.

Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman Günday

Ömer ACAR

Tarih

Tarih

İmza

İmza

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

Bu bölüme kişinin kendi el yazısı ile okudum anladım yazmalı ve imzalanmalıdır.

ÖZET

Yüksek Lisans Tezi

BİNEK ARAÇLARIN SİNYAL LAMBALARINDA SÜRÜCÜ DEVRE KARTLARININ ISIL ANALİZİ VE OPTİMİZASYONU

Ömer ACAR

Bursa Uludağ Üniversitesi
Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Danışman: Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman Günday

Otomotiv endüstrisinde aydınlatma elemanlarının önemi her geçen gün artmaktadır. Çizgisel tasarımların kullanılması, otomotiv aydınlatma birimlerinde doğal taşınımı zorlaştırmaktadır. Bu nedenle, elektronik kontrol üniteleri tasarlanırken oluşabilecek olan termal problemler göz önünde bulundurulmalıdır. Bu çalışmada, elektronik kontrol ünitelerinde kullanılan topolojiler karşılaştırılmış ve verimlilik açısından bu topolojiler incelenmiştir.

Bakır alan genişliği ve Via sayılarının R_{th} (termal direnç) üzerindeki etkisi FloEFD programı kullanılarak hesaplanmıştır. Ayrıca, Matlab 2020b ortamında eğri uydurma ve interpolasyon (ara değer bulma) metotları kullanılarak bakır alan genişliği ve Via sayısının R_{th} değeri üzerindeki etkilerine ilişkin denklemler elde edilmiştir. Böylece, tasarımlar gerçekleştirmeden önce oluşabilecek termal problemlerin önlenmesi amaçlanmıştır.

Bu tez çalışmasında ayrıca, kritik komponent üzerindeki R_{th} değerleri, farklı bakır alan genişlikleri için elde edilen denklem kullanılarak hesaplanmış ve ölçüm sonuçlarıyla arasındaki fark, yaklaşık % 3 olarak elde edilmiştir. Ayrıca, kritik bileşen üzerindeki R_{th} değerleri farklı Vias sayıları için 49,77 °C/W 45,08 °C/W, 41,5 °C/W, 33,72 °C/W olarak bulunmuştur ve hesaplanan değerler ile ölçüm sonuçları arasındaki farkın yaklaşık olarak %1 olduğu tespit edilmiştir.

Sonuç olarak, bu tez çalışmasında, türetilen denklemlerden yararlanarak tasarım esnasında sınır koşullarının hesaplanabileceği ve tasarımda oluşabilecek termal problemlerin önlenebileceği gösterilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Elektronik tasarım, doğal taşınım, otomotiv endüstrisi, pasif soğutma, otomotiv aydınlatma, otomotiv elektroniği, termal direnç

2021, xv + 77 sayfa.

ABSTRACT

MSc Thesis

THERMAL ANALYSIS AND OPTIMIZATION OF THE DRIVE CIRCUIT BOARDS USED IN SIGNAL LAMPS OF THE PASSENGER CARS

Ömer ACAR

Bursa Uludağ University
Graduate School of Natural and Applied Sciences
Department of Electronics Engineering

Supervisor: Asst. Prof. Abdurrahman Günday

The importance of lighting components in the automotive industry has been increasing day by day. The use of linear designs makes natural convection difficult in automotive lighting units. For this reason, what may occur should be considered when designing electronic control units. In this study, the topologies used in electronic control units were compared with each other and these topologies have been examined in terms of efficiency.

The effects of copper area width and number of Vias on R_{th} (thermal resistance) have been computed by using the FloEFD program. Moreover, using curve fitting and interpolation methods in Matlab 2020b environment, equations related to the effects of copper area width and number of Vias on R_{th} values have been obtained. Thus, it has been targeted to prevent the thermal problems that may occur before performing the designs.

In this thesis, furthermore, R_{th} values on the critical component have been computed making use of the equation derived for different copper area widths and the difference between these values and the measurement results has been obtained as about 3 %. Additionally, R_{th} values on the critical component have been found as $49,77^{\circ}\text{C}/\text{W}$, $45,08^{\circ}\text{C}/\text{W}$, $41,5^{\circ}\text{C}/\text{W}$, $33,72^{\circ}\text{C}/\text{W}$ for different numbers of Vias and it has been determined that the difference between computed values and the measurement results are 1 %, approximately.

Consequently, it has been shown that the boundary conditions can be computed and prevent the thermal problems occurring during the design process by means of using derived equations in this thesis.

Key Words: Electronic design, natural convection, automotive industry, passive cooling, automotive lighting, automotive electronics, thermal resistance

2021, xiv + 77 pages.

ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR

Bu tezin hazırlanması sürecinde vermiş olduğu teorik katkılar ve yapmış olduğu değerli yönlendirmelerinden dolayı danışman hocam sayın Dr. Öğr. Üyesi Abdurrahman GÜNDAY'a teşekkürlerimi sunarım.

Tezin uygulama aşamasında incelenen PCB'lerin termal analizi ile ilgili gerekli bilgilerin sağlanması konusunda görüşlerini paylaşan değerli mühendis arkadaşlarım Burak OĞUZ ve Mesut Muhammed AKKAYA'ya çok teşekkür ederim.

Tez kapsamında kullanılan ve incelenen tüm ürünlere ait materyalleri temin eden FEKA Otomotiv'e teşekkür ederim.

Son olarak, bu tezin hazırlanması sırasında bana maddi ve manevi her türlü desteği sağlayan değerli annem, babam ve sevgili eşim Ayşegül KURT ACAR'a teşekkür ederim.

Ömer ACAR

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

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET.....	vi
ABSTRACT.....	vii
ÖNSÖZ ve/veya TEŞEKKÜR.....	viii
SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ.....	x
ŞEKİLLER DİZİNİ.....	xi
1. GİRİŞ.....	1
2. KAYNAK ARAŞTIRMASI.....	3
2.1 KURAMSAL TEMELLER.....	8
2.1. LED Tanımı ve Kullanım Alanları.....	8
2.1.1 LED'lerin Tarihçesi.....	8
2.1.2 LED'lerin Üretimi.....	10
2.2 LED'lerin Yapısı ve Çalışma Prensibi.....	10
2.3 LED'lerin Elektriksel Davranışı.....	12
2.4 LED'lerin Termal Davranışı.....	14
2.5 LED'lerin Verimliliğinin Sıcak Işık Kaynakları ile Kıyaslanması.....	15
2.6 LED'lerin Ömrü ve Işık Bozulması Davranışı.....	15
2.7 Otomotiv Aydınlatma Birimlerinde LED'lerin Kullanımı.....	17
3. MATERYAL VE YÖNTEM.....	18
3.1. Tezin Amacı.....	19
3.2. Otomotiv Aydınlatma Birimlerinde Kullanılan Topolojiler.....	21
3.2.1 Resistif Yapılar.....	21
3.2.2 Lineer Yapılar.....	23
3.2.3 DC/DC Yapılar.....	24
4. BULGULAR.....	29
4.1 LED'li Ön Sis Örneğinde Topolojilerin Karşılaştırılması.....	29
4.1.1 PCB'lerin Hazırlanması.....	29
4.1.1.1 Resistif LED'li Ön Sis Lambasının Hazırlanması ve Analizi.....	29
4.1.1.2 Lineer LED'li Ön Sis Lambasının Hazırlanması ve Analizi.....	33
4.1.1.3 DC/DC LED'li Ön Sis Lambasının Hazırlanması ve Analizi.....	36
4.1.2 Karşılaştırma Sonuçları.....	39
4.2 Soğutma Amaçlı Bırakılan Bakır Alanların Rth Değerine Etkisi.....	40
4.2.1 Bakır Alan Genişliğinin Rth Etkisi.....	41
4.2.2 Ölçümü Yapılacak PCB'lerin Hazırlanması.....	44
4.2.3 Analiz Sonuçları (Bakır Alan Genişliği Rth Bağlantısı).....	48
4.2.4 Analiz Sonuçlarının Denklem Haline Dönüştürülmesi.....	53
4.2.5 Ölçüm Sonuçları (Bakır Alan Genişliği Rth Bağlantısı).....	55
4.2.6 Elde Edilen Rth Değeriyle Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	59
4.3 Via'ların Termal Etkisi.....	60
4.3.1 Analiz Sonuçları (Via Sayısı Rth Bağlantısı).....	61
4.3.2 Analiz Sonuçlarının Denklem Haline Dönüştürülmesi.....	66
4.3.2 Ölçüm Yapılacak PCB'lerin Hazırlanması.....	67
4.3.3 Ölçümü Sonuçları (Via Sayısı Rth Bağlantısı).....	67
4.3.4 Elde Edilen Rth Değeriyle Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması.....	71
5. SONUÇ VE TARTIŞMA.....	72
KAYNAKLAR.....	75
ÖZGEÇMİŞ.....	77

SİMGELER ve KISALTMALAR DİZİNİ

Simgeler	Açıklama
μF	Mikrofarad
$\text{dB}\mu\text{V}$	Desibel mikrovolt
InGaN	İndiyum galyum nitrit

Kısaltmalar	Açıklama
BJT	Bipolar Jonksiyon Transistor
DC	Doğru Akım
DUT	Test Altındaki Cihaz
EM	Elektromanyetik
EMC	Elektromanyetik Uyumluluk
EMI	Elektromanyetik Girişim
ESD	Elektrostatik Deşarj
G	İletkenlik Katsayısı
HID	High Intensity Discharge
LED	Light Emitting Diode
MOSFET	Alan Etkili Transistor
OLED	Organic Light Emitting Diode
PCB	Baskı Devre Kartı
Rth	Termal Direnç
TVS	Anlık Gerilim Bastırma

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. LED'in ışık üretme mekanizması	11
Şekil 2.2. İleri voltaj - sıcaklık grafiği	13
Şekil 2.3. Ters voltaj grafiği.....	13
Şekil 2.4. Aydınlatma teknolojisinin gelişimi	16
Şekil 2.5. LED'li stop lambası örneği	17
Şekil 3.1. Camsı sıcaklık grafiği	20
Şekil 3.2. Işık çıkış gücü ve LED ömrünün sıcaklığa göre değişimi	21
Şekil 3.3. Resistif yapı örneği	22
Şekil 3.4. Lineer yapı örneği.....	23
Şekil 3.5. Zenerli akım sabitleyici.....	24
Şekil 3.6. DC/DC buck yapısı örneği	25
Şekil 3.7. DC/DC boost yapısı örneği	26
Şekil 3.8. DC/DC buck boost yapısı örneği	27
Şekil 4.1. Resistif LED'li ön sis lamba yapısı örneği	29
Şekil 4.2. Resistif LED'li ön sis sürme devresi spice çizimi	30
Şekil 4.3. Resistif LED'li ön sis layout gösterimi.....	30
Şekil 4.4. 3D Resistif LED'li ön sis gösterimi.....	30
Şekil 4.5. Start Stop çalışma gerilimi grafiği	31
Şekil 4.6. Resistif LED'li ön sis lambasının analiz sonucu oluşan termal harita.....	32
Şekil 4.7. Lineer yapı devre şeması	33
Şekil 4.8. Lineer LED'li ön sis lambasının PCB çizimi	34
Şekil 4.9. 3D Lineer LED'li ön sis PCB	34
Şekil 4.10. Lineer LED'li ön sis lambasının analiz sonucu oluşan termal harita	35
Şekil 4.11. DC/DC LED'li ön sis sürme devre şeması	36
Şekil 4.12. DC/DC LED'li ön sis sürme devresi spice çizimi	37
Şekil 4.13. DC/DC LED'li ön sis PCB çizimi	38
Şekil 4.14. 3D DC/DC LED'li ön sis PCB'si.....	38
Şekil 4.15. DC/DC LED'li ön sis analiz sonucu oluşan PCB termal harita.....	39
Şekil 4.16. Rth eşdeğer devresi	41
Şekil 4.17. Standart bacak tipi bakır alan genişliği.....	42
Şekil 4.18. Devrenin şema gösterimi	43
Şekil 4.19. Devrenin spice modeli	43
Şekil 4.20. PCB paneli	44
Şekil 4.21. Hazırlanan PCB'ler (Bakır alan genişliği)	45
Şekil 4.22. Ölçümlerde kullanılacak K tipi termokupl	46
Şekil 4.23. Ölçümlerde kullanılacak termal macunlar	46
Şekil 4.24. Termal macun karışımının karıştırılması	47
Şekil 4.25. Termokupl bağlantılarının gösterimi	47
Şekil 4.26. PCB'nin fırın içerisindeki konumu.....	48
Şekil 4.27. Datalogger termokupl bağlantısı.....	48
Şekil 4.28. Bakır alan bırakılmayan çözüm	49
Şekil 4.29. 1cm ² bakır alan bırakılan çözüm.....	49
Şekil 4.30. 3cm ² bakır alan bırakılan çözüm.....	50
Şekil 4.31. 4cm ² bakır alan bırakılan çözüm.....	50
Şekil 4.32. 6cm ² bakır alan bırakılan çözüm.....	51

Şekil 4.33. 3 cm ² bakır alan genişliği Rth ilişkisi	54
Şekil 4.34. Matlab benzetimlerinde, düşey eksen Rth değişimi (°C/W).....	55
Şekil 4.35. Ölçüm sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği (Bakır alan genişliği)	57
Şekil 4.36. 3 cm ² alan genişliğine sahip 13 Adet TermoVia'lı PCB.....	61
Şekil 4.37. 3 cm ² alan genişliği 13 adet termoVia'lı PCB analizi.....	62
Şekil 4.38. 3 cm ² alan genişliği 37 adet termoVia'lı PCB analizi	62
Şekil 4.39. 3 cm ² alan genişliği 68 adet termoVia'lı PCB analizi.....	63
Şekil 4.40. 3 cm ² alan genişliği 250 adet termoVia'lı PCB analizi	63
Şekil 4.41. Matlab benzetimlerinde, düşey eksen Rth değişimi (°C/W).....	66
Şekil 4.42. Ölçüm için hazırlanan Via'lı PCB'ler.....	67
Şekil 4.43. Ölçüm sonuçlarının karşılaştırmalı grafiği (Via sayısı).....	70

ÇİZELGELER DİZİNİ

	Sayfa
Çizelge 4.1. Topolojiler-LED jonksiyon sıcaklıkları.....	39
Çizelge 4.2. Topolojilerin verimlilik sonuçları.....	40
Çizelge 4.3. Bakır alan genişliği etkisinin analiz sonucu.....	51
Çizelge 4.4. Analiz sonuçlarına göre hesaplanan Rth değerleri çizelgesi (Bakır alan genişliği).....	53
Çizelge 4.5. Ölçüm sonuçları çizelgesi (Bakır alan genişliği).....	56
Çizelge 4.6. Ölçülen fırın içi ve komponent sıcaklığı farkı çizelgesi.....	56
Çizelge 4.7. Ölçülen ve hesaplanan Rth farkı çizelgesi (Bakır alan genişliği).....	60
Çizelge 4.8. Via etkisinin analiz sonuçları çizelgesi.....	64
Çizelge 4.9. Analiz sonuçlarına göre hesaplanan Rth değeri.....	65
Çizelge 4.10. Ölçüm sonuçları çizelgesi (Via sayısı).....	68
Çizelge 4.11. Ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan Rth değeri.....	69
Çizelge 4.12. Ölçülen ve hesaplanan Rth farkı çizelgesi (Via sayısı).....	71

GRAFİKLER DİZİNİ

	Sayfa
Grafik 4.1. Transistörün üzerinden akan akım.....	43
Grafik 4.2. Transistörün üzerindeki güç	44
Grafik 4.3. Bakır alan genişliği – sıcaklık grafiği.....	52
Grafik 4.4. Bakır alan genişliği – Analiz sonuçlarına göre Rth değeri grafiği	53
Grafik 4.5. Bakır alan genişliği – Ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan Rth grafiği	58
Grafik 4.6. Via sayısı – Analiz sıcaklık grafiği.....	64
Grafik 4.7. Analiz sonuçlarına göre hesaplanan Rth değeri - Via sayısı	65
Grafik 4.8. Via sayısı – Ölçüm grafiği	68
Grafik 4.9. Ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan Rth değeri - Via sayısı	69

1.GİRİŞ

Bu tezin araştırma konuları, genel olarak LED'li aydınlatma sistemlerinin en önemli sınırlayıcılarından biri olan sıcaklığın ve buna bağlı olarak ele alınabilecek verimlilik kavramının üzerinde durulması, komponent üzerindeki sıcaklığın pasif soğutma metotlarıyla düşürülmesinin incelenmesi ve termal sıcaklık, bakır soğutma alanları PCB üzerindeki Via sayıları ilişkisini veren ifadelerin elde edilmesini kapsamaktadır. Ayrıca, bakır alanların genişliğinin ve Viaların termal performansa etkileri analiz edilerek topolojilerin verimliliği üzerinde durulmuştur.

Bunlara ilaveten, Matlab 2020b ortamında eğri uydurma ve interpolasyon (aradeğer bulma) metotları kullanılarak Via sayıları ile bakır soğutma alanları ve Rth değerlerini bulacak matematiksel eşitlikler türetilmiştir. Böylece elde edilen bu denklemler aracılığıyla, tasarım sırasında ve testler esnasında oluşabilecek termal problemlerin önüne geçilmesi yönünde yeni bir yaklaşım öne sürülmüştür.

Kaynak araştırması bölümünde LED'lerin ve LED'li ürünlerin termal davranışları, LED'lerin jonksiyon sıcaklığını düşürmeye 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.

Kuramsal temeller bölümünde ise LED'lerin çalışma mantığı, elektriksel ve termal davranışları hakkında detaylı bilgiler verilmiş; ısı üretim ve ısı yayma mekanizmaları detaylı şekilde açıklanmıştır. LED'lerin verimi, Rth (ısı direnç) değerinin LED ömrü üzerindeki etkisi, LED'ler için üzerinde oluşan ısının önemi açıklanmış ve LED'lerin üzerinde oluşan ısıyı kontrol etmeye yönelik olarak kullanılan bazı yöntemlerden bahsedilmiştir. Ayrıca bu bölümde LED'lerin otomotiv endüstrisindeki kullanım alanlarından ve diğer ışık kaynaklarına göre sağladığı avantajlardan bahsedilmiştir.

Materyal ve yöntem bölümünde ise tezin amacı, tezin önemi, otomotiv aydınlatma birimlerinde kullanılan topolojiler ile ilgili bilgiler paylaşılmış olup bu topolojilerin teorik temelleri açıklanmıştır.

Bulgular kısmında, LED sürme topolojilerinin veriminin kıyaslanması, 0,3 mm çapına sahip termal Viaların Rth değerine etkisi ve soğutma amaçlı bırakılan 35µm kalınlığa sahip bakır alanların Rth değerine etkisi incelenmiştir. Yapılan ölçümler ve ölçüm fikstürlerinin hazırlanmasına ilişkin detaylar ve analiz programının ayar değerleri eklenmiştir. Analiz sonuçlarından elde edilen değerler kullanılarak Matlab 2020b aracılığıyla matematiksel ilişkileri veren denklemler türetilmiş ve elde edilen sonuçların laboratuvar ölçümleri ve analiz programındaki sonuçları verilmiştir.

Sonuç kısmında ise ölçüm ve program çıktılarına ait bulgular yorumlanmış, elde edilen sonuçların avantaj ve dezavantajları üzerinde durulmuştur. Ayrıca, alanda gerçekleştirilecek ileriki çalışmalar ve otomotiv aydınlatma birimleri için tavsiye niteliğinde görüşlere yer verilmiştir.

2. KAYNAK ARAŞTIRMASI

Otomotiv aydınlatma birimlerinde elektronik kontrol teknolojisi, son yıllarda önemli ölçüde gelişmiştir. Bunun yanında LED teknolojisindeki gelişmeler, LED'leri otomotiv aydınlatma uygulamalarında yaygın hale getirmiştir (Kang ve ark. 2010).

Bir aracın ortalama sürüş ömrü, 5000 saat olarak kabul edilmektedir ve LED ömürlerinin bu değerin çok üzerinde olduğu bilinmektedir. Garanti süresinin de yanında getirdiği ek maliyetler, otomobil üreticileri için çözülmesi gereken bir sorun olmuştur. LED'lerin otomotiv aydınlatma uygulamalarına adapte edilmesi ve ısıl performans yönetimi ile ilgili bu çalışma Ackermann ve Sardi (2005) tarafından literatüre kazandırılmıştır.

LED'li ışık kaynaklarının özellikleri, bilinen tungsten filament ve HID (High Intensity Discharge - Yüksek Yoğunluklu Deşarj) plazma ampullerinden temel olarak farklıdır. Otomobil üreticilerinin stil olarak rakiplerinden farklılaşma arzusu, çizgisel aydınlatma detayları, LED'li ışık kaynaklarının diğer olumlu özellikleridir. Bu durumu, Ackermann ve Sardi (2005) çalışmalarında ifade etmişlerdir.

Mitterhofer, Stefan ve ark. (2020) yaptıkları çalışmada su soğutmalı bir alüminyum levha üzerine monte edilmiş modüler bir LED dizi ışık kaynağının soğutma performansını incelemiştir. Papatya zinciri topolojisi kullanılarak seri iletişim veriyolu üzerinden bağlanan LED zincirleri, her bir LED'in ayrı ayrı akımını ayarlayacak şekilde geliştirilmiştir. 10 LED içeren bir plakanın prototipinde, belirlenen alanda daha iyi bir homojenite için LED parlaklıkları optimize edilmiştir.

Blankenbach ve ark. (2020), otomotiv iç aydınlatma uygulamalarında RGB LED kullanımına ilişkin çalışmalar yapmışlardır. RGB LED'ler ürettikleri farklı dalga boyundaki ışıklar yardımıyla sürücünün ruh haline etki ettiği için bu amaç doğrultusunda kullanılmaktadır. Gerektiğinde de sürücüyü uyaran şekilde uygulamalarda kendisine yer bulmuştur. Blankenbach ve ark. (2020), ihtiyaçları karşılayan ve entegrasyon öncesi kalibrasyon ile maliyetten ve iş gücünden tasarruf sağlayan RGB (LED) sisteminin çalışmasını gerçekleştirmişlerdir. Çalışmalarında ayrıca, LED parlaklık profilinin Gauss

uyumuna dayalı olarak doğrudan aydınlatmalı RGB ışık kılavuzları hakkında bilgi vermişlerdir.

Li ve ark. (2020) yapmış oldukları çalışmada, amber, kırmızı ve beyaz LED'ler de dahil olmak üzere otomotiv aydınlatmasında kullanılan LED'lerin otomotiv uygulamalarını özetlemişlerdir. Yaptıkları çalışmada, sürücü akımının artmasıyla artan ışık akısı ve sürücü akımının artmasından kaynaklanan yüksek çekirdek sıcaklığı gibi iki önemli faktör üzerinde durmuşlardır. Ayrıca, bu çalışmada farklı dalgaboyuna sahip LED'lerin farklı lüminesans mekanizmasına göre sürücü akımının artması nedeniyle hem ışık akısının iyileştirilmesinin hem de yüksek çekirdek sıcaklıklarından kaynaklanan ışık akısının düşüşünün değişimi, analiz yöntemleriyle incelenmiştir.

PCB üzerindeki birçok değişken LED çekirdek sıcaklığını değiştirebilir. Bunlardan biri de LED'ler arasındaki mesafedir. LED'ler arasındaki mesafenin en az 4 mm olması durumunda elde edilen sonuçlar, LED'lerin ısıl etkileşiminin olmaması için yeter şartın belirlenmesi konusu Petroski'nin (2004) çalışmasında incelenmiştir. Bu çalışmada, verilen mesafenin yeter şart olduğu sonucuna ulaşılmıştır.

Filipuzzi ve ark. (2007) yaptıkları çalışmada ısının plastik yüzeylerin yapısını bozduğunu tespit etmişler ve maliyetleri ve zaman kaybını en aza indirmek için analiz programından yararlanmışlardır. Kayıplardan oluşabilecek riskleri, ANSYS CFX 11.0 bilgisayar destekli mühendislik tasarımı programını kullanmak suretiyle termal davranışları inceleyerek göstermişlerdir. Yapılan çalışmada ayrıca, akı yoğunluğunu tahmin etmek için Monte Carlo yöntemi kullanılmış ve EDStar kodlama ortamında uygulama gerçekleştirilmiştir. Analiz sonucu ve prototip üzerindeki test sonuçları kıyaslandığında bu farkın yaklaşık olarak % 5 olduğu görülmüştür.

Akkaya ve Acar (2021) "*PCB Material and Heat Shield Effect on The LEDs Thermal Performance in The Automotive Lighting Systems*" adlı çalışmalarında LED bağlantı sıcaklıklarını incelemişler, PCB malzeme ve ısı kalkanı kalınlıklarının LED bağlantı sıcaklıkları üzerindeki performansını gözlemlemişlerdir. Bu çalışmalarında 3 farklı senaryo üzerinde durulmuş ve bu çalışmaların analizleri karşılaştırılmıştır. İlk çalışmada, Alüminyum PCB örneğine odaklanılmış ve bilgisayar destekli analiz programları

kullanılarak LED bağlantı sıcaklığı analiz edilmiştir. Aynı şekilde ikinci çalışmada da ısı kalkanlı FR4 PCB örneği analiz edilmiştir.

Üçüncü çalışmada ise FR4 malzemedan yapılmış PCB'nin LED bağlantı sıcaklığı, analiz programı tarafından konfigüre edilmiştir. Alüminyum PCB bağlantı sıcaklıkları için, LED1, 112.47 °C, LED2, 114.15 °C ve LED3, 116.38 °C'de ölçülmüştür. Isı kalkanı senaryosundaki LED'ler farklı kalınlıktaki ısı kalkanları ile analiz edilmiştir. En soğuk ölçüm 1,2 mm kalınlık ile alınmış olup LED1, 122.74 °C, LED2, 124.51 °C ve LED3 126.39 °C olarak ölçülmüştür. Diğer vaka çözümlerinde; 0,8mm Alüminyum ısı kalkanı ile LED1 123°C, LED2, 125.33°C, LED3, 127.68°C, 1mm Alüminyum ısı kalkanı ile LED1, 123.33°C, LED2, 125.32°C ve LED3, 127.155°C olarak ölçülmüştür.

FR4 PCB'nin 1,5 mm seçildiği durumda, sıcaklıklar LED1, 127.82 °C, LED2, 130.49 °C ve LED3 133,9 °C olarak analiz edilmiştir. Bu çalışmada 3 farklı yöntem karşılaştırılmıştır ve bu yaklaşımlarla en iyi LED soğutmanın hangi senaryoda elde edilebileceği gösterilmiştir. LED soğutulurken en iyi termal performans Alüminyum PCB'de, en kötü performans ise ısı kalkanı olmayan 1,5 mm FR4 PCB'de gözlenmiştir. Tüm bu çalışmalar, 85 °C sıcaklıkta 90 dakika sürede ve ortam sıcaklığında havalandırma olmadan gerçekleştirilmiştir.

Arik ve Weaver (2004), LED'lerin aydınlatma uygulamalarında kullanımına ilişkin çalışmalar gerçekleştirmişlerdir. Bu çalışmalarında, maliyet/lümen değerlerinin, pratik çalışmalar açısından önemi üzerinde durmuşlardır. Bu nedenle, LED üreticilerinin, LED'lerin ışık çıkış performanslarını düşük maliyetle artırmak için çok sayıda çalışma yaptığı söylenebilir. Bu bağlamda, LED sürme akımının artması daha düşük termal dirence sahip paket tasarımlarına ihtiyaç duyulmasına neden olmuştur. Güç yoğunluğu artmaya devam ettikçe, elektrik ve termal ara bağlantı paketinin bütünlüğü son derece önemli hale gelmiştir. Bunun yanı sıra, LED paketleri ile yapılan deneysel sonuçlar, yonga bağlantılarında oluşan kusurların LED yongalarında arızalara yol açtığı görülmüştür. Ayrıca, oluşan bu hataların mekanizmasını anlamak için sonlu elemanlar metodu kullanılarak, çalışmalarında flip chip konfigürasyonu araştırılmış ve elde edilen bulgulara yer verilmiştir.

Kim ve ark (2006), çok çipli tasarımlarda yüksek ışık çıkış gücüne sahip GaN malzemesi içeren LED'lerin çekirdek sıcaklıklarının ölçümünü yapmışlardır. Paket özellikleri (büyüklük ve malzeme özellikleri) aynı olan yapılar üzerinde elde edilen test sonuçları tek çipli, iki çipli, dört çipli olacak şekilde sırasıyla 19.87K/W, 10.78K/W, 6.77K/W olarak elde edilmiştir. Çoklu yonga paketinin toplam ısıl direncinin paralel ısı yayılımından dolayı yonga sayısı arttıkça azaldığı gözlenmiştir.

Bir paketteki yonga sayısının ısıl direnç üzerindeki etkisinin, yonganın kısmi ısıl direnci ile kütüğün kısmi ısıl direncinin oranına bağlı olduğu bulunmuştur. Yapılan bu çalışma "*Thermal Resistance Analysis of High Power LEDs with Multi-chip Package*" isimli makale ile yayımlanmıştır.

Lai ve Cordero (2006) "*Thermal Management of Bright LEDs for Automotive Applications*" adlı çalışmalarında otomotiv uygulamalarında yüksek parlaklıktaki LED'lerin soğutma çözümlerini araştırmışlardır. Bu araştırmada, kontrol ünitesinden LED PCB'sine kadar bir termal tasarım gerçekleştirilmiş ve optimum termal performansı bulmak için optimizasyon çalışması yapılmıştır. Bu özel uygulamada hem doğal hem de zorlanmış konveksiyon araştırılmış kanatçık kalınlığı, sayısı, uzunluğunun ve her bir durum için sonuçlar çıkarılmıştır.

LED üreticisi Cree firmasında (Anonim 2010), FR4 PCB üzerine eklenen termoVialar üzerinde çalışılmış ve termal Viaların etkisi incelenmiştir. Bu sonuçlara göre termal Via eklenmemiş FR4 PCB üzerinde ölçülen termal direnç değerinin, Alüminyum PCB'ye kıyasla yaklaşık olarak 6 kat büyük direnç değerine sahip olduğu gözlenmiştir. Bu çalışmada ayrıca, termal Vialar eklendikten sonraki FR4 PCB'sinin termal direncinin önemli ölçüde düştüğü gözlenmiştir. Vialı senaryolar içi boş Via ve içi dolu olarak çeşitlendirilmiş ve içi dolu olan Viaların boş olanlara göre daha iyi termal iyileşme sağladığı tespit edilmiştir.

Uras ve ark. (2017), "*Thermal Performance of an LED Light Engine for a Multi-Purpose Automotive Exterior Lighting System with Competing Board Technologies*" adıyla yayımladıkları çalışmalarında, LED'lerin düşük güç tüketimi ve hassas optik kontrol gibi

sayısız avantajı nedeniyle otomobil aydınlatma uygulamaları için tercih edilir hale geldiğini; bu katı hal aydınlatma (SSL) ürünleri benzersiz avantajlar sunsa da termal performans, test koşulları ve kısıtlı hacim nedeniyle sorun oluşturmakta olduklarını söylemişlerdir. Ayrıca, aynı geometriye sahip 3 farklı PCB malzemesiyle yaptıkları çalışmada gelişmiş ısı dağıtıcı PCB'nin Alüminyum ve FR4 PCB'lerine göre çok daha iyi performans gösterdiği sonucuna ulaşmışlardır.

Sökmen ve ark. (2014) “*Otomotiv LED Aydınlatma Ünitesinde Soğutucu Sistem Tasarımının Nümerik ve Deneysel Olarak İncelenmesi*” adlı çalışmalarında son yıllarda özellikle otomotiv sanayinde yaygın olarak kullanılmaya başlanan LED'li aydınlatma sistemlerini incelemişler ve bu sistemlerin fonksiyonlarını yerine getirebilmesi amacıyla belirlenen kritik sıcaklığın aşılmaması için çeşitli soğutma sistemleri tasarımı üzerine odaklanmışlardır.

Ayrıca çalışmalarında, bir otomobil ön aydınlatma elemanının içinde kullanılabilecek çeşitli güçlerdeki LED'li aydınlatma elemanlarının far içerisindeki test veya çevresel sıcaklığın artmasıyla LED yongasının çekirdek sıcaklığının değişimi gösterilmiştir. Müşteri tarafından belirlenen maksimum sıcaklığın üzerine çıkıp çıkmayacağı; bu durum gerçekleşirse de devre kartına soğutma amacıyla eklenen alüminyum ve kanatçık kullanımı gibi çözümler, bilgisayar destekli hesaplama programı olan ANSYS kullanılarak hesaplanmıştır.

Çok katmanlı elektronik kartlarda kullanılan termal Viaların ısı iletkenlik, diğer bir deyişle termal dirence etkisi, Adrian Plesca (2008) tarafından “*Optimum Vias Distribution To a Printed Circuit Board*” ismiyle yayınlanan bu makalede termal Viaların dizilim farklılıklarının ve adetlerinin karşılaştırılmasını üzerinde durmuş ve bu parametrelerin ısı iletim katsayısının ne şekilde değiştirdiğini incelemiştir.

Adrian Plesca (2008), termal Viaların dizilim geometrilerinin termal iletkenlik katsayısına etkisinin olmadığını gözlemlerken, Via sayılarının termal dirence önemli ölçüde değiştirdiğini göstermiştir. Bunlara ek olarak Via lokasyonunun mümkün olduğunca ısı kaynağına yakın olmasının termal performansını artırdığını göstermiştir

2.1 KURAMSAL TEMELLER

2.1. LED Tanımı ve Kullanım Alanları

Light Emitting Diode, ışık yayan diyotlar yani LED'ler; ekran arka aydınlatmaları, haberleşme, medikal uygulamalar, sinyalizasyon sistemlerinde ve benzeri birçok alanda yaygın bir biçimde kullanılmaktadır.

LED'ler temelde uygun gerilim veya akım uygulandığında elektrik enerjisini ışık enerjisine dönüştürme kabiliyetine sahip, özel katkılı PN tipi diyotlardır. Bu yarı iletkenler silikon hammaddesi ile üretilmekte; arsenik, alüminyum, fosfat, galyum vb. kimyasallarla katkı sağlanarak farklı ışık renkleri ve dalga boyları elde edilebilmektedir. Görünür ışıkta olduğu gibi malzemenin özelliğine göre kızılötesi, mor ötesi gibi çeşitli ışık tayflarında ışınım özelliğine sahiptir.

2.1.1. LED'lerin Tarihçesi

LED tarihi; üretim teknolojileri ve ekipmanları, yeni fosfor malzemesi ve ısı dağılımı geliştiren paketleme teknolojisi olarak 3 ana bölüme ayrılabilir. İlk ticari LED, 1960 sonlarında geliştirilmiştir. 1960'lı yılların sonlarından 1980 yıllarına kadar birinci nesil LED'lerden bahsedilebilir. Bu dönemde LED'ler, daha çok göstergelerde ve numerik ekran teknolojilerinde kullanılmıştır. Ticari amaçla kullanılan yüksek parlaklığa sahip ilk LED'ler, 1980'li yıllarda Fairchild Şirketi tarafından üretilmiştir.

İkinci nesil LED'ler, 1990'lardan günümüze kadar yüksek parlaklığa sahip LED'ler olarak tüm dünyada popüler hale gelmiştir. İkinci nesil LED'lerin ana uygulama alanları hareketli ekranlar, arka ünite aydınlatmaları, cep telefonları, mimari uygulamalar ve otomotiv aydınlatma elemanlarıdır. Üçüncü nesil LED'ler, markette henüz yerini bulmaktadır. Önceki nesillere göre enerji tüketimi daha az ve ışık verimliliği daha fazladır.

Moore, ismiyle anılan meşhur yasasında yonga içerisinde silisyum katkılı transistörlerin her 18 ayda 2 katına çıkacağını öngörmüştür. LED'ler içinde lümen çıkış gücünü temel alan Haitz Yasası bulunmaktadır ve Haitz bu yasasında her 18 ayda LED ışık çıkış

gücünün ikiye katlanacağını öngörmüştür. Araştırma ve geliştirme çalışmalarında, LED'ler için verimlilik, enerji tasarrufu ve düşük üretim maliyeti hedeflendiğinden dolayı, LED teknolojilerinde bu eğilim sağlanmıştır.

1907'de elektrik mühendisi Henry J. Round, bir aküye bağlı iki tel ile silikon karbür kristaline dokunmuş ve sarımsı bir ışıkla karşılaştığını not etmiştir. Bu şekilde katı-hal ısınması fark edilmiş ve durum raporlara “ilginç bir olay” başlığı ile geçmiştir. Bu ilginç olayın ardından Round, Birinci Dünya Savaşı sırasında İngiliz donanmalarına yüzbaşı olarak atanmıştır. Bilimsel çalışmalarındaki bilgi birikiminden istihbarat birimi faydalanmaya başlamış ancak LED ışıkları üzerindeki çalışmaları yarım kalmıştır. 13 yıl sonra Rus araştırmacı Oleg Losev, diyotların yaydığı ışığı fark edene dek bu olay unutulmuştur. Losev, çalışmalarına İkinci Dünya Savaşı sırasında başlamıştır ve bu keşfinin üzerinde çok fazla araştırma yapma fırsatı bulamadan henüz 39 yaşında, Leningrad Kuşatması'nda hayatını kaybetmiştir.

LED ışıklarının hayatımıza girişi böylece biraz daha gecikmiştir. İkinci Dünya Savaşı'nı takip eden süreç içinde LED ışıkları yeniden gündeme gelmiş ve gelişmeler yaşanmaya başlamıştır. 1955 yılında Rubin Braunstein, yaptığı çalışmalar sonucunda galyum arsenik alaşımların kızılötesi ışık yaydığını keşfederek bu durumu raporlamıştır. Onun elde ettiği sonuçlar üzerinde çalışan Gary Pittman ve Bob Biard, 1961 yılında arsenik alaşıma elektrik uygulayarak kızılötesi ışımayı elde etmiş ve kızılötesi LED için patent almıştır. Pittman ve Biard'ın kızılötesi LED patenti almasından bir yıl sonra, General Electric Company çalışanı Nick Holonyak, ilk görünür ışıklı LED'i icat etmiştir.

1994 yılında Shuji Nakamura, Galyum Nitrür kullanarak ultra parlak mavi LED'leri icat etmiş ve hemen sonra, Indium Galyum Nitrür kullanılarak yüksek yoğunluklu mavi ve yeşil LED'ler geliştirilmiştir. Bu ultra parlak mavi LED'ler, aşağıdaki resimde gösterildiği gibi, ticari ve üretim alanlarında yaygın olarak monte edilen uygun maliyetli ve son derece işlevsel beyaz LED ışıkların geliştirilmesi için temel oluşturdu. Bilim adamları, mavi ışık yayan yongayı floresan fosforlarla kaplayarak, diyotun parlak beyaz ışık yaymak için yapılabileceğini keşfetmişlerdir.

2.1.2. LED'lerin Üretimi

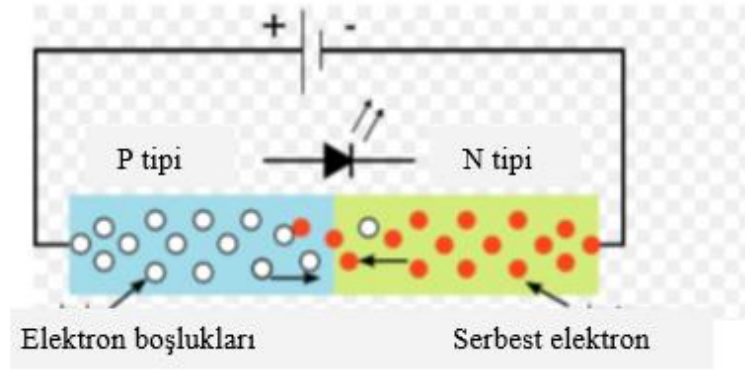
LED'lerin üretimi, gereksinimleri açısından oldukça hassas ve proses içeriği olarak da oldukça karmaşık bir konudur. LED üretiminin birinci aşaması yarı iletken üretimidir. Buna “yarı iletken wafer” denilir. İlk olarak yarı iletken malzeme, yüksek sıcaklıkta ve yüksek basınç odasında "yetiştirilir". Galyum, arsenik ve/veya fosfor gibi elementler saflaştırılır ve haznede birlikte karıştırılır; bu daha sonra, yoğunlaştırılmış bir çözeltiye sıvılaştırılır.

Elementler karıştırıldıktan sonra çözeltiye bir çubuk yerleştirilir ve yavaşça çekilir. Çözelti çekilirken çubuğun ucunda kristalleşir. Uzun ve silindirik bir kristal külçe oluşturur. Bu malzeme daha sonra yarı iletken yonga plakalarına dilimlenir ve yüzey pürüzsüz olana kadar bir masayı zımparalayacağınız gibi esasen zımparalanır. Daha sonra, herhangi bir kir, toz veya organik malzemeden kurtulmak, detaylı ve etkili bir temizlik için çeşitli çözücüler çözeltisine daldırılır.

İşlemin bir sonraki adımında, levhaya ilave yarı iletken malzeme katmanları eklenir. Bu, safsızlıklar veya katkı maddeleri eklemenin bir yoludur. Daha sonra, yarı iletken üzerinde metal kontaklar tanımlanır. Bu tasarım aşamasında belirlenir ve diyotun ayrı ayrı mı yoksa diğer LED çekirdekleriyle mi kullanılacağı kararlaştırılır. Son olarak, diyotlar uygun pakete monte edilir, teller bağlanır ve sonrasında üzerleri plastikte kaplanır.

2.2. LED'lerin Yapısı ve Çalışma Prensibi

Yarı iletkenlerle verimli bir şekilde ışık üretmek için p-n jonksiyonlu diyot imal edilmektedir. Bu şekilde elektronlar kolay bir şekilde uyarılarak verimli bir şekilde ışık üretilebilir.



Şekil 2.1. LED'in ışık üretme mekanizması (Anonim)

Elektriksel gerilim farklılığı, P-Katkılı malzeme tarafındaki düşük enerjili elektron boşluklarına (electron holes) N-Katkılı malzeme tarafındaki yüksek enerjili elektronların yerleşmesi ve elektronların yüksek enerjili konumdan düşük enerjili konuma ulaşmalarına neden olmaktadır. Bu oluşan durumun yarattığı enerji farklılığı foton olarak dışarı salıverilmektedir (Schäfer 2012).

İleri gerilim uygulaması (Forward Voltage Operation) Şekil 2.1'de görüldüğü gibi N katkılı malzeme üzerindeki yüksek enerjili fazlalık elektronların P katkılı malzeme üzerindeki elektron boşluklarına yerleşmesi ve düşük enerjili konuma ulaşarak ışık vermeye başlaması için gereklidir. Pozitif ve negatif yüklü kutuplara uygulanan potansiyel farkın belirli bir değerin altında olmaması gerekir. Aksi durumunda elektronların iletim bandından birleşme bandına geçişini sağlayamayacağından dolayı ışık oluşturamazlar. Elektron hareketlerinin devamlılığının olması ve başlaması için uygulanan elektriksel gerilim farkının diyotun İleri sınır değerinin üzerinde olması gerekir. İletim ve birleşim bandlarındaki bu eşik enerji seviyeleri yarı iletken malzemeler yapılan katkılarla ayarlanabilmektedir. P-N jonksiyon uygulanabilen çeşitli yarı iletken malzeme ikililerinin bir araya getirilmesiyle farklı bant eşik enerji değerleri oluşur ve bu şekilde LED'den çıkan ışığın rengi değiştirilebilir.

Kafes yapısındaki atomlar da titreştirerek enerjinin bir kısmının ısıya dönüşmesine neden olur. Hareket eden elektronlar ise elektron boşluklarına yerleşerek fotonları oluşturur.

Isıya dönüşen enerjinin artışı, LED'in dışarıya verdiği ışık şiddetinde düşüğe sebep olur. Bu da verimin düşmesi demektir.

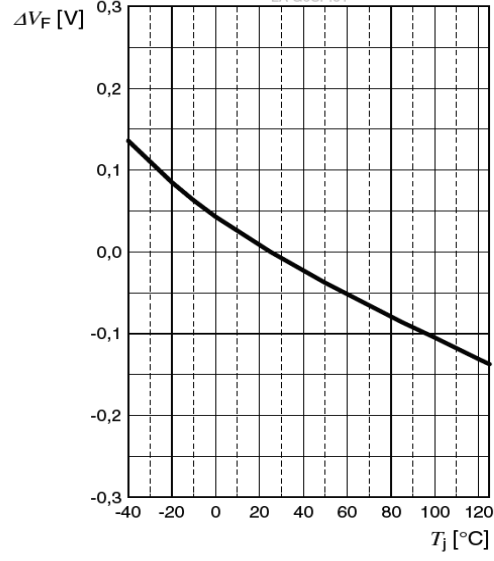
2.3. LED'lerin Elektriksel Davranışı

LED'lerin ışık çıkışı kontrolü, akım ile sağlanır. LED'lerin ışık verebilmesi için bir gerilim kaynağına bağlanması gerekir. Gerilim kaynağının doğrudan bağlanması LED'e zarar verebilir. Böyle durumlarda akımı kontrol edebilmek için sürücü kartlarının tasarlanması gerekmektedir. LED'in üzerinden akan akım LED'in ışık çıkış gücünü etkilemektedir. LED'in üzerinden geçen akımın hızlı şekilde artması (ki bu da gerilimle doğru orantılıdır) ışık çıkışının ani şekilde değişmesine sebep olmaktadır. LED üzerindeki sıcaklığın artması, ileri sürme gerilimini düşürmektedir. Dolaylı olarak bu durum, akımın değişmesine sebebiyet vermektedir.

LED'lerin çekirdek sıcaklığı artışı ile elektronların etrafında bulunan boşlukları doğru hareket etmesi doğru orantılıdır. Yani elektronların iletim bandından (conduction band) birleşme bandına (valance band) geçişi çok daha kolaydır. Çevresel koşulların ve LED üzerinden akan akımın LED'lerin eşik gerilimlerinin değişmesinin neden olur.

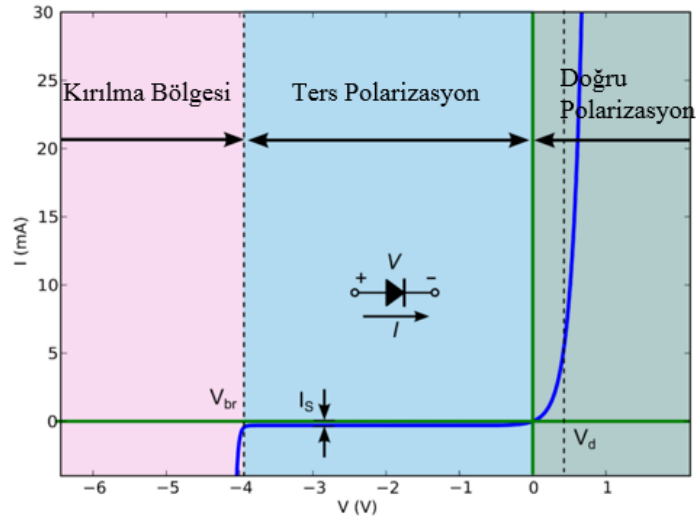
LED voltajının değişimi ile sıcaklık değişimi arasında doğrusal bir oran mevcuttur. Bu orana sıcaklık katsayısı (Temperature Coefficient) denmektedir. Sıcaklık artışı voltajın azalmasına sebebiyet verdiği için katsayı negatiftir. Sıcaklık katsayısı G ile gösterilmiştir. Sıcaklık katsayısı karakteristik özelliği üretilen LED'lerin bilgilerini içeren teknik dokümanlarda mevcuttur.

Şekil 2.2'de Osram LA_G6SP LED'inin ileri voltaj – sıcaklık grafiği gösterilmiştir.



Şekil 2.2. İleri voltaj - sıcaklık grafiği

LED'lere uygulanan potansiyel fark ters yönlü olursa (ters polarizasyon durumu) LED'lerin ters eşik gerilim değeri aşılmaya kadar çok az akım oluşur. Sızıntı akımı olarak ifade edilen bu durumda herhangi bir ışık oluşumu gerçekleşmez. Uygunlanan ters gerilim sınır değeri aştığında ise akım değeri çok hızlı bir şekilde artmaktadır. Otomotiv ve diğer uygulamalarda da kullanılan LED'lerin çoğu ters gerilimlemeye karşı koruma elemanı içermektedir. Şekil 2.3'de ters polarizasyon - akım grafiği verilmiştir.



Şekil 2.3. Ters polarizasyon - akım grafiği

2.4. LED'lerin Termal Davranışı

LED'lerin sıcaklık değişiminden etkilenmesinin sebebi, ışık üreten çiplerin yarı iletken çiftlerden oluşmasından dolayıdır. Termal enerjinin artması ve dolayısıyla çip sıcaklığının yükselmesi, iletim bandından birleşme bandına geçen elektronların transferinin daha kolay bir şekilde yapılmasına neden olacaktır. Bu sebepten dolayı çip sıcaklığının 100 °C artması, tüm değişkenlerin sabit olduğu senaryo altında LED çipi üzerinde oluşan gerilim farkının yaklaşık olarak 0,2 V - 0,3 V azalmasına neden olacaktır. Bu durum, bize LED çekirdeğinde harcanan elektriksel gücün artan sıcaklık ile azaldığını göstermektedir.

Otomotiv endüstrisinde sıklıkla kırmızı, beyaz, turuncu ve sarı renklerde ışık yayan LED'ler kullanılmaktadır. LED'lerin çalışma performansları sıcaklığa göre değişkenlik gösterdiğinden tasarım öncesinde LED kısıtları (T_j , I_{max} vs) mutlaka kontrol edilmelidir. Ulusal ve uluslararası optik regülasyonlar gereği LED'in çalışma anında verimliliğinin ne derecede azalacağı, ışık dalga boylarında oluşabilecek olan kaymalar benzetim programları ve prototiplerle kontrol edilmelidir. LED'lerin termal olarak davranışlarının incelenmesinin yanında optik davranışlarının da gözlenmesi gerekmektedir. Bu durumun göz ardı edilmesi tasarımı yapılan parçanın ulusal ve uluslararası optik regülasyonlara uymamasıyla sonuçlanabilmektedir (Schäfer 2012).

DRL (gündüz farı, diğer bir deyişle Daytime Running Light) ve Tail Light (pozisyon lambası) fonksiyonları gereği, aydınlatma süreleri diğer aydınlatma ünitelerine göre daha uzun süreli çalışmaktadır. Bu sebepten dolayı LED'lerin çalışma koşulları ve çekirdek sıcaklıklarının, üreticinin yayınladığı teknik bilgi sayfalarında belirtilen değerlerin üzerinde olmamasına dikkat edilmelidir. DRL ve Tail Light aydınlatma ürünlerinin de uyması gereken optik regülasyonlar ve kısıtlar bulunduğu için tasarım aşamasında, LED çekirdek sıcaklığının ulaşabileceği en yüksek değerler ve ışık çıkış gücü, prototipler ve bilgisayar programları ile kontrol edilmelidir. Beyaz ve mavi ışık oluşturan In-Ga-N katkılı LED'ler ile geliştirilen aydınlatma sistemleri, çoğunlukla LED çip çekirdeklerinin zarar görmesinin önüne geçmek ve LED kullanım ömürlerini artırmak amacıyla tasarlanmaktadır. Aydınlatma elemanının işlevselliğinin yeteri düzeyde olması için bu uygulamalar oldukça önem taşımaktadır (Schäfer 2012).

2.5. LED'lerin Verimliliğinin Sıcak Işık Kaynakları ile Kıyaslanması

Işık kaynaklarını, 2 ana kategoride sınıflandırabiliriz. Akkor ampuller, halojen lambalar sıcak ışık kaynaklarına örnek olarak verilebilir. Sıcak ışık kaynaklarında ışığı oluşturan ana etmen ısıdır. Bu nedenden dolayı ışık çıkış gücünü artırmak için daha fazla ısıya ihtiyaç duyulmaktadır. Tüm bu sebeplerden dolayı sıcak ışık kaynakları oldukça verimsizdir. Işık verimliliği yaklaşık olarak % 5'tir. Geri kalan % 95, ısı olarak ortama yayılmaktadır. Soğuk ışık kaynakları yani LED'lerin çalışma prensipleri sıcak ışık kaynaklarına göre oldukça farklıdır. Işık çıkış gücü LED üzerinden geçen akım ile doğru orantılıdır ve verimi sıcak ışık kaynaklarına kıyasla oldukça fazladır. LED'ler için ışık verimliliği yaklaşık olarak % 20'dir. Bu değer ortalama bir değer olmakla beraber LED'in katkılандığı malzemeye, katkılama oranına ve bacak tiplerine göre bu değişebilmektedir. Işık verimliliği (luminous efficiency) birimi Lm/W'tır ve ortaya çıkan ışığın, harcanan güce oranını göstermektedir.

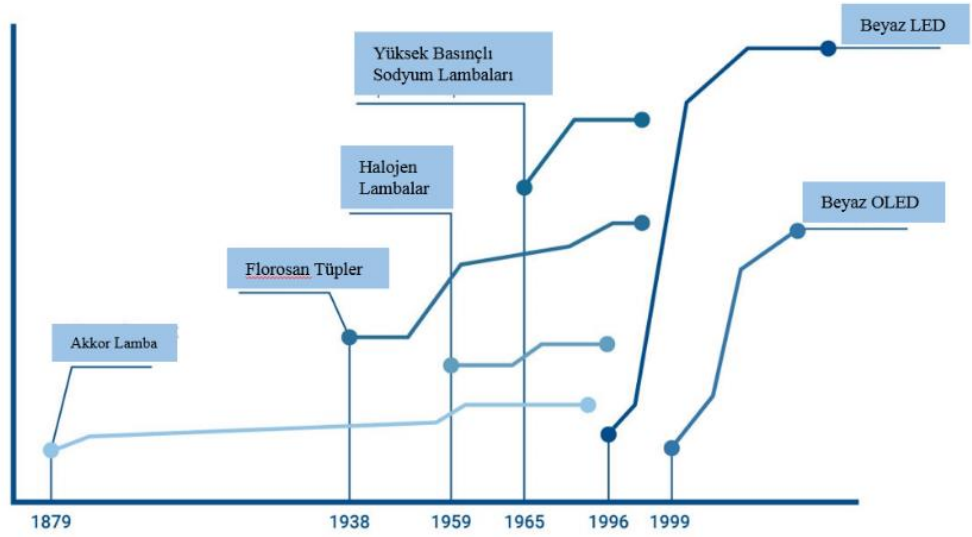
Ayrıca halojen ampuller 25 Lm/W, HID ampuller 90 Lm/W ve LED'ler genellikle 65-100 Lm/W ışık etkenliği değerlerine sahiptir ve bu değer tasarıma bağlı olarak değişim göstermektedir. LED'lerin ışık etkenliğinin artırılması açısından halen mevcut potansiyelleri olmasına karşın, sözü edilen diğer ışık kaynaklarının çoğunun ışık etkenliğinin artırılması açısından potansiyelleri tükenme seviyesindedir (Fratty ve ark. 2012).

2.6. LED'lerin Dalga Boyu Kayması ve Çalışma Ömrü

Aydınlatma elemanlarının karmaşıklığının artması ve maliyetli bir yapıya dönüşmesi, sağlamlık ve kullanım ömrünü, dolayısıyla değişim ve tamir ile ilgili maliyetleri müşteri için daha önemli hale getirmiştir. Böyle bir durumda ürün ömrü, gereksinimi, fonksiyonları ve maliyetleri arasında en uygun çözümü bulmak avantajdır. LED'lerin kullanım ömürleri sınırlıdır. Bununla birlikte ışık verimlilikleri de zaman içerisinde azalma göstermektedir. LED ömürleri uygun koşullarda 100 000 saate kadar dayanım gösterirken bu değer, geleneksel aydınlatma elemanı olan sıcak ışık kaynaklarında 2000 saat civarındadır.

Lümen değerleri ve LED ömürleri 1960'lı yıllardan itibaren artış göstermiştir. İlk üretilen LED'lerin çok az ışık üretmesi ve ömürlerinin kısa olmasından dolayı bu dönemlerde otomotiv uygulamalarında kullanılmasının çok olası olmadığı söylenebilir. Ancak 2000'li yıllardan sonra LED ömürlerinde ve ışık gücü değerlerindeki artış, yani LED performans değerlerinin günümüzdeki performansını yakalaması, LED'lerin otomotiv uygulamalarında kullanılmasını olanaklı kılmıştır.

Otomotiv aydınlatma elemanlarında kullanılan teknolojiler, kronolojik olarak Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2.4. Aydınlatma teknolojisinin gelişimi

2.7. Otomotiv Aydınlatma Birimlerinde LED'lerin Kullanımı

Ön aydınlatma ve arka aydınlatma ürünlerinin geliştirilmesinde LED'lerin kullanılmaya başlanması, araç stillerinde de değişime yol açmıştır. Otomotiv aydınlatma elemanlarında LED'li sistemlerin kullanılması, araca ait karmaşık tasarımlara imkân sağlamıştır. Bunun yanında LED'lerin boyutsal farklılıkları, ampullere göre LED'leri daha çok tercih edilir konuma getirmiştir.

LED verimliliği, ampullere göre oldukça yüksektir. Örneğin ampullü uygulamaların güç tüketimi 15 W – 21 W gibi değerlerde seyrederken aynı fonksiyonu, LED'ler, regülasyonları da sağlayarak çok daha düşük güçlerde elde edebilir. LED'lerin tepki süresinin ampullerden daha hızlı olmasından dolayı, otomotiv üreticileri güvenlik açısından, özellikle arka aydınlatma birimlerinde sinyalizasyon amaçlı LED'li çözümlere başvurmaktadır. LED'ler bir kaç ms içerisinde regülasyon gereksinimini karşılayacak ışık şiddetine ulaşırken aynı durum akkor ve halojen ampullerde 300 ms - 350 ms civarındadır. Bu nedenle trafikte seyir halinde iken yüksek hızlarda kullanım durumunda 300 ms tepki süresi etkili fren mesafelerinin oluşumunda riskli durumlara sebep olabilmektedir.

Bu nedenle günümüzde otomotiv üreticisi firmalar arka aydınlatma sistemlerinde LED'li ürünleri tercih etmektedirler. Buna bağlı olarak sürücü güvenliği açısından LED'li sistemlerin geleneksel ampullü sistemlere oranla daha üstün olduğu söylenebilir. Şekil 2.5'de LED'li stop lambası örneği paylaşılmıştır.



Şekil 2.5. LED'li stop lambası örneği

3. MATERYAL VE YÖNTEM

3.1. Tezin Amacı

Bu tezin amacı, otomotiv sektöründe kullanılan LED’li aydınlatma sistemlerinde en önemli sınırlayıcı olan sıcaklığın ve buna bağlı olarak ele alınabilecek verimlilik kavramının etkileri üzerinde durmaktadır. Bu kapsamda bakır alanların genişliğinin termal performansa etkisi, Via’ların termal performansa etkisi ve topolojilerin verimliliği incelenmiştir. Tasarım aşamasında en uygun topolojinin seçilmesi ve PCB’nin tasarım aşamasında yapılacak uygulamaların termal performansı iyileştirebileceği gösterilmiştir.

Topolojilerinin verimliliği bölümünde, aynı PCB genişliğine ve eşit bakır alanlara sahip 3 farklı senaryo oluşturulmuştur. Bu üç farklı senaryo üzerinde LED’lerin jonksiyon sıcaklıklarının analizleri yapılmıştır ve topolojilerin sahip olduğu verimliliğin LED jonksiyon sıcaklığına etkisi gösterilmiştir. Verimlilik etkisinin gösterimi için FloEFD analiz programı kullanılmıştır.

Bakır alanların genişliği ve bu genişliğe göre seçilen kritik komponent olarak seçilen transistörün R_{th} (ısı direnç) değişimine ilişkin analiz ve ölçümlerle elde edilen sonuçlar karşılaştırılmıştır. Alan genişliğinin R_{th} değişimine etkisi, elde edilen sonuçlar kullanılarak denklem formuna dönüştürülmüştür.

Termal Via’ların PCB üzerindeki sıcaklığa etkisi ve seçilen kritik komponent olan transistörün jonksiyon sıcaklığına etkisi analizler ve ölçümlerle elde edilen sonuçlar üzerinden karşılaştırılmıştır. Alan genişliğinin R_{th} değişimine etkisi, elde edilen sonuçlar yardımıyla matematiksel olarak analiz edilmiş ve ilgili bağıntılar türetilmiştir.

Tartışma ve sonuç kısmında hesaplama yoluyla elde edilen R_{th} değerleri ile değişken değerleri girilmek suretiyle termal direnç değerleri hesaplanmış ve ölçüm sonuçlarıyla aralarındaki farklar belirlenmiştir.

Otomobil aydınlatma sistemlerinin sürekli bir gelişim göstermesi otomotiv aydınlatma elemanlarında yeni teknolojilerin kullanılmasının önünü açmış ve LED'li aydınlatma sistemleri, geleneksel ampuller ve halojen ampullerin yerini almaya başlamıştır. LED'lerin tepki süresinin ampullerle kıyaslandığında daha kısa olması, halojen ve geleneksel ampullere göre LED ömürlerinin daha uzun olması ve enerji sarfiyatının az olması gibi artı özellikleri, LED sistemlerinin kullanılmasındaki başlıca nedenlerdendir.

Otomotiv sektöründe garanti süresi ve güvenlik gereksinimleri gün geçtikçe artmaktadır. Üretilen aydınlatma parçasının seri üretim fazı öncesinde tabii olduğu testlere girmesi ve ve bu testleri başarıyla geçmesi gerekmektedir. Bu testler boyunca ürün üzerinde herhangi bir fonksiyon kaybı, ışık zayıflaması ya da renk kayması gibi durumlar kabul edilmemektedir.

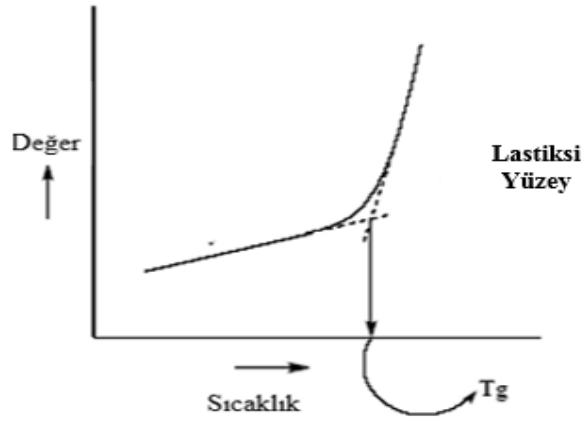
Çalışma ömürlerinin ampüllere oranla çok daha fazla olmasından dolayı, otomotiv üreticileri aydınlatma uygulamalarında LED'li ürünlere yönelmiştir. Tasarım ve ömür süresi olarak avantajlı konuma geçen LED'li sistemlerin en büyük dezavantajlarından biri üzerindeki enerjinin çok büyük bir kısmının (yaklaşık % 80 - 85) ısıya dönüşmesi ve buna bağlı olarak da LED ömrünün ve ışık şiddetinin azalmasıdır.

Otomotiv aydınlatma ürünlerinde kullanılan LED ve diğer komponentlerin üzerinde oluşabilecek ısı problemleri çözmeye uygun PCB tasarımı yapmak için gerekli olan tüm detaylar bu tezin içerisinde verilmiştir. Çeşitli yöntemler kullanarak aydınlatma elemanları üzerindeki ısı performans iyileştirilebilir. Bu metodlar şu şekildedir; termal Via'lar, soğutma amaçlı bırakılan bakır alanlar, PCB metaryelinde ısı iletkenliği daha yüksek olan bir malzemenin seçilmesi, sürücü topolojilerinin verimlilik durumu göz önünde bulundurularak uygulamaya dahil edilmesi ve zorlanmış taşınım metotları örnek verilebilir.

LED'lerin üzerinde oluşacak ısının LED bilgi sayfalarında belirtilen değerin üzerinde ve güvenlik marjının içinde olması durumunda tasarım, yeniden gözden geçirilmeli ve bu durumu iyileştirici çözümler bulunmalıdır. Özellikle yan sinyal ve ön sis uygulamalarında müsaade edilen dalga boyu kayma miktarı çok geniş değildir. Bu nedenden dolayı, LED

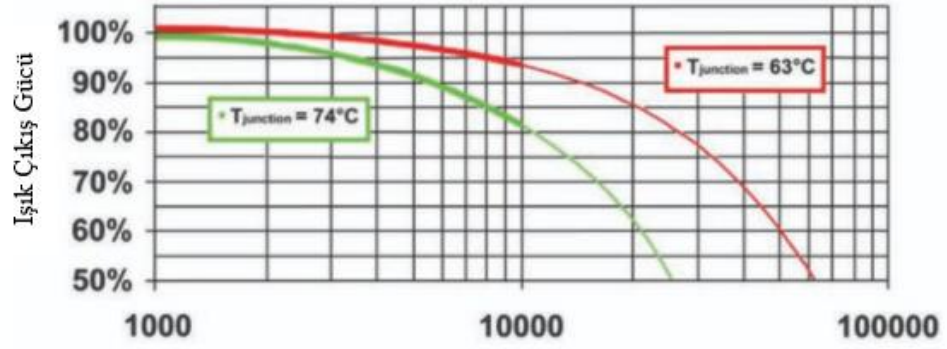
ipinin sıcaklığı yan sinyal ve n sis uygulamalarında ekstra önem kazanmaktadır. Aksi durumda izin verilen regülasyon aralığının dışına çıkılacağı için bu durumun mutlaka göz önünde bulundurulması gerekmektedir.

Camsı geçiŐ sıcaklığı davranışı, LED’li aydınlatma sistemleri üzerindeki sıcaklığın neden kontrol edilmesi gerektiğinin bir diğer sebebidir. Sistemin sıcaklığının artması, LED’in üzerindeki epoksi tabakanın erimesine ve ışık geçirgenliğinin değişmesine sebep olmaktadır. Bu ve yukarıda bahsedilen nedenler, PCB’nin ve diğer komponentlerin üzerindeki sıcaklığın atılmasının elzem olduğu gerçeğini ortaya koymaktadır. Şekil 3.1’de sıcaklığın lastiksi yüzeyde geçiŐ etkisi grafiği gösterilmektedir.



Şekil 3.1. Camsı sıcaklık grafiği

LED zerindeki jonksiyon sıcaklığının çalışma süresine etkisi Şekil 3.2’de verilmiştir. Jonksiyon sıcaklığı, 63 C’de % 80 seviyelerine 20 000 saatte düŐerken, 74 C’de bu değer 10 000 saattir. Toplam alıŐma süresi göz önünde bulundurulduğunda ise jonksiyon sıcaklığı, 63 C’de 60 000 saat, 74 C’de ise yaklaşık olarak 25 000 saattir.



Şekil 3.2. Işık çıkış gücü ve LED ömrünün sıcaklığa göre değişimi

3.2. Otomotiv Aydınlatma Birimlerinde Kullanılan Topolojiler

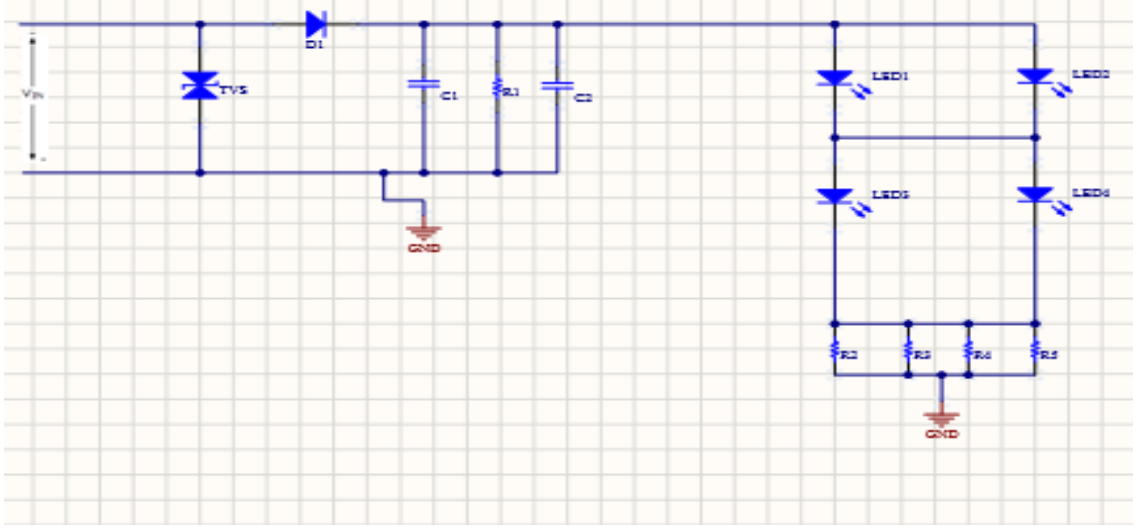
Işık yayan diyotlar yani LED'ler, p-n jonksiyonuna sahip yarıiletkenlerdir. LED'e uygulanan gerilim ileri gerilim (forward voltage) eşliğini aştığında, N katkılı malzeme üzerindeki yüksek enerjili fazlalık elektronları, P katkılı malzeme üzerindeki elektron boşluklarına yerleşerek düşük enerjili konuma ulaşmakta ve ışık fotonları yaymaya başlamaktadır. Sınırlandırılması gereken LED'in ileri yön akımı, LED'in yaymış olduğu ışığın parlaklığını belirlemektedir. Yani, akım arttıkça, ışık parlaklığı artmaktadır.

Akım sınırlama ve ayarlama genel olarak aşağıdaki yöntemlerle yapılmaktadır:

1. Resistif yapılar (Direnç ile)
2. Lineer Yapılar (Transistör v.b. ayırık yapılarla)
3. DC/DC Yapılar

3.2.1. Resistif Yapılar

Akımı sınırlamak için kullanılan bu yapılar, temel olarak Şekil 3.3'de gösterildiği gibi verilmektedir.



Şekil 3.3. Resistif yapı örneği

Otomotiv uygulamalarında LED akımı, en zor koşullar göz önünde bulundurularak hesaplanmaktadır. Eşitlik 3.1’de, LED akımı ifade edilmektedir.

$$I = \frac{V_{Battery} - V_f(LED) \times (\text{Bir koldaki LED Sayısı})}{R} \quad (3.1)$$

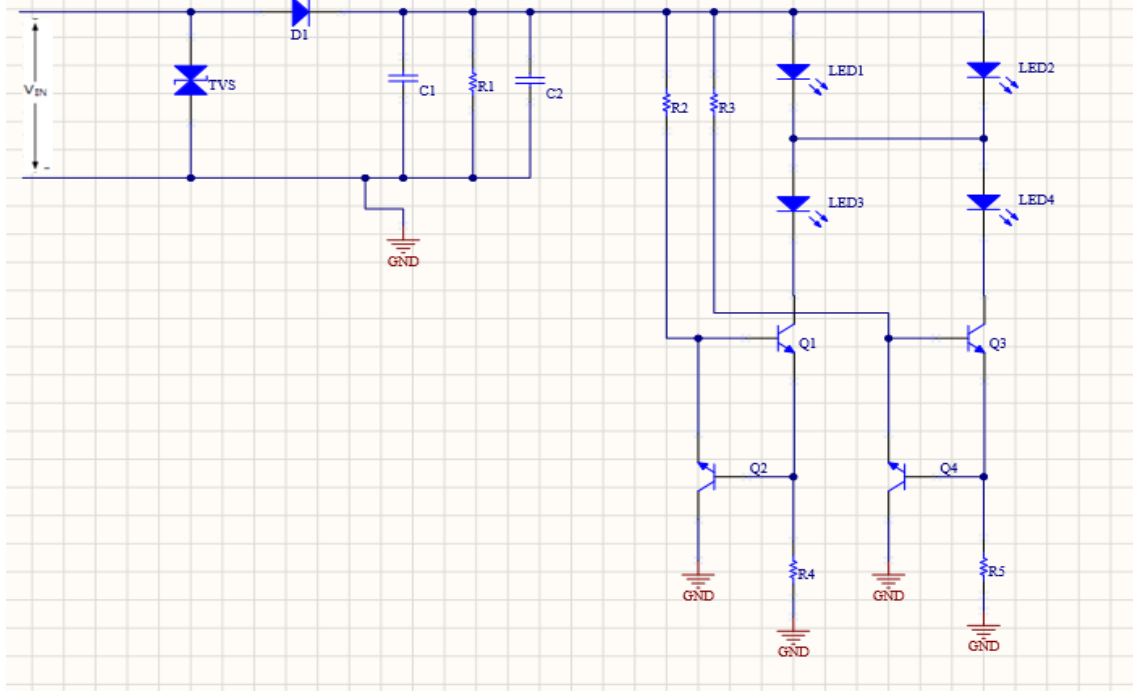
İstenen akımın müşteri beklentileri ve elektronik birimin hangi fonksiyonu kontrol edeceğinin belirlenmesi son derece önemlidir. Müşteri şartnamelerinde belirlenen çalışma koşulları altında LED akımının maksimum değeri kontrol edilmelidir. Tüm bunlara rağmen resistif yapı, LED sürme akımını belirlemek için seçilmiş en basit çözümdür.

Tüm gücün direnç üzerinde harcanması, voltaj dengesizlikleri durumunda yani gerilimin artması vb. durumlarda herhangi bir koruyucu katman olmamasından dolayı LED’in zarar görmesi, herhangi bir sıcaklık kontrolünün olmaması, LED ömrünün kısılması vb. durumlar, bu yapının olumsuz tarafları olarak söylenebilir. Giriş akımı, çıkış akımına eşittir. Sistemin toplam gücü, bu durumda eşitlik 3.2 ile hesaplanmaktadır.

$$P = V \times I \quad (3.2)$$

3.2.2. Lineer Yapılar

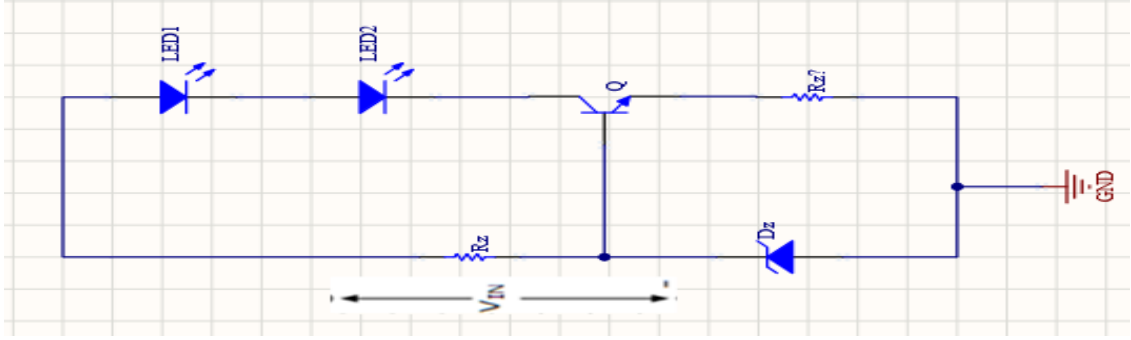
Lineer yapılar sabit akım sağlamaktadır. Otomotiv aydınlatma sistemlerinde sabit akım çok önemli bir yer tutar. LED ömrü ve yasal istemler gibi nedenlerden dolayı akımın mümkün olduğunca teknik bilgi dokümanında belirtilen LED ileri sürme akımını aşmaması beklenir. Şekil 3.4’de transistörlü akım sabitleyici devre şeması verilmektedir.



Şekil 3.4. Lineer yapı örneği

Akımın sabit tutulmasından dolayı oluşacak gerilim dalgalanmalarında LED’ler maksimum akımı aşamaz ve böylece LED ömrü olabildiğince uzun tutulmuş olur. Bunun haricinde LED’ler, yüksek sıcaklıklardan da korunmuş olacağından renk kayması ya da bozulma vb. gibi durumlarla karşılaşmaz. Ancak, komponent sayısındaki artıştan dolayı maliyet göz önünde bulundurulduğunda dezavantajlı bir durum ortaya çıkabilir.

Şekil 3.5’de akım sabitleme devresinin basit gösterimi bulunmaktadır. Zener diyot, transistör ve akımı ayarlamak için kullanılacak direnç ile bu yapı sağlanmıştır. LED akımının nasıl hesaplandığı aşağıda verilmiş olan eşitliklerde ifade edilmektedir.



Şekil 3.5. Zenerli akım sabitleyici

$$R_Z = \frac{V_S - V_Z}{I_Z + I_B} \quad (3.3)$$

$$I_B = \frac{I_C}{h_{fe}} \quad (3.4)$$

$$R_B = \frac{V_S - V_Z}{I_{RB}} \quad (3.5)$$

$$I = \frac{V_S - V_{DZ}}{R} \quad (3.6)$$

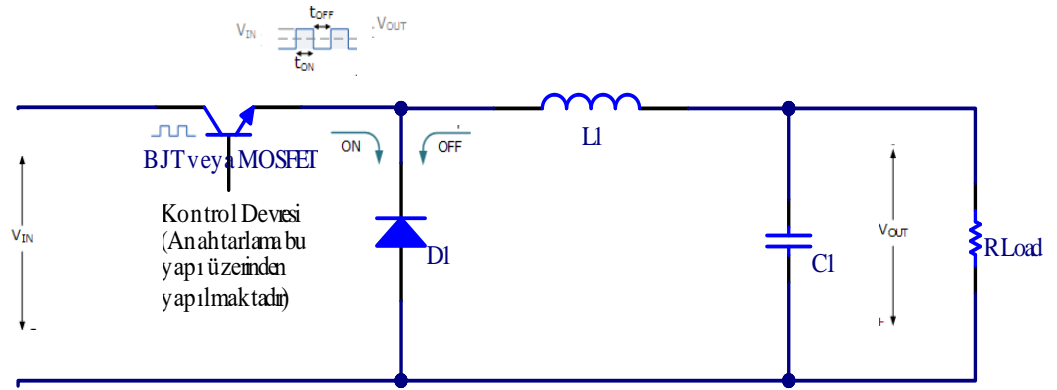
3.2.3. DC/DC Yapılar

Lineer voltaj düzenleyiciler ya da anahtarlama güç kaynakları, akım sabitleyici ayrık devrelere ve resistif devrelere göre daha verimlidir. Anahtarlama durumu, düşük güç gerektiren uygulamalarda transistör kullanılarak, yüksek güç gerektiren uygulamalarda ise MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor) yapıları kullanılarak gerçekleştirilmektedir.

Anahtarlama güç kaynaklarında en önemli nokta bu anahtarlamanın (BJT (Bipolar Junction Transistor) ya da MOSFET olması fark etmez) doyum noktasında gerçekleşmesidir. Böylece verimlilik en üst seviyede sağlanmış olur. DC/DC yapılarda diğer önemli bileşenler ise bobin ve kondansatörlerdir. Anahtarlama esnasında şarj olan kondansatör, anahtar açıldığı anda boşalmaktadır. Aynı şekilde, bobin de anahtarlama esnasında benzer davranış gösterir.

Anahtarlama güç kaynakları temelde 3'e ayrılır. Eğer çıkış gerilimi, giriş geriliminden düşük olacak şekilde davranırsa bu step down yapıları, buck olarak adlandırılır. Çıkış gerilimi giriş geriliminden yüksek olursa bu türden yapılar, boost (step-up) olarak adlandırılmaktadır. Tüm bunların yanında giriş gerilimi ve çıkış gerilimi daha düşük ya da daha yüksek olabilir. Bu tarz yapılar buck – boost yapılar olarak ifade edilmektedir.

Buck yapısı ya da diğer adıyla step down yapılar, en basit biçimde Şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekli 3.6. DC/DC buck yapısı örneği

Bu tarz yapılarda yani buck yapılarında transistör bobine seri olarak bağlanır. TR1 transistörü kontrol devresi tarafından açık konuma getirildiğinde indüktör etrafında bobinin üzerinden akan akım nedeniyle manyetik alan oluşur. Böylece devre üzerindeki kondansatör ve bağlı olan yük, giriş voltajından daha düşük bir seviyeye düşecektir. Özetle, bu yapıyla, anahtarlamanın süreleri ayarlanarak giriş gerilimden daha düşük bir gerilim elde edilmektedir.

Buck dönüştürücüler için aşağıda bazı matematiksel eşitlikler verilmiştir. Bu eşitlikler buck (step - down) yapılarının nasıl çalıştığının anlaşılmasını sağlamaktadır. Çıkış gerilimi, eşitlik 3.7'de gösterilmiş olup görev döngüsü (duty cycle) ise eşitlik 3.8'de belirtilmiştir. Bobin değerinin belirlenmesi ise eşitlik 3.9 ve 3.10'da verilmektedir.

$$V_{out} = \frac{1}{T_{on} + T_{off}} \times V_{in} \quad (3.7)$$

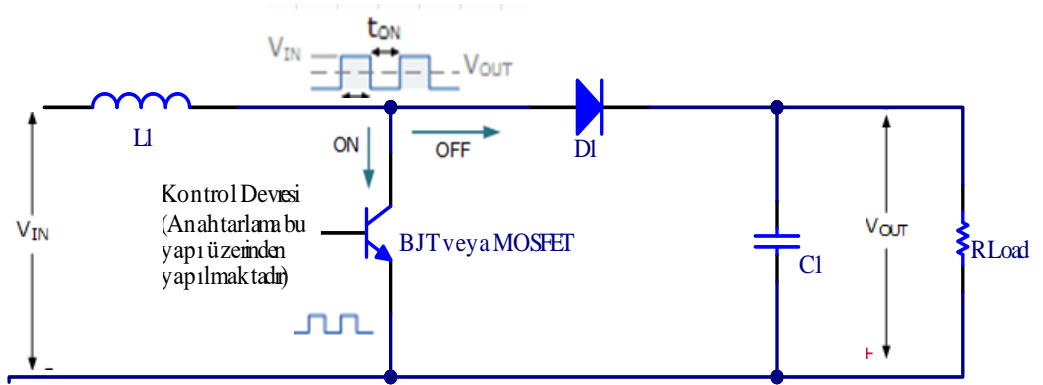
$$D = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} \quad (3.8)$$

$$L = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times \frac{V_{in}-V_{out}}{f_{sw} \times K \times I_{out}} \quad (3.9)$$

$$L = \frac{(1-d)R}{2f} \quad (3.10)$$

$$V_o = V_{in} \times d \quad (3.11)$$

Boost yani, step up dönüştürücüler daha önce de belirtildiği üzere giriş geriliminin çıkış geriliminden daha düşük olduğu senaryolarda kullanılmaktadır. Boost dönüştürücü devresinde, transistör anahtarı tamamen açık olduğunda, kaynaktan gelen elektrik enerjisi, V_{IN} indüktör ve transistör anahtarından geçer ve tekrar beslemeye gelir. Bu arada, D1 diyotu, transistör açıldığında kondansör üzerinde oluşan gerilimin geri gelmesini engelleyerek yük üzerinde boşalmasını sağlar. Diğer taraftan bobin üzerinde oluşan gerilim, giriş voltajının üzerine eklenerek çıkış gerilimi, giriş geriliminin üzerine taşınmış olur. Boost devresi Şekil 3.7’de gösterilmektedir.



Şekil 3.7. DC/DC boost yapısı örneği

Boost dönüştürücüler için aşağıda bazı eşitlikler verilmektedir. Bu eşitlikler, boost (step - up) yapılarının nasıl çalıştığını anlamamız açısından önem arz etmektedir.

Çıkış gerilimi, eşitlik 3.12’de belirtilmiş olup görev döngüsü (duty cycle) ise eşitlik 3.13’de ifade edilmiştir. Bobin değerinin belirlenmesi ise eşitlikler 3.14 ve 3.15’de verilmektedir.

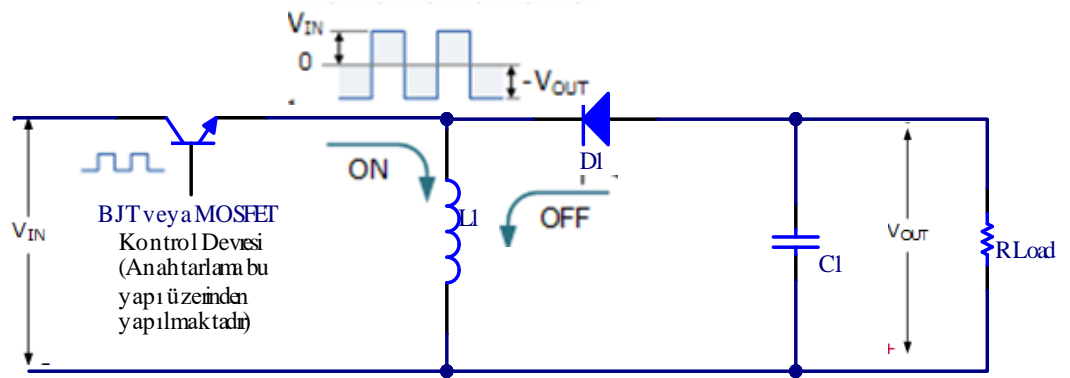
$$V_{out} = V_{in} \frac{1}{1-D} \quad (3.12)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} \quad (3.13)$$

$$L = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times \frac{V_{in}-V_{out}}{f_{sw} \times K \times I_{out}} \quad (3.14)$$

$$L = \frac{(1-d)R}{2f} \quad (3.15)$$

Buck Boost yapılarında ise, giriş gerilimi çıkış geriliminin üzerinde veya altında olabilir. Tasarım yapılırken belirlenen çıkış gerilimi seviyesine göre bobin ve kondansatör değerleri belirlenerek elektrik devresi oluşturulmaktadır. Buck Boost devresi Şekil 3.8’de gösterilmektedir.



Şekil 3.8. DC/DC buck boost yapısı örneği

Transistör anahtarı tamamen açıldığında (kapalı) indüktör üzerindeki gerilim, besleme gerilimine eşittir, böylece indüktör, giriş kaynağından enerji depolamaktadır.

Devre çıkışına bağlı yüke akım iletilmez, çünkü D1 diyotu ters bağlıdır. Transistör anahtarı tamamen kapalıyken (açıkken), diyot öne doğru eğilimli hale gelir ve daha önce

indüktörde depolanan enerji yüke aktarılır. Başka bir ifadeyle, anahtar "açık" olduğunda, enerji DC kaynağı (anahtar yoluyla) tarafından indüktöre iletilir ve çıkışa iletilmez. Anahtar "kapalı" olduğunda ise indüktör üzerindeki gerilim tersine döner ve indüktör bir enerji kaynağı haline gelir, böylece daha önce indüktörde depolanan enerji çıkışa (diyot aracılığıyla) çevrilir ve DC giriş kaynağından doğrudan beslenmez. Dolayısıyla, anahtarlama transistörü "kapalı" olduğunda yük boyunca düşen gerilim, indüktör gerilimine eşit olur.

Sonuç olarak diyebiliriz ki, ters çevrilmiş çıkış gerilim değeri, görev döngüsüne bağlı olarak giriş gerilim değerinden daha büyük veya daha küçük (veya ona eşit) olabilmektedir.

Buck Boost dönüştürücüler için aşağıda bazı matematiksel eşitlikler verilmiştir. Bu eşitlikler, buck - boost (step – up / step down) yapılarının nasıl çalıştığını anlamamız açısından önemlidir.

Çıkış gerilimi eşitlik 3.16’da belirtilmiş olup görev döngüsü (duty cycle) ise eşitlik 3.17’de verilmiştir. Bobin değerinin belirlenmesi ise eşitlikler 3.18 ve 3.19’da ifade edilmektedir. Eşitlik 3.20’de ise çıkış gerilimin giriş gerilimi ile oranı formüle edilmiştir.

$$V_{out} = \frac{1}{T_{on}+T_{off}} \times V_{in} \quad (3.16)$$

$$D = \frac{T_{on}}{T_{on}+T_{off}} \quad (3.17)$$

$$L = \frac{V_{out}}{V_{in}} \times \frac{V_{in}-V_{out}}{f_{sw} \times K \times I_{out}} \quad (3.18)$$

$$L = \frac{(1-d)R}{2f} \quad (3.19)$$

$$V_o = V_{in} \times d \quad (3.20)$$

4. BULGULAR ve SONUÇLAR

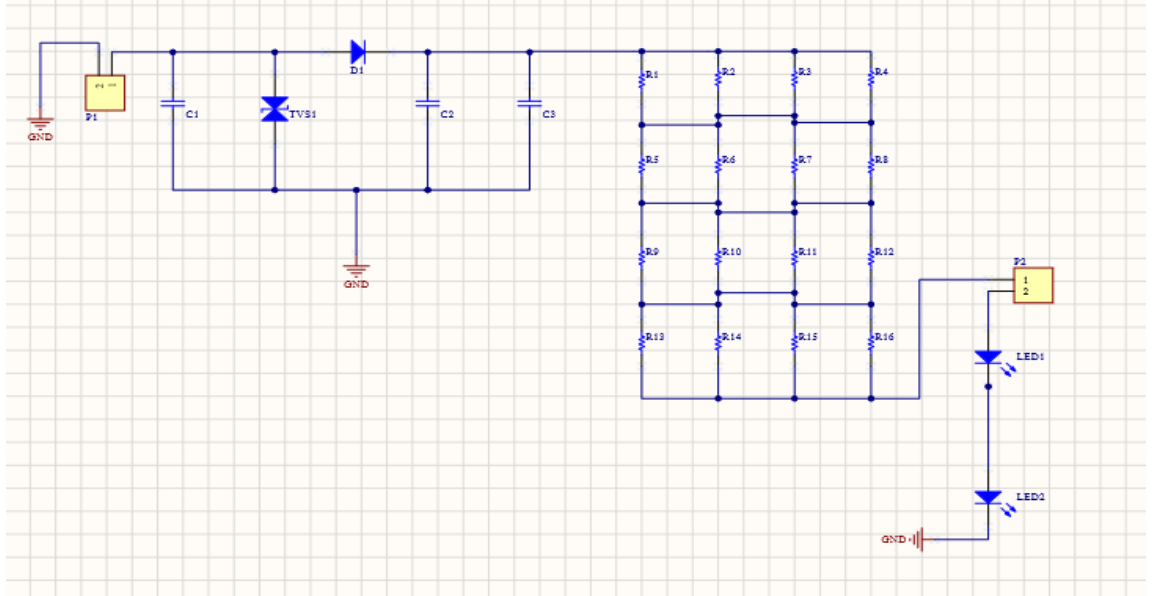
4.1. LED'li Ön Sis Örneğinde Topolojilerin Karşılaştırılması

Sisli havalarda sürücü görüşünü iyileştirmek için ön sis lambaları kullanılır. Stil gereksinimleri gereği, ön sis lambaları küçük hacimlere sahiptirler. Buna ek olarak, ışık gereksinimleri de oldukça yüksektir. Dolayısıyla, ön sis lambalarında ısıl verimlilik oldukça önemli olmaktadır. Bu bölümde topolojilerin verimliliği, ön sis lambası üzerinden gösterilmektedir. Öncelikle, LED'li ön sis aydınlatmasının resistif topolojide incelemesi gerçekleştirilecek ve ardından lineer yapılar üzerinden ısıl dağılım verilerek, buck yapısının verimliliğinin ısı dağılımına etkisi gösterilecektir.

4.1.1. PCB'lerin Hazırlanması

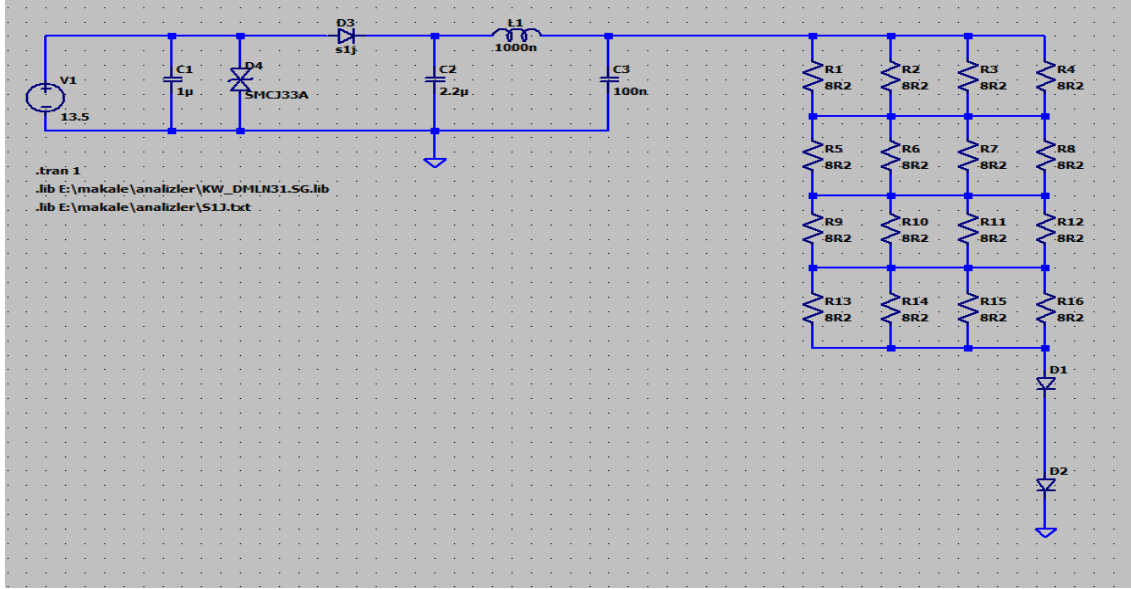
4.1.1.1. Resistif LED'li Ön Sis Lambasının Hazırlanması ve Analizi

Resistif yapıya sahip elektronik devrede, ters polarizasyonu engellemek için diyot, anlık güç dalgalanmasını bastırmak için TVS, gürültüyü filtrelemek için alçak geçiren filtre, akımı ayarlamak ve gücü dağıtmak için dirençler kullanılmıştır. Devrenin şeması Şekil 4.1'de verilmiştir.



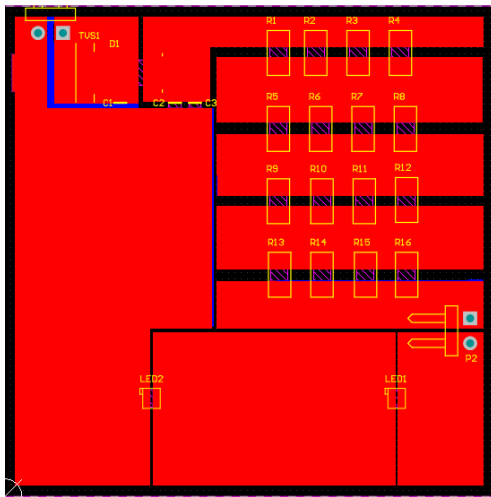
Şekil 4.1. Resistif LED'li ön sis lamba yapısı örneği

Resistif yapıya sahip elektronik devrenin benzetim programı için hazırlanmış devre, Şekil 4.2’de verilmiştir. Benzetim için gerekli olan LED bilgileri üreticisinin sitesinden alınmış ve Spice analizi için standart model seçilmiştir.

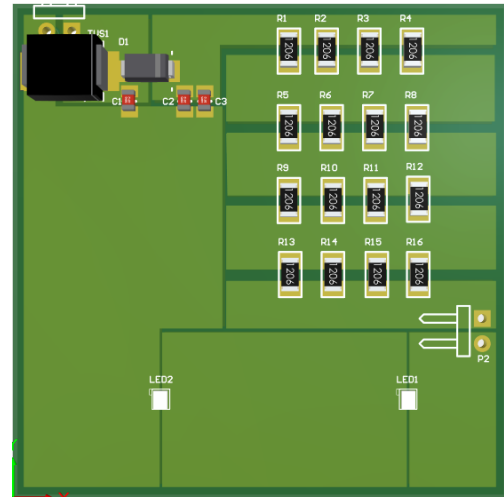


Şekil 4.2. Resistif LED’li ön sis sürme devresi spice çizimi

Hazırlanan resistif topolojiye sahip PCB’lerin çizimi ve bu çizimin 3D görselleştirilmiş hali Şekil 4.3 ve Şekil 4.4’de verilmiştir.



Şekil 4.3. Resistif LED’li ön sis çizimi gösterimi



Şekil 4.4. 3D Resistif LED’li ön sis gösterimi

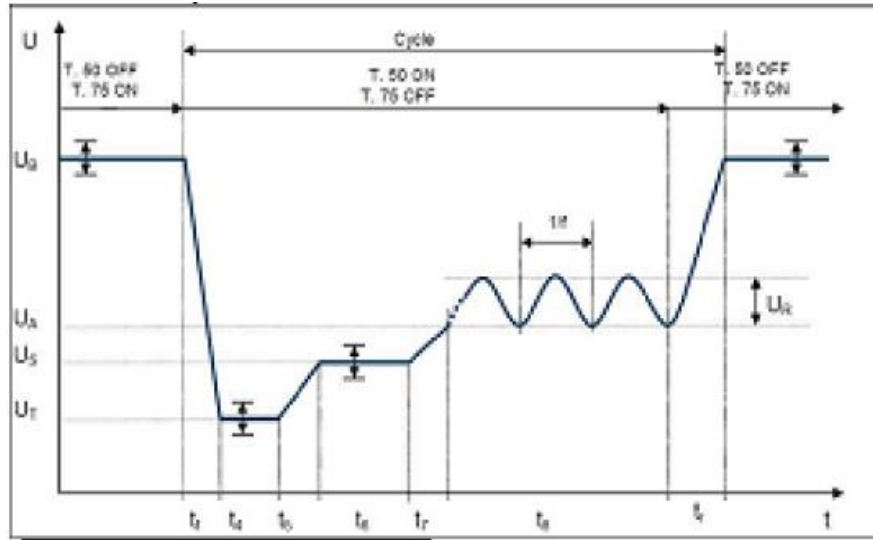
Resistif çözümler birkaç çeşit komponentle basitçe (diğer topolojilere kıyasla) gerçekleştirilebilir. Akım ayarlanmasında direnç kullanıldığı için bu tarz topolojilere resistif topolojiler denir.

Resistif topolojilerde güç, basitçe giriş gerilimi ve giriş akımının çarpımıyla ifade edilir. eşitlik 4.1’de toplam güç ifadesi denklem formunda verilmiştir.

$$\text{Toplam Güç} = \text{Giriş Gerilimi} \times \text{Giriş Akımı} \quad (4.1)$$

Komponent üzerindeki güç dağılımları üzerinden toplam güç hesabı yapmak istendiğinde tüm komponentlerin güç değerlerinin toplamının yapılması gerekmektedir. Üzerinde çalışılan ve bu tez çerisinde paylaşılan Resistif topoloji senaryosunda LED’leri yaklaşık olarak 610 mA ile sürmek için harcanan enerji yaklaşık olarak 8 W’dır.

Topoloji gereği enerjinin dönüşümünden gelen verimlilik haricinde herhangi bir verimden bahsedilemez. LED üreticileri bazı durumlarda ürünle alakalı bilgi sayfalarında verimlilik bilgisini paylaşmaktadır. Bu verimlilik bilgisi ideal durumlar için geçerlidir.



Şekil 4.5. Start Stop çalışma gerilimi grafiği

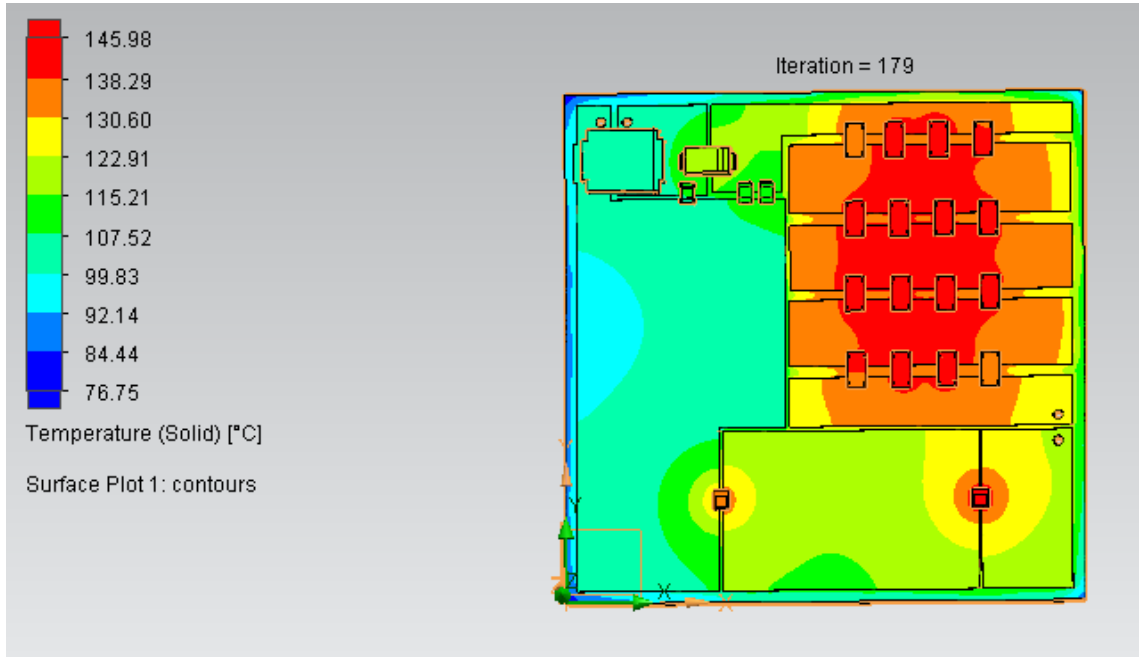
Firma bünyesinde oluşturulan know how verisine göre beyaz ışık veren LED’lerde uygulanan verim maksimum % 20’dir (bilgi sayfalarında paylaşılan değer üreticinin

üretim tekniğine ve LED katkısına göre değişim göstermekle beraber beyaz ışık veren LED’lerde bu değer % 35 - 40 civarındadır).

Tüm bunlara ek olarak otomobil içerisinde kullanılacak olan elektronik birimler, çeşitli çevresel testlere tabi tutulmaktadır. Bu testler esnasında, ya da aracın sahip olduğu donanımsal özelliklerle ilgili olarak (örneğin; start – stop özelliği) fonksiyon kaybı istenmez. Bir aracın start – stop gerilimi grafiği Şekil 4.5’de verilmiştir.

Diğer yandan, uygulanacak olan ISO16750 ya da ISO7637 standartlarında bulunan çevresel testler için de istenmeyen durumlar meydana gelebilir. Bu nedenle, tasarım öncesi tüm kısıtların doğru anlaşıldığından emin olunmalıdır.

Analiz sonuçlarına göre oluşturulan termal harita Şekil 4.6’de verilmiştir. Buna göre analizi gerçekleştirilen senaryodaki LED sıcaklığı 140 °C’dir.



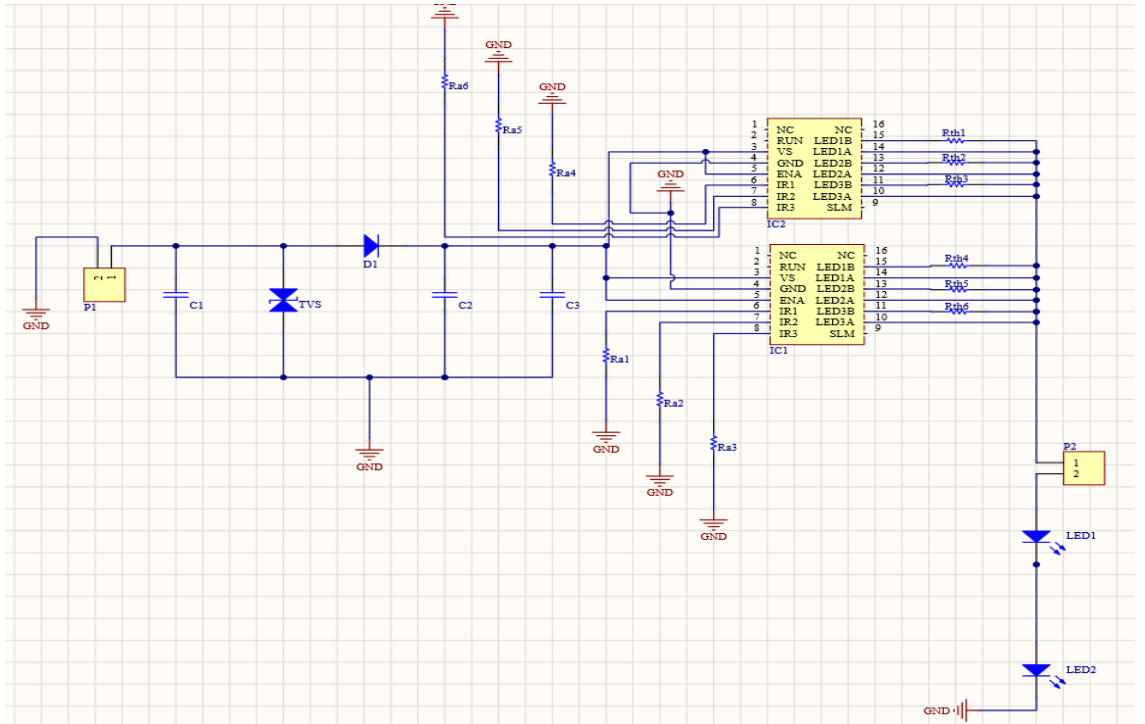
Şekil 4.6. Resistif LED’li ön sis lambasının analiz sonucu oluşan termal harita

4.1.1.2. Lineer LED'li Ön Sis Lambasının Hazırlanması ve Analizi

Lineer yapıya sahip elektronik devrede, ters polarizasyonu engellemek için diyot, anlık güç dalgalanmasını bastırmak için TVS, gürültüyü filtrelemek için alçak geçiren filtre, akımı ayarlamak entegre devre ve buna bağlı olarak entegre üzerindeki ısıyı alan termal dirençler ve akımı ayarlayan dirençler kullanılmıştır.

Ek olarak, kullanılan Elmos LED sürme entegre devresinde aşırı ısıya karşı koruyucu yapılar bulunmaktadır. Bu yapılar sayesinde sürücünün dışına eklenen dirençler vasıtasıyla sürücü entegresinin içerisindeki güç alınarak PCB üzerindeki dirençlere aktarılmaktadır. Böylece, sürücü üzerine düşen güç arttıkça akımın sınırlanması engellenmiş olur ve böylece çevresel komponentlerin oluşturduğu ısıdan dolayı LED üzerindeki ışık akısının azalması engellenmiş olur.

Devrenin şeması Şekil 4.7'de verilmiştir.

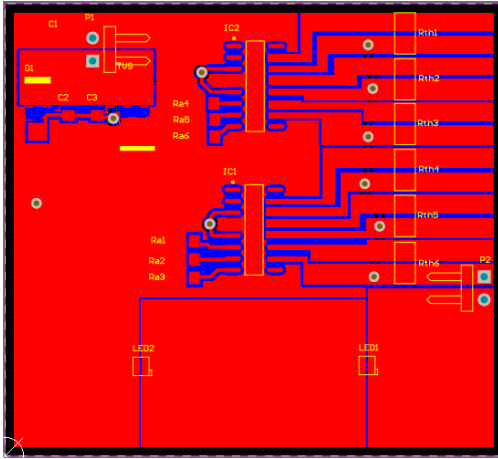


Şekil 4.7. Lineer yapı devre şeması

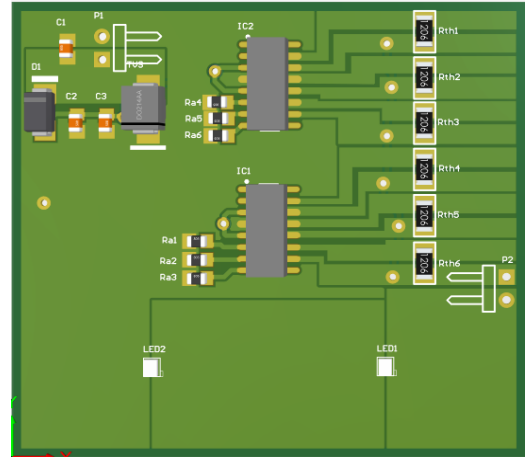
Lineer çözümler resistif topolojiye göre görece daha karmaşıktır ve komponent çeşitliliği daha fazladır. Lineer çözümlerin resistif çözümlere göre üstünlüğü, akımın herhangi bir giriş gerilimi karşısında çıkış akımının sabit olmasıdır. Ayar dirençleri vasıtasıyla çıkış akımını ayarlanır.

Lineer topolojide LED'leri yaklaşık olarak 610 mA ile sürmek için harcanan enerji yaklaşık olarak 6,6 W'dır.

Hazırlanan lineer topolojiye sahip PCB'lerin layoutu ve bu çizimin 3D görselleştirilmiş hali Şekil 4.8 ve Şekil 4.9'da verilmiştir.



Şekil 4.8. Lineer LED'li ön sis lambasının PCB çizimi



Şekil 4.9. 3D Lineer LED'li ön sis PCB

Topoloji gereği lineer ve resistif yapılarda LED'in enerji dönüşümünden gelen verimlilik haricinde herhangi bir verimden bahsedilmemektedir. Ancak kullanılan entegre devrenin sahip olduğu birkaç özellik lineer yapıyı resistif yapının bir adım ötesine geçirmektedir. Burada LED üzerine düşen gerilim sabittir.

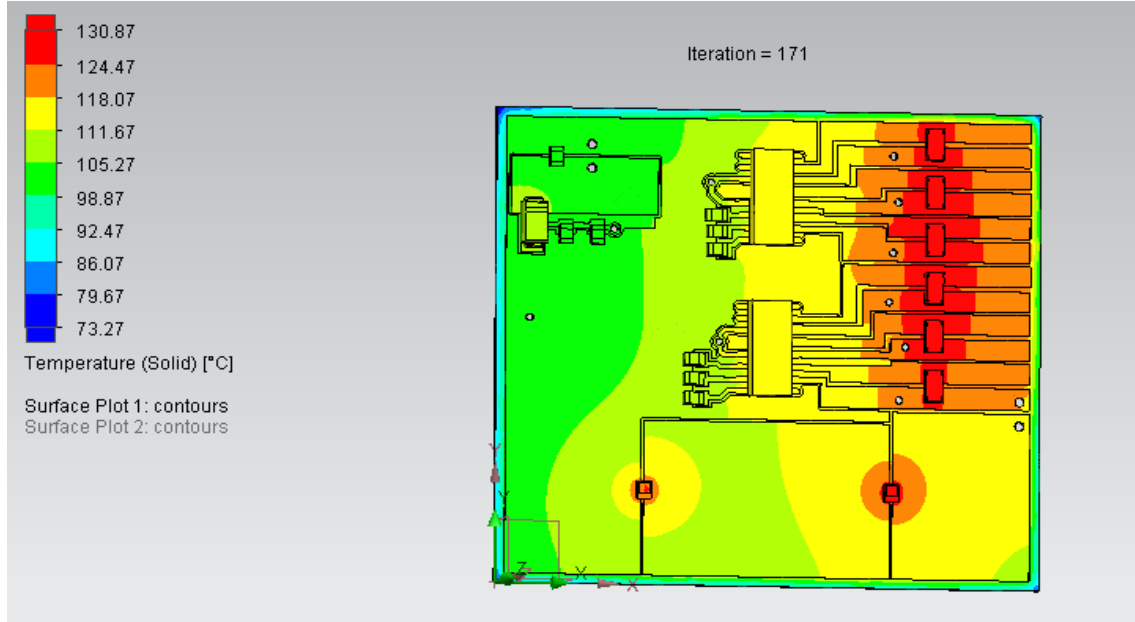
Çıkış akımı ve çıkış geriliminin sabit olması yapının tıpkı buck konvertör gibi çalışıyormuş düşüncesini oluştursa da gerilimin artı kalan kısmını termal dirençler ve entegre devre paylaşmaktadır. Ek olarak 5.1.1.1'de belirtildiği gibi FEKA bünyesinde sahip olunan know-how'a göre beyaz ışık veren LED'lerde gözlenen verim maksimum % 20'dir (Bilgi

sayfalarında paylaşılan değer üreticinin üretim tekniğine ve LED katkısına göre değişim göstermekle beraber beyaz ışık veren LED’lerde bu değer % 35 - 40 civarındadır).

Otomotiv üreticileri çeşitli tiplerde ve özelliklere sahip kontrol üniteleri kullanmaktadır. Bu kontrol ünitelerinin çıkış akımlarının maksimum limitleri değişkenlik gösterebilmektedir. Bu limitleme durumları genelde açık ve kısa devre gibi durumların kontrol edilmesinde kullanılmaktadır. Lineer yapıların özelliği sabit çıkış akımı vermeleridir. Böylece giriş gerilimindeki değişkenlik çıkış akımını değiştirmez. Diğer taraftan, oluşan bu değişkenlik çıkış akımını sabit tuttuğu için kritik komponentin ısıdan dolayı zarar görmesini engeller. Ek olarak da LED çıkış akısının sabit kalmasına sağlar.

Yukarıda belirtilen avantajlarının yanında resistif yapılara göre karmaşık olması ve lineer yapıları gerçekleştirmek için kullanılan komponentlerin resistif yapılarda kullanılanlara göre nispeten pahalı olması, dezavantajları arasında sayılabilir.

Analiz sonuçlarına göre oluşturulan termal harita Şekil 4.10’da verilmiştir. Buna göre analiz edilen senaryodaki LED sıcaklığı 130 °C’dir.



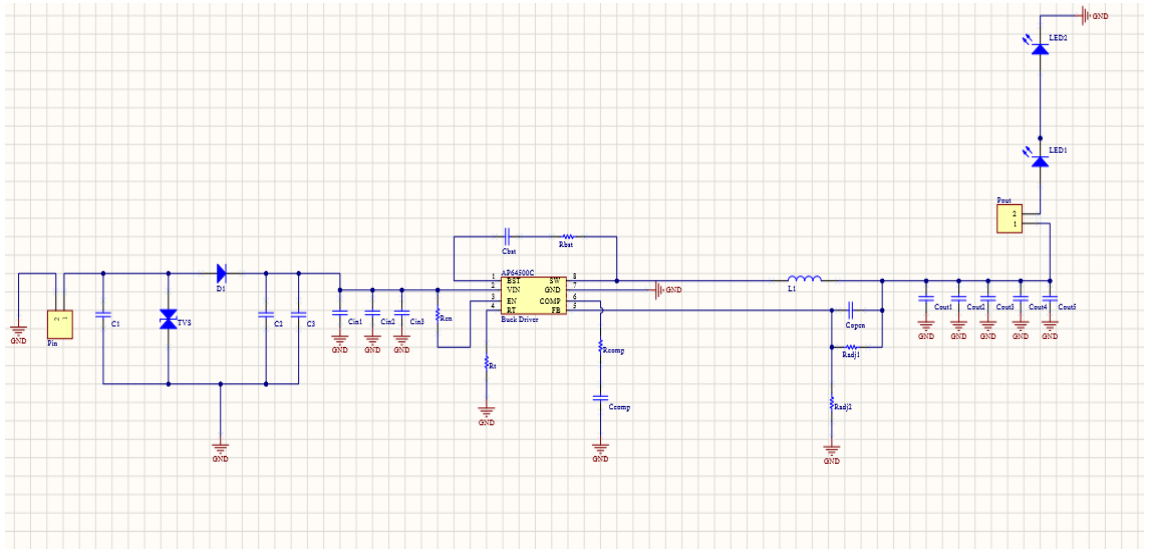
Şekil 4.10. Linear LED’li ön sis lambasının analiz sonucu oluşan termal harita

4.1.1.3. DC/DC LED’li Ön Sis Lambasının Hazırlanması ve Analizi

DC/DC yapıya sahip elektronik devrede, ters polarizasyonu engellemek için diyot, anlık güç dalgalanmasını bastırmak için TVS, gürültüyü filtrelemek için alçak geçiren filtre, anahtarlama yapmamız için buck sürücü entegre devresi, buna bağlı olarak kullanılan bobin ve çıkış kapasitörleri kullanılmıştır.

Kullanılan Buck entegre devresi 3,8 V ile 42 V arasında geniş bir giriş gerilim dayanımına sahiptir. Maksimum çıkış akımını 5 A olup 45 mΩ yüksek taraflı güç MOSFET’i ve 20 mΩ düşük taraflı güç MOSFET’i, entegrenin iç yapısında bulunmaktadır. Bu sayede % 90 üzerinde verimlilik elde edilebilir.

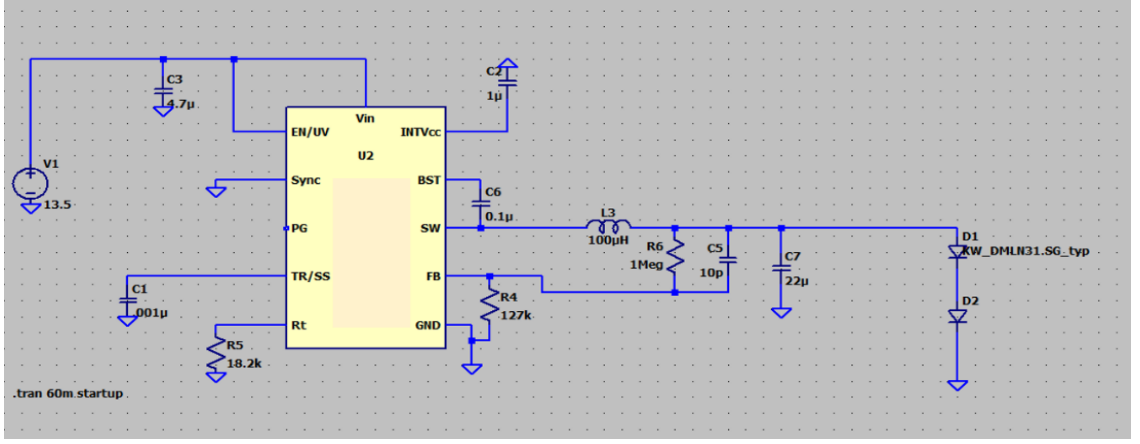
Devrenin şeması Şekil 4.11’de verilmiştir.



Şekil 4.11. DC/DC LED’li ön sis sürme devre şeması

DC/DC (Buck) yapıya sahip elektronik devrenin benzetim programı için hazırlanmış devre yapısı, Şekil 4.12’de verilmiştir. Benzetim için gerekli olan LED bilgileri üreticisi Samsung’un sitesinden alınmış olup Spice analizi için normal (tipik) model seçilmiştir.

DC/DC yapılar resistif ve lineer topolojilere göre daha karmaşıktır ve komponent çeşitliliği daha fazladır. DC/DC çözümlerin resistif ve lineer çözümlere göre avantajı, çıkış gerilimi ve akımının istenilen değerlere göre kolaylıkla ayarlanabilmesidir.



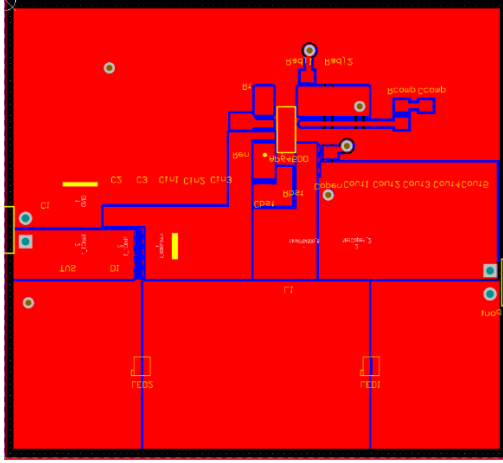
Şekil 4.12. DC/DC LED’li ön sis sürme devresi spice çizimi

DC/DC topolojide LED’leri yaklaşık olarak 610 mA akım ile sürmek için harcanan enerji yaklaşık olarak 4 W’dır. Giriş gerilimi 13,5 V ve giriş akımını 0,32 A olarak, çıkış akımını 0,61 A ve çıkış gerilimi ise 6,3 V olarak hesaplanmıştır.

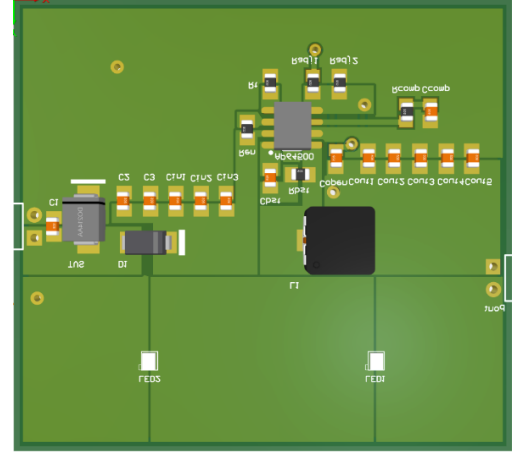
Çıkış akımını ile çıkış geriliminin çarpımı çıkış gücünü vermektedir. Aynı şekilde giriş akımını ve giriş geriliminin çarpımı giriş gücünü vermektedir. Verimlilik hesabı, Eşitlik 4.2’de gösterilmektedir.

$$Verimlilik = \frac{P_{out}}{P_{in}} \quad (4.2)$$

Hazırlanan DC/DC topolojiye sahip PCB’lerin çizimi ve bu çizimin 3D formatında görselleştirilmiş biçimi, Şekil 4.13’de ve Şekil 4.14’de verilmektedir.



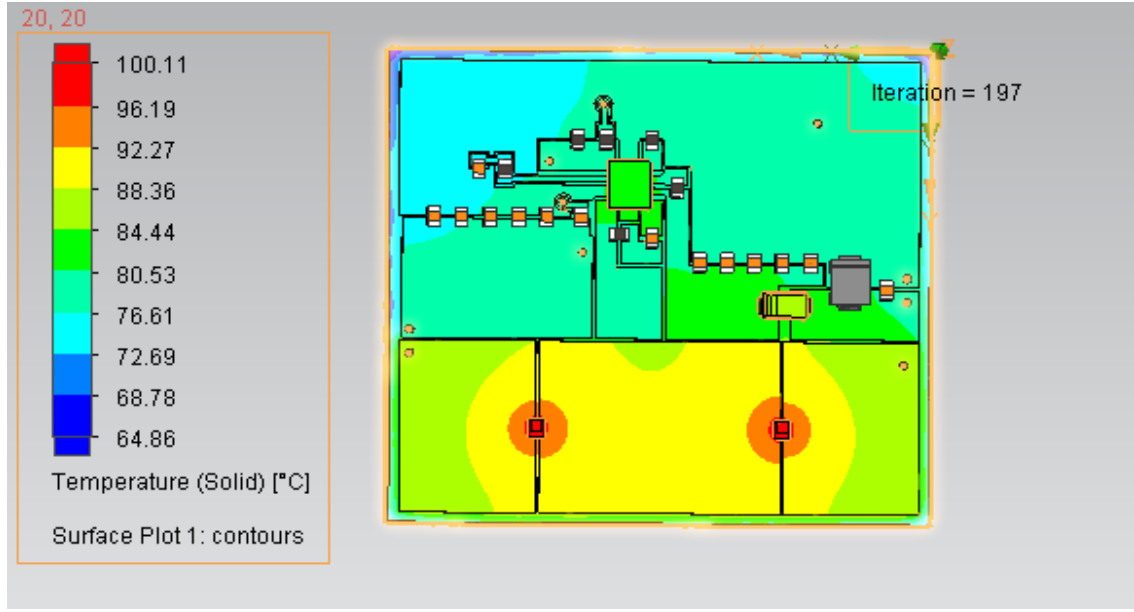
Şekil 4.13. DC/DC LED’li ön sis PCB çizimi



Şekil 4.14. 3D DC/DC LED’li ön sis PCB’si

DC/DC topoloji gereği lineer ve resistif yapılarda farklı olarak bir verimlilikten bahsedilebilir. Ayrıca topolojinin sağladığı verimliliğin haricinde LED üzerindeki enerji dönüşümü de ek olarak verimliliği artırmaktadır. LED üreticilerinin bilgi sayfalarında paylaştıkları teorik değerin yanı sıra firma bünyesinde oluşturulan know how verisi de göz önünde bulundurulmalıdır.

Otomotiv üreticilerinin çeşitli tip ve özelliklere sahip kontrol ünitelerini kullandığı bilinmektedir. Bu çalışmada seçilen DC/DC yapı buck özelliğini göstermektedir. Yani, giriş gerilimi çıkış geriliminden düşük olmakla birlikte çıkış gerilimi ve akımı sabittir. Böylece, giriş gerilimindeki değişkenlik çıkış akımını ve gerilimini değiştirmez. Diğer taraftan oluşan bu değişkenlik çıkış akımını sabit tuttuğu için kritik komponentin ısıdan dolayı zarar görmesini engellemektedir. Ek olarak da LED çıkış akımının sabit kalmasına yaramaktadır. Burada belirtilen avantajlarının yanı sıra, lineer ve resistif yapılara göre karmaşık olması ve DC/DC yapıları gerçekleştirmek için kullanılan komponentlerin resistif ve lineer yapılarda kullanılanlara göre nispeten pahalı olması dezavantajları arasında sayılabilir. Bunlara ek olarak anahtarlamalı yapıya sahip oldukları için EMC ve EMI açısından da dezavantajlı oldukları söylenebilir. Analiz sonuçlarına göre oluşturulan termal harita Şekil 4.15’de verilmektedir. Buna göre analiz edilen senaryodaki LED sıcaklığı 100 °C’dir.



Şekil 4.15. DC/DC LED’li ön sis analiz sonucu oluşan PCB termal harita

4.1.2. Karşılaştırma Sonuçları

PCB genişliği 5 cm^2 olan $35 \text{ }\mu\text{m}$ bakır kalınlığına sahip datalar FloEFD programı yardımıyla termal analiz yapıldığında DC/DC (buck) topolojisine sahip çalışmadaki LED’lerin jonksiyon sıcaklıklarının en düşük değerde olduğu görülmüştür. Analiz sonucu sıcaklık yaklaşık olarak $100 \text{ }^\circ\text{C}$ ’dir.

Lineer yapıda ise LED üzerinde ölçülen sıcaklık $130 \text{ }^\circ\text{C}$ ve resistif yapıda ölçülen LED sıcaklığı ise $140 \text{ }^\circ\text{C}$ ’dir.

Çizelge 4.1 Topolojiler-LED Jonksiyon Sıcaklıkları

Kullanılan Topolojiler	Ölçülen LED Jonksiyon Sıcaklıkları
Resistif Topoloji	$140 \text{ }^\circ\text{C}$
Lineer Topoloji	$130 \text{ }^\circ\text{C}$
DC/DC Topoloji	$100 \text{ }^\circ\text{C}$

Verimlilik karşılaştırılması yapıldığında şu sonuçlar gözlenmektedir. DC/DC (Buck) topolojisinde verimlilik hesabı için ilgili eşitlik kullanılarak verim yaklaşık olarak % 88'dir.

Lineer yapılarla ilgili olarak kullanılan LED sürme entegresi yukarıda açıklanmıştır. Resistif yapılara ek olarak çıkış geriliminin giriş geriliminden düşük ve sabit olması ve akımın sabit olmasından dolayı yaklaşık olarak % 20 verim avantajı elde edilmektedir. Sistemin toplam verimi ise yaklaşık olarak % 40 olarak elde edilmektedir.

Resistif yapılarda ise verim sadece LED'in üzerindeki elektriksel enerjinin ışık enerjisine dönüşmesi sonucunda elde edilen verimdir. Verimlilik değeri yaklaşık olarak % 20'dir.

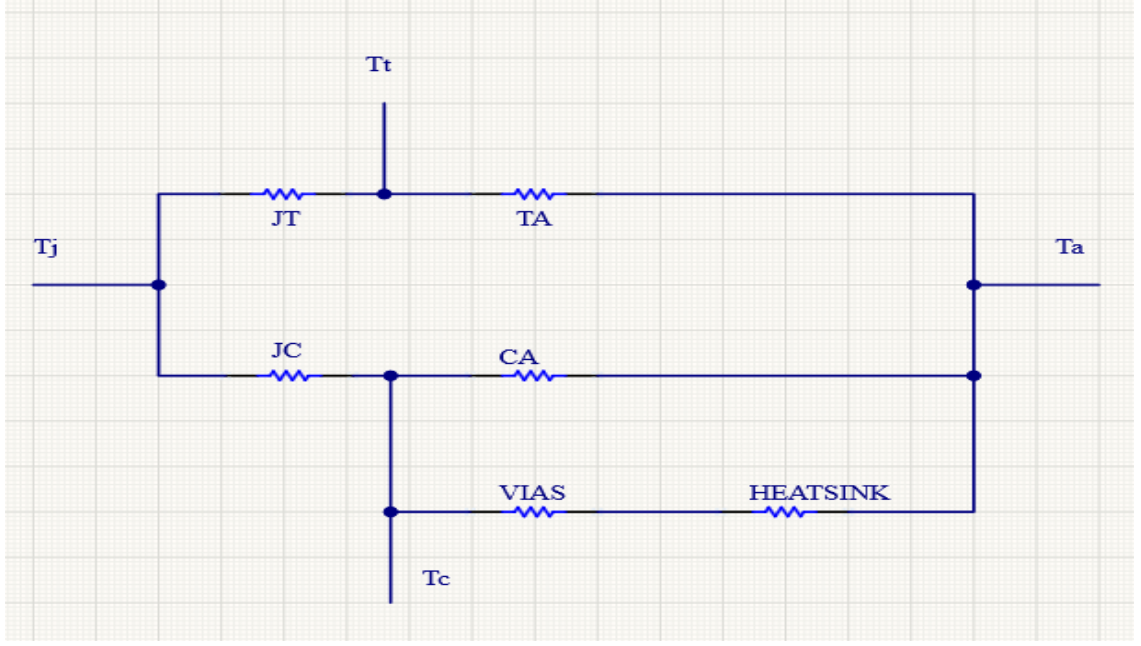
Verimlilik karşılaştırması Çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2 Topolojilerin verimlilik sonuçları

Kullanılan Topolojiler	Verimlilik
Resistif Topoloji	% 20
Lineer Topoloji	% 40
DC/DC Topoloji	% 88

4.2. Soğutma Amaçlı Bırakılan Bakır Alanların Rth Değerine Etkisi

PCB üzerindeki bakır katman, iletimi sağladığı gibi soğutma amaçlı da kullanılmaktadır. Bu bölümde soğutulması istenilen komponent için bırakılan bakır alanların etkisi incelenecektir. Termal tasarım, elektronik sistemlerin güvenilirliğini artırmak için hayati önem taşımaktadır. Ancak bu tarz yapılarda her zaman simetrik bir geometri elde etmek mümkün değildir. Bu durum, temel olarak akışkanlar mekaniği modellerinin karmaşıklaşması sonucunu doğurmaktadır.



Şekil 4.16. Rth eşdeğer devresi

Rth (termal direnç) etkisi, bu bölümde 5 farklı PCB üzerinde incelenmiş olup transistör için bırakılan bakır alan genişlikleri sırasıyla 1 cm^2 , 3 cm^2 , 4 cm^2 ve 6 cm^2 olarak tasarlanmıştır.

Bu tez çalışmasında, transistörlü akım sabitleyici bir yapı tasarlanmıştır. Transistör üzerindeki sıcaklıklar, termokopullar yardımıyla ölçülecek olup analiz programı aracılığıyla da ilgili benzetimler elde edilecektir.

4.2.1. Bakır Alan Genişliğinin Rth Etkisi

Jonksiyon sıcaklığının değeri Rth değeriyle doğru orantılıdır. Bunun anlamı, eğer jonksiyon sıcaklığının düşürülmesi isteniyorsa Rth değerinin de düşürülmesi gerekiyor demektir. Tez çalışmasının sonraki bölümlerinde paylaşılan eşitliklerde bu konuyla ilgili matematiksel ilişkiler verilmiştir. Eşitlik 4.3’de T_j (jonksiyon sıcaklığı) değerinin nasıl hesaplandığı gösterilmekte olup eşitlik 4.4’de ise Rth değeri (jonksiyon ısısı ve ortam ısısı arasında ısı geçişinin olduğunu belirtir) paylaşılmıştır. Eşitlik 4.5’de ise θ_{Cu} , yani PCB üzerindeki bakır plakanın yanal ısı direnci gösterilmiştir.

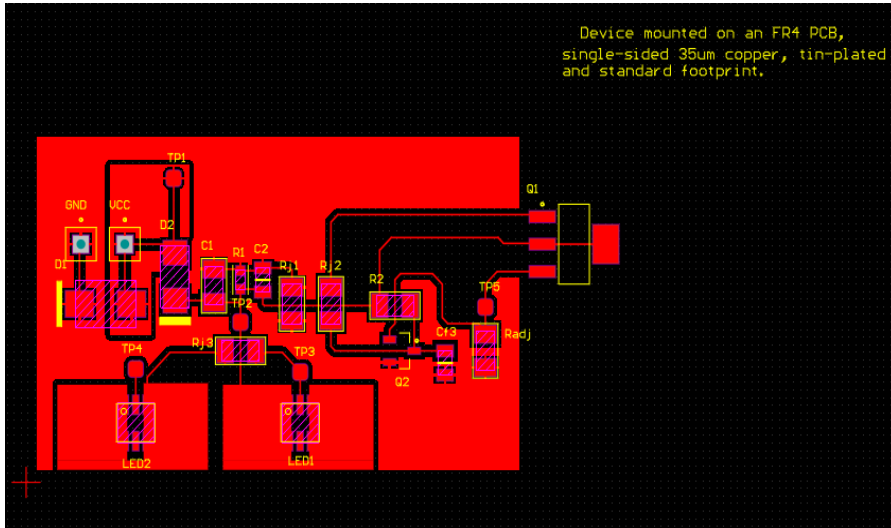
Bu direnç değeri, komponent altında bırakılan bakır alanların Rth değerine etkisini incelemek için kullanılmaktadır.

$$T_j = T_a + P \times R_{th(j-a)} \quad (4.3)$$

$$R_{th(j-a)} = \frac{\Delta T_{(j)}}{P_d} \quad (4.4)$$

$$\theta_{Cu} = \frac{1}{\lambda_{Cu}} \times \frac{\text{uzunluk}}{\text{Alan}} \quad (4.5)$$

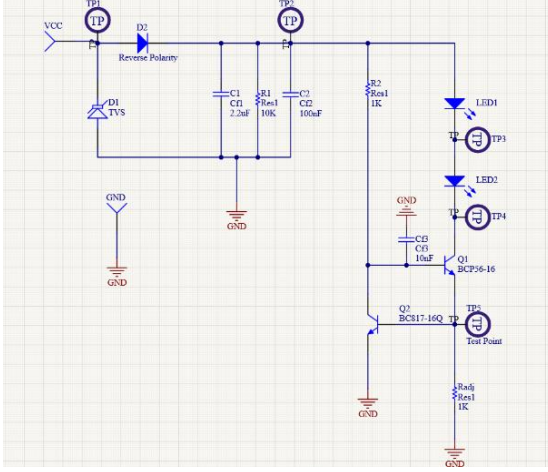
Şekil 4.17’de tek taraflı bir PCB üzerine yerleştirilmiş transistörün standart bacak tipi büyüklüğüne sahip bakır alan bırakılmış çizimi Şekil 4.17’de gösterilmektedir.



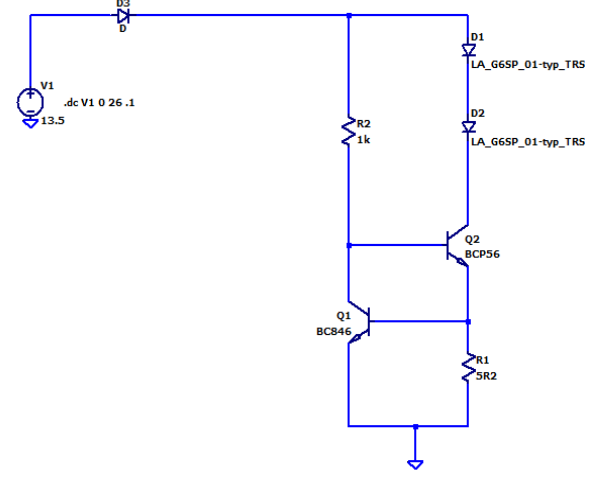
Şekil 4.17. Standart bacak tipi bakır alan genişliği

Standart bacak büyüklüğüne sahip ya da daha geniş bir bakır alan üzerine oturtulan komponentin jonksiyon sıcaklığının nasıl hesaplanacağı yukarıda paylaşılmıştır. Burada ise örneği verilen doğrusal yapıdaki ayırık bileşenlerden oluşturulmuş devredeki

komponentin üzerine düşen güç hesaplamasının nasıl yapıldığı üzerinde durulmaktadır. Şekil 5.18’de devre şeması Şekil 4.19’de ise Spice modeli gösterilmiştir.

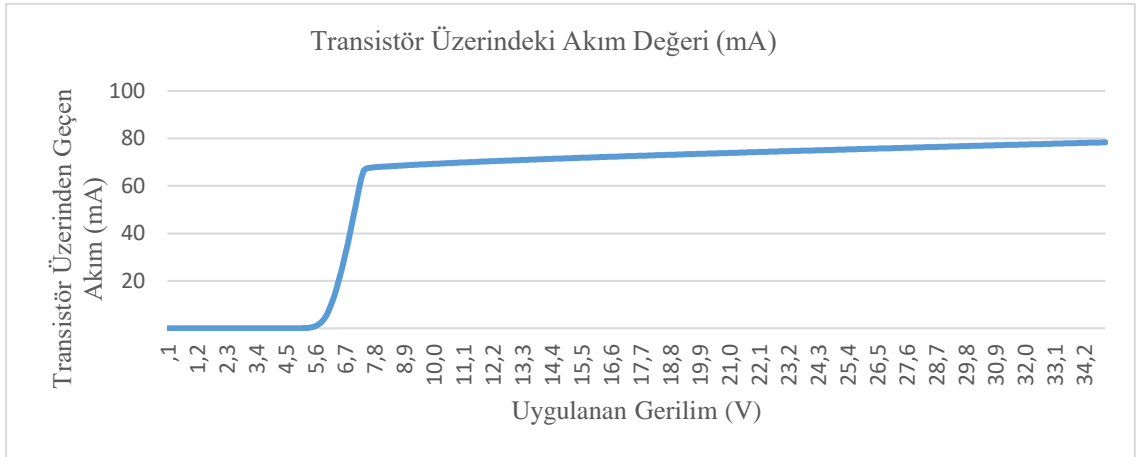


Şekil 4.18. Devrenin şema gösterimi



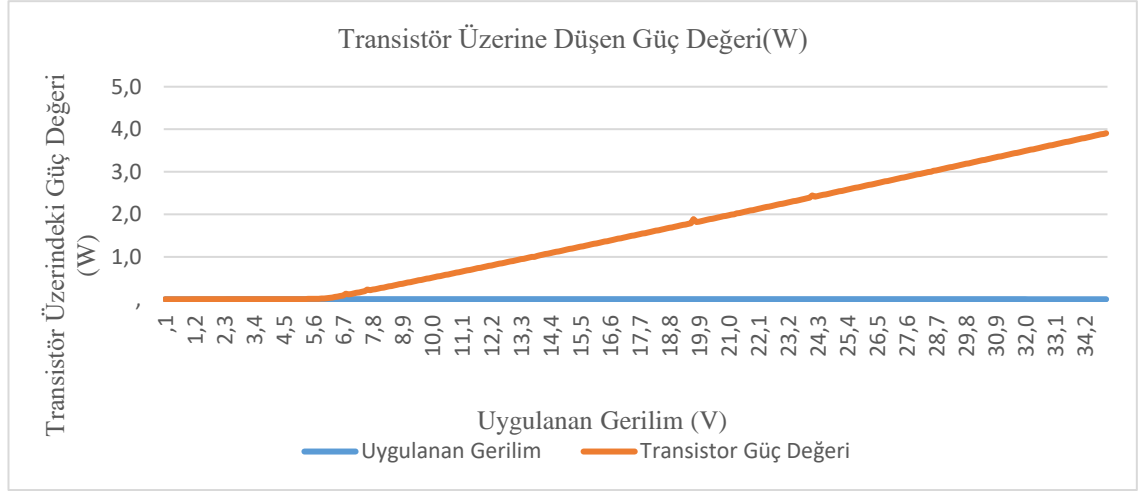
Şekil 4.19. Devrenin spice modeli

Transistörün üzerinden geçen akım her farklı senaryo için hazırlanmış PCB üzerinde eşit değerdedir ve akım değeri 85 mA’dır. Grafik 4.1’de transistör üzerinden akan akımın gerilime göre değişimi verilmektedir. Grafik 4.1’den de anlaşılacağı üzere gerilim artışı, transistörün üzerinden akan akımın ayarlanan değerinin üzerine çıkmamaktadır.



Grafik 4.1. Transistörün üzerinden akan akım

Transistörün üzerindeki güç değeri ise mW cinsinden Grafik 4.2’de gösterilmektedir. Güç değeri, gerilim ve akım ile doğru orantılı olduğundan sabit kalan akım değerine rağmen artan gerilim değeri transistör üzerindeki güç gerilimine bağlı olarak artmaktadır. Eşitlik 4.6’da güç bağıntısı verilmektedir.



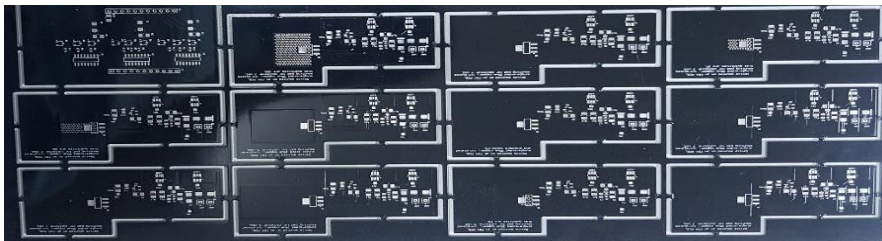
Grafik 4.2. Transistörün üzerindeki güç

$$P = I \times V \quad (4.6)$$

Sonraki bölüm, ölçüm ve analiz sonuçlarını içermekte olup bakır alanların soğutmaya etkisi ölçüm ve analiz yöntemiyle gösterilmektedir.

4.2.2. Ölçümü Yapılacak PCB’lerin Hazırlanması

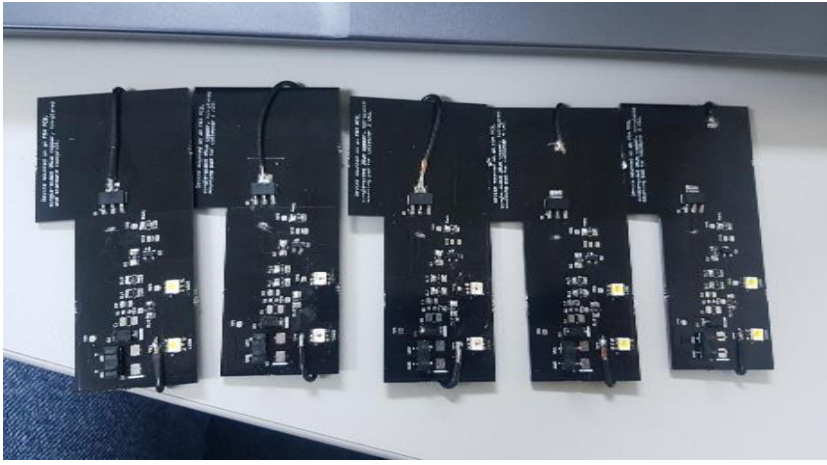
PCB dataları Altium Designer tasarım programında hazırlanmıştır. PCB’lerin panel halindeki görüntüsü Şekil 4.20’de gösterilmektedir.



Şekil 4.20. PCB paneli

Hazırlanan panel, 35 µm bakır kalınlığına sahip olup FR4 malzemedен ürettirilmiştiir. Siyah renkli ve sınıflandırma olarak Class 2'dir.

Panelde 35 µm bakır kalınlığına sahip 5 adet PCB hazırlanmış ve bu PCB'lerin üzerinde bulunan transistörün ısıyı atması için bırakılan alanın altındaki bakır alan genişlikleri sırasıyla; standart footprint, 1 cm², 3 cm², 4 cm², 6 cm² olarak belirlenmiştir. Hazırlanan PCB'ler Şekil 4.21'de gösterilmektedir.



Şekil 4.21. Hazırlanan PCB'ler (Bakır alan genişliği)

Ölçümlerde K tipi termokupl kullanılmıştır. Termokuplların bağlantı şekli ilerleyen kısımlarda verilmektedir. Termokuplların çalışma prensibi hakkında bilgi vermek gerekirse, termokupl bir çeşit sıcaklık transdüseridir. Malzemenin bir ucu ısıtılırsa diğer uçlarda gerilim elde edilmektedir. Termoelektrik etkinin oluşturduğu gerilim bir işlemci tarafından algılanır. Böylece, gerilim farkı ile ölçümü yapılan cismin sıcaklığı elde edilir. Şekil 4.22'de ölçümlerde kullanılan termokupl gösterilmektedir.



Şekil 4.22. Ölçümlerde kullanılacak K tipi termokupl

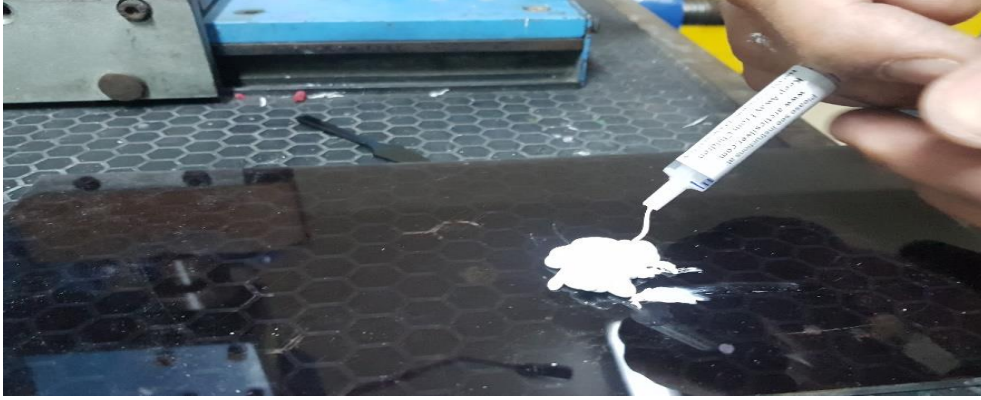
Ölçümü yapılacak ve termokupl bağlanacak PCB için ilk olarak, termal macun karışımı hazırlanmaktadır. Termal macunun kullanılmasının amacı termokuplu ölçümü yapılacak olan bileşenin üzerine sabitlemektir. Bu işlemler için çok sayıda termal macun çeşidi bulunmaktadır. Termal macunun termal iletkenlik katsayısının çok düşük olması beklenmektedir. Bu nedenle, düşük termal iletim katsayılı termal macun kullanılmaktadır. Bu ölçümde kullanılan macunun termal iletkenlik katsayısı 0,9 W/C'dir. Şekil 4.23'de, çalışmada kullanılacak olan termal macun tüpü gösterilmektedir.



Şekil 4.23. Ölçümlerde kullanılacak termal macunlar

Karışım genelde 2 tüp şeklinde sunulmaktadır. Tüplerden biri termal iletkenliği sağlarken diğeri katılma süresini ve sertliğini etkilemektedir. Kullanıcının isteği ve ihtiyacı

doğrultusunda bu karışım oranları belirlenebilir. Şekil 4.24’de karışımın nasıl yapıldığı gösterilmektedir.



Şekil 4.24. Termal macun karışımının karıştırılması

Hazırlanan karışım termokupl ile beraber komponentin üzerine tutturulur ve hazırlanan termal macun üzerine sürülür. Karışımın muhtevasına göre kuruma ve sertleşme miktarı belirlenir. Süreyi kısaltmak için fön makinesi ya da sıcak hava tabancası da kullanılabilir. Burada dikkat edilmesi gereken en önemli husus, sıcak havanın komponente veya termokupllara zarar vermemesidir. Şekil 4.25’de termokupl bağlantıları yapılmış ve ölçüme hazır PCB’ler gösterilmiştir.



Şekil 4.25. Termokupl bağlantılarının gösterimi

Ölçüm yapılmadan önce ölçüm fırın, 50 °C’de yarım saat ısıtılmıştır. Fırının içerisinde bulunan ve fırın içi sıcaklığı takip ettiğimiz harici bir termokupl yerleştirilmiş olup PCB’lere yarım saatin sonunda güç verilmiştir.

Ölçümün nasıl yapılacağı önceki bölümde açıklanmış olup aşağıda fırın içerisinde çalışan PCB ve termokupl bağlantılarının datalogger’a nasıl bağlandığı Şekil 4.26’da ve Şekil 4.27’de gösterilmiştir.



Şekil 4.26. PCB’nin fırın içerisindeki konumu



Şekil 4.27. Datalogger termokupl bağlantısı

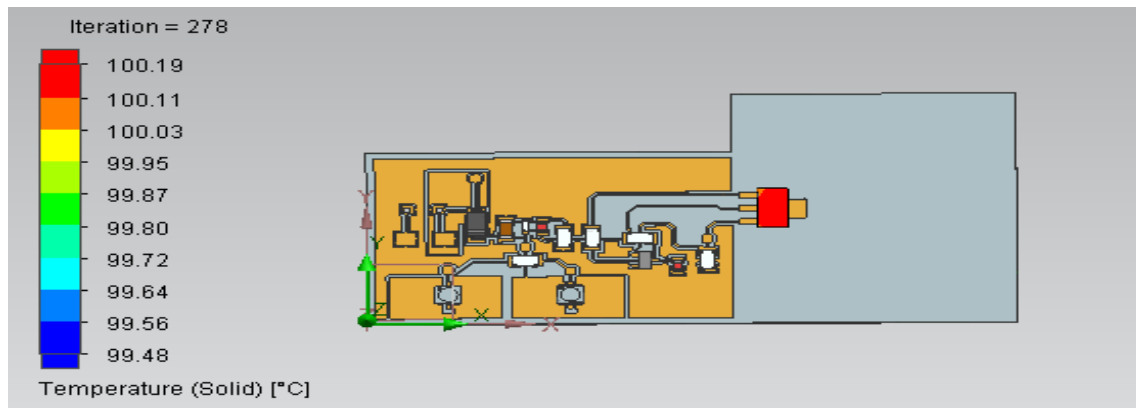
4.2.3. Analiz Sonuçları (Bakır Alan Genişliği Rth Bağlantısı)

Yapılan çalışmanın analizlerinde hesaplamalı akışkanlar dinamiği için kullanılan Simcenter FloEFD paket programı kullanılmıştır. Model kurulumu, geometri temizleme gereksinimi olmaması, mesh performansı vb. sebeplerden dolayı tercih edilmiştir.

Öncelikle, parçamızın 2 katı büyüklüğünde bir akışkan hacim olarak (iletim ve taşınım durumları gözetildiğinden dolayı) hava tanımlanmıştır. Ardından bu akışkan hacmin sıcaklığı 50 °C dereceye ayarlanmış olup malzeme seçiminde FR4 ve bakır yüzeylerin kalınlığı olarak 35 µm bakır kalınlığı seçilmiştir. Elektronik parçaların malzemesi ise silikon olarak girilmiştir. LED ve diğer elektronik parçaların önceden belirlenen güç değerleri birimi Watt cinsinde tanımlanmıştır.

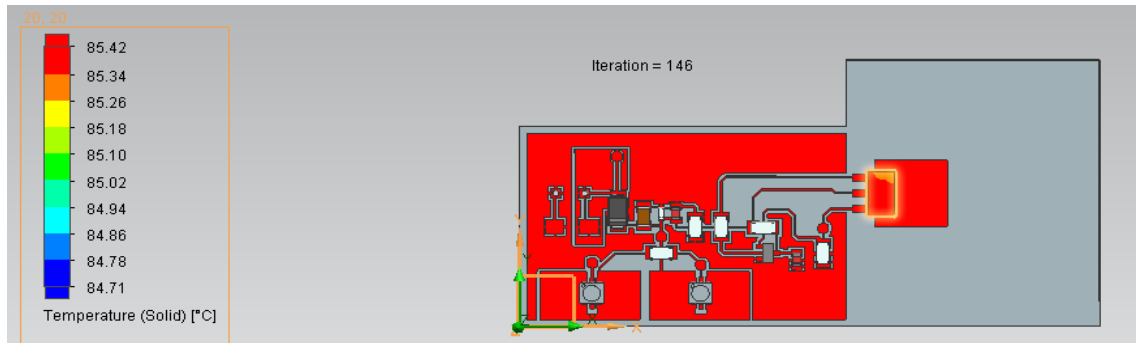
Her parça için gereken mesh ayarları yapıldıktan sonra çözüm ayarlarına geçilmiştir. Yaklaşık olarak mesh sayımız 1 milyondur. Yer çekimi ivmesi “z” ekseninde $9,81 \text{ m/s}^2$ olarak tanımlanmıştır. İletim yöntemlerinden “Monte Carlo” yöntemi ile birlikte 1 milyon Ray tanımlanmıştır. Hava akışı olarak doğal taşınım seçilmiştir.

Soğutma için bakır alan bırakılmayan senaryo için, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık $100,19 \text{ }^\circ\text{C}$ derece ölçülmüştür. Analiz sonucu, Şekil 4.28’de verilmektedir.



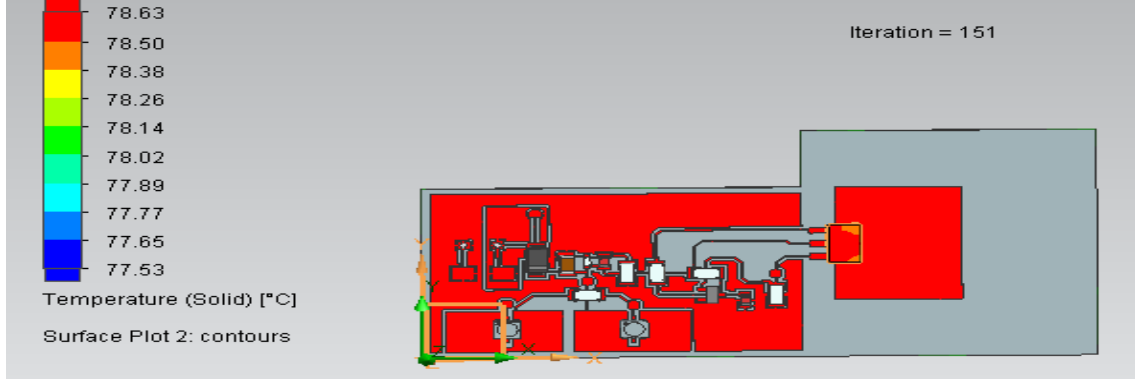
Şekil 4.28. Bakır alan bırakılmayan çözüm

1 cm^2 soğutma alanı bırakılan senaryo için, $50 \text{ }^\circ\text{C}$ ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık $85,42 \text{ }^\circ\text{C}$ derece ölçülmüştür. Analiz sonucu, Şekil 4.29’da verilmiştir.



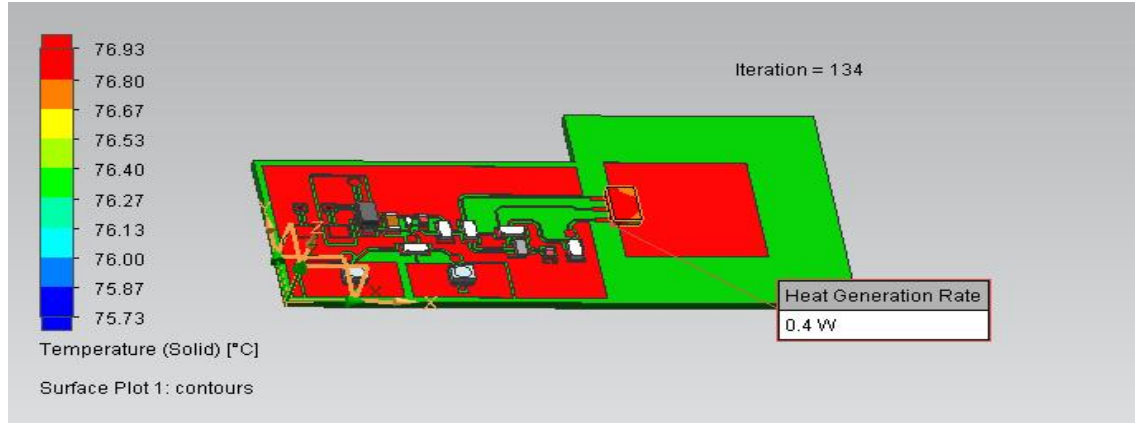
Şekil 4.29. 1 cm^2 bakır alan bırakılan çözüm

3 cm² soğutma alanı bırakılan senaryo için, 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 78,64 °C ölçülmüştür. Analiz sonucu Şekil 4.30'da verilmiştir.



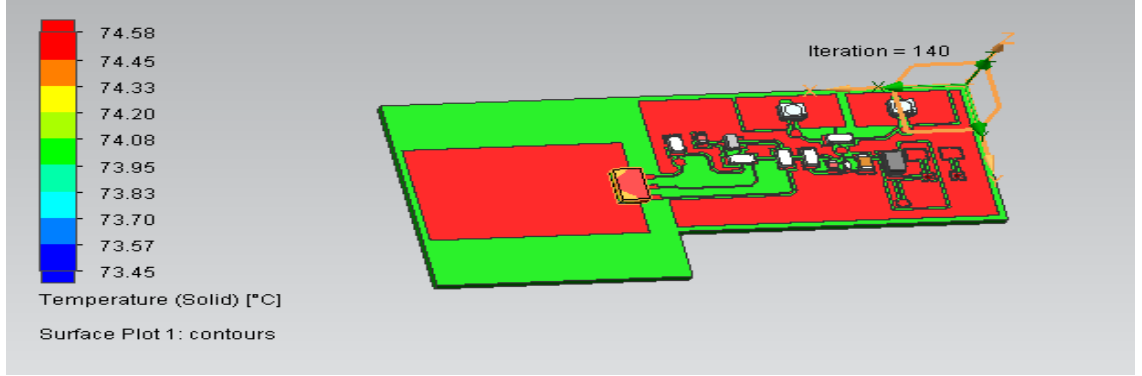
Şekil 4.30. 3 cm² bakır alan bırakılan çözüm

4 cm² soğutma alanı bırakılan senaryo için, 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 76,93°C °C ölçülmüştür. Analiz sonucu, Şekil 4.31'de verilmiştir.



Şekil 4.31. 4 cm² bakır alan bırakılan çözüm

6 cm² soğutma alanı bırakılan senaryo için, 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 74,58 °C ölçülmüştür. Analiz sonucu, Şekil 4.32’de verilmiştir.



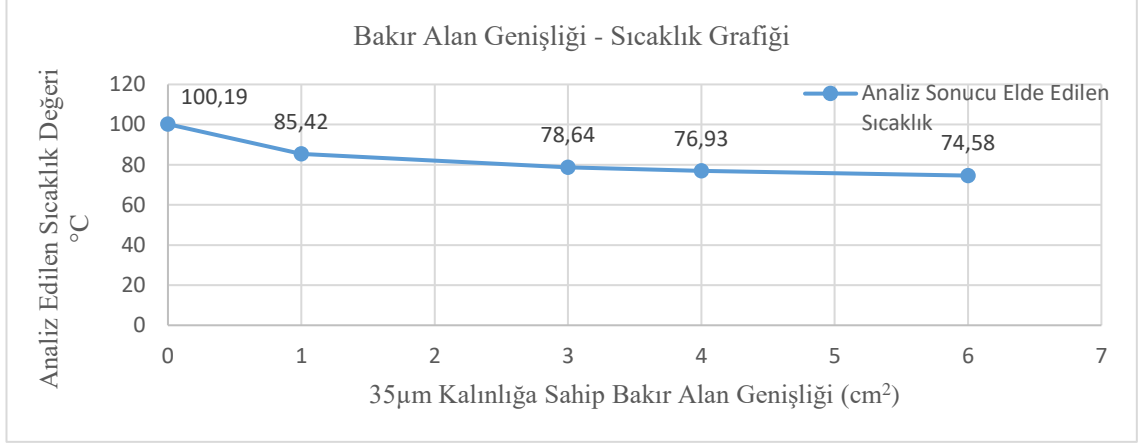
Şekil 4.32. 6 cm² bakır alan bırakılan çözüm

Yapılan analiz sonuçlarının çıktıları, Çizelge 4.3’de gösterilmektedir.

Çizelge 4.3. Bakır alan genişliği etkisinin analiz sonucu

	13,5V Uygulanmadan Önceki Son Sıcaklık	Bakır Alan Genişliği Etkisinin Analiz Sonucu
Standart Footprint (SOT223)	50 °C	100,19 °C
1 cm ² 1 Oz Bakır Alan	50 °C	85,42 °C
3 cm ² 1 Oz Bakır Alan	50 °C	78,64 °C
4 cm ² 1 Oz Bakır Alan	50 °C	76,93 °C
6 cm ² 1 Oz Bakır Alan	50 °C	74,58 °C

Analiz sonuçlarına göre, bakır alan genişliği ve transistörün jonkiyon sıcaklığı Grafik 4.3’de gösterilmektedir.



Grafik 4.3. Bakır alan genişliği - Sıcaklık grafiği

Elde edilen analiz sonuçlarının çıktılarını ve matematiksel denklemler kullanarak transistörlerin ısı dirençlerini (R_{th} değerlerini) hesaplamak mümkündür. Transistörlerin R_{th} değerinin hesaplanması için Eşitlik 4.3 kullanılmıştır. Bu hesaplamalar, sırasıyla, standart footprint, 1 cm², 3 cm², 4 cm², 6 cm² bakır alanların olduğu PCB'ler için gerçekleştirilmiştir.

$$100,19 \text{ } ^\circ\text{C} = 50 \text{ } ^\circ\text{C} + R_{th} \times 480 \text{ mW}$$

$$85,42 \text{ } ^\circ\text{C} = 50 \text{ } ^\circ\text{C} + R_{th} \times 480 \text{ mW}$$

$$78,64 \text{ } ^\circ\text{C} = 50 \text{ } ^\circ\text{C} + R_{th} \times 480 \text{ mW}$$

$$76,93 \text{ } ^\circ\text{C} = 50 \text{ } ^\circ\text{C} + R_{th} \times 480 \text{ mW}$$

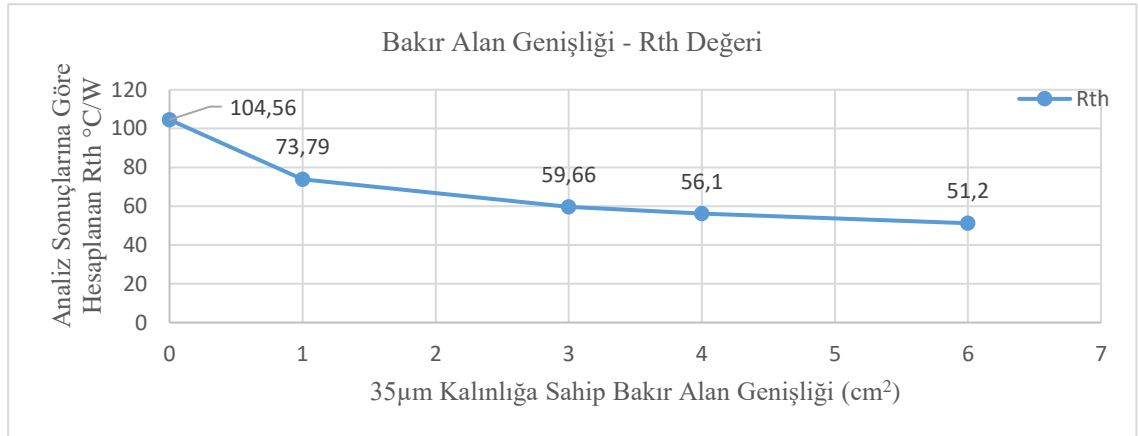
$$74,58 \text{ } ^\circ\text{C} = 50 \text{ } ^\circ\text{C} + R_{th} \times 480 \text{ mW}$$

Hesaplanan R_{th} değerleri sırasıyla, 104,56 °C/W, 73,79 °C/W, 59,66 °C/W, 56,10 °C/W, 51,20 °C/W olarak elde edilmiştir. Çizelge 4.4'de analiz sonuçlarına göre hesaplanan R_{th} değerleri verilmektedir.

Çizelge 4.4. Analiz sonuçlarına göre hesaplanan Rth değerleri çizelgesi (Bakır alan genişliği)

Bakır Alan Genişliği	Hesaplanan Rth Değeri °C/W
Standart Footprint	104,56 °C/W
1 cm ² 1 Oz (35 µm) Bakır Alan	73,79 °C/W
3 cm ² 1 Oz (35 µm) Bakır Alan	59,66 °C/W
4 cm ² 1 Oz (35 µm) Bakır Alan	56,10 °C/W
6 cm ² 1 Oz (35 µm) Bakır Alan	51,20 °C/W

35 µm kalınlığına sahip bakır alan genişliğinin, jonksiyon sıcaklığı hesaplanan transistörün Rth değerine etkisi aşağıdaki Grafik 4.4’de gösterilmiştir.



Grafik 4.4. Bakır alan genişliği - Analiz sonuçlarına göre Rth değeri grafiği

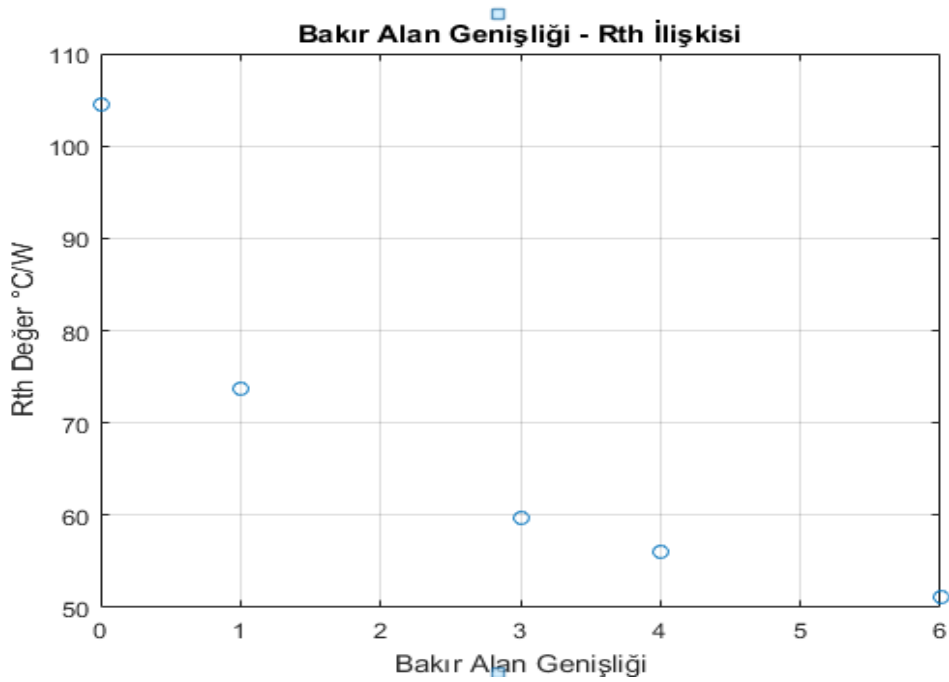
4.2.4. Analiz Sonuçlarının Denklem Haline Dönüştürülmesi

Elektronik bileşenlerin ısınması, sistemin arızalanmasına ya da veriminin değişmesine sebebiyet verebilir. Bu nedenle, kritik komponentlerin üzerindeki soğutma stratejileri tasarım aşamasında belirlenmelidir.

Grafik 4.4’de de paylaşıldığı gibi Rth değeri değişimi azalan ivme karakteristiği ile hareket etmektedir. Bu sayede maksimum bakır alan genişliği tasarım aşamasında

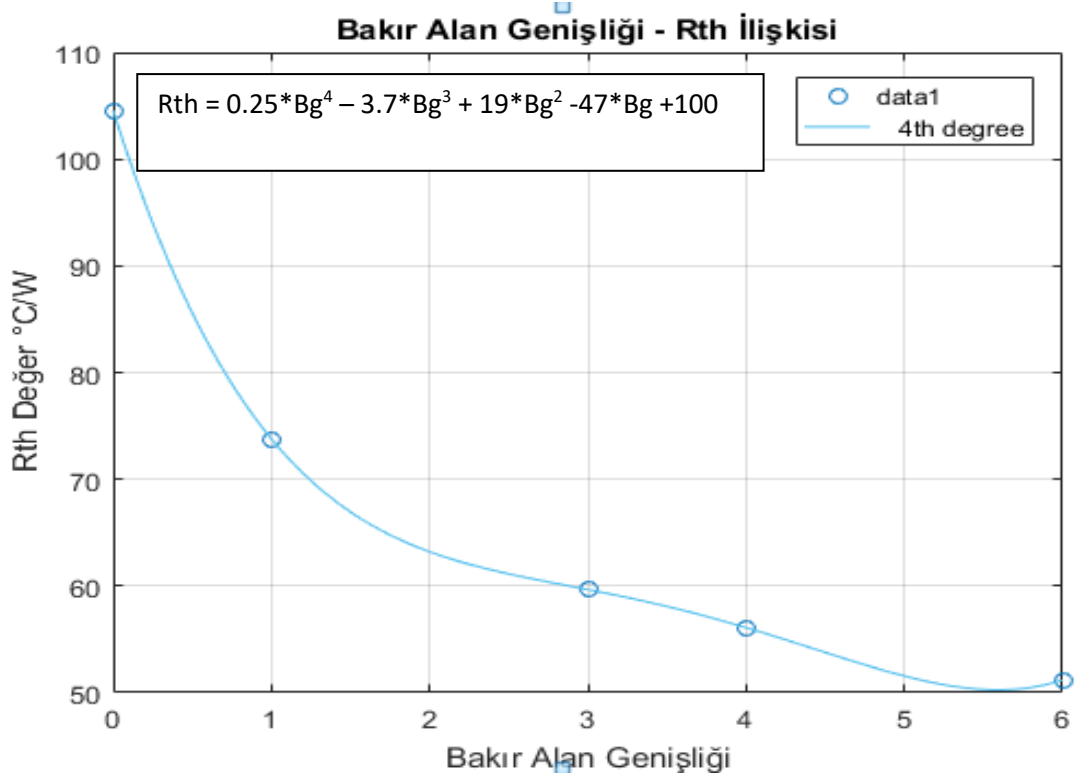
belirlenip PCB boyutuna bağılı oluşabilecek tasarımsal problemler önlenip gerekli önlemler alınabilmektedir.

Matlab 2020b ortamında eğri uydurma ve interpolasyon (ara değer bulma) metotları kullanılarak Rth ve bakır alan genişliği değerleri üzerinden, her iki parametre arasındaki ilişkiyi veren benzetim elde edilmiştir. Bu benzetimler kullanılarak yapılan analizler sonucu, bakır alan genişliği ile Rth arasındaki ilişkiye ait matematiksel bağıntılar türetilmiştir. Matlab ortamında simüle edilen gösterim Şekil 4.33'de verilmektedir.



Şekil 4.33. 3 cm² bakır alan genişliği Rth ilişkisi

Matlab ortamında elde edilen denklem için örneklem sayısı grafiğin eğimiyle uygun şekilde artırılmıştır. Daha sonra Tool menüsü Basic Fitting alt menüsünde yararlanarak eğriyi oluşturan noktaların eğim eğrisine yakınsayan denklem türü seçilmiştir. Böylelikle, bakır alan genişliği ile Rth ilişkisini veren bağıntı, 4'üncü dereceden polinom formunda elde edilmiştir. Şekil 4.34'de, bakır alan genişliği ile Rth değişimini veren benzetim gösterilmektedir.



Şekil 4.34. Matlab benzetimlerinde, düşey eksen Rth değişimi (°C/W)

Matlab benzetimi üzerinden elde edilen denklem eşitlik 4.7’de verilmektedir.

$$Rth = 0.25Bg^4 - 3.7Bg^3 + 19Bg^2 - 47Bg + 100 \quad (4.7)$$

4.2.5. Ölçüm Sonuçları (Bakır Alan Genişliği Rth Bağlantısı)

Yapılan ölçümler sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir:

Soğutma için bakır alan bırakılmayan senaryo için, 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 99,87 °C ölçülmüştür. 1 cm² soğutma alanı bırakılan senaryo için, 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 81,46 °C ölçülmüştür. 3 cm² soğutma alanı bırakılan senaryo için, 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 76,64 °C ölçülmüştür. 4 cm² soğutma alanı bırakılan senaryo için, 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 75,6 °C ölçülmüştür.

Ayrıca, 6 cm² soğutma alanı bırakılan senaryo için, 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 75 °C ölçülmüştür.

13,5V gerilim uygulanmadan önceki termokupl sıcaklığı ve güç verildikten yarım saat sonraki sıcaklık değerleri Çizelge 4.5’de verilmektedir.

Çizelge 4.5. Ölçüm sonuçları çizelgesi (Bakır alan genişliği)

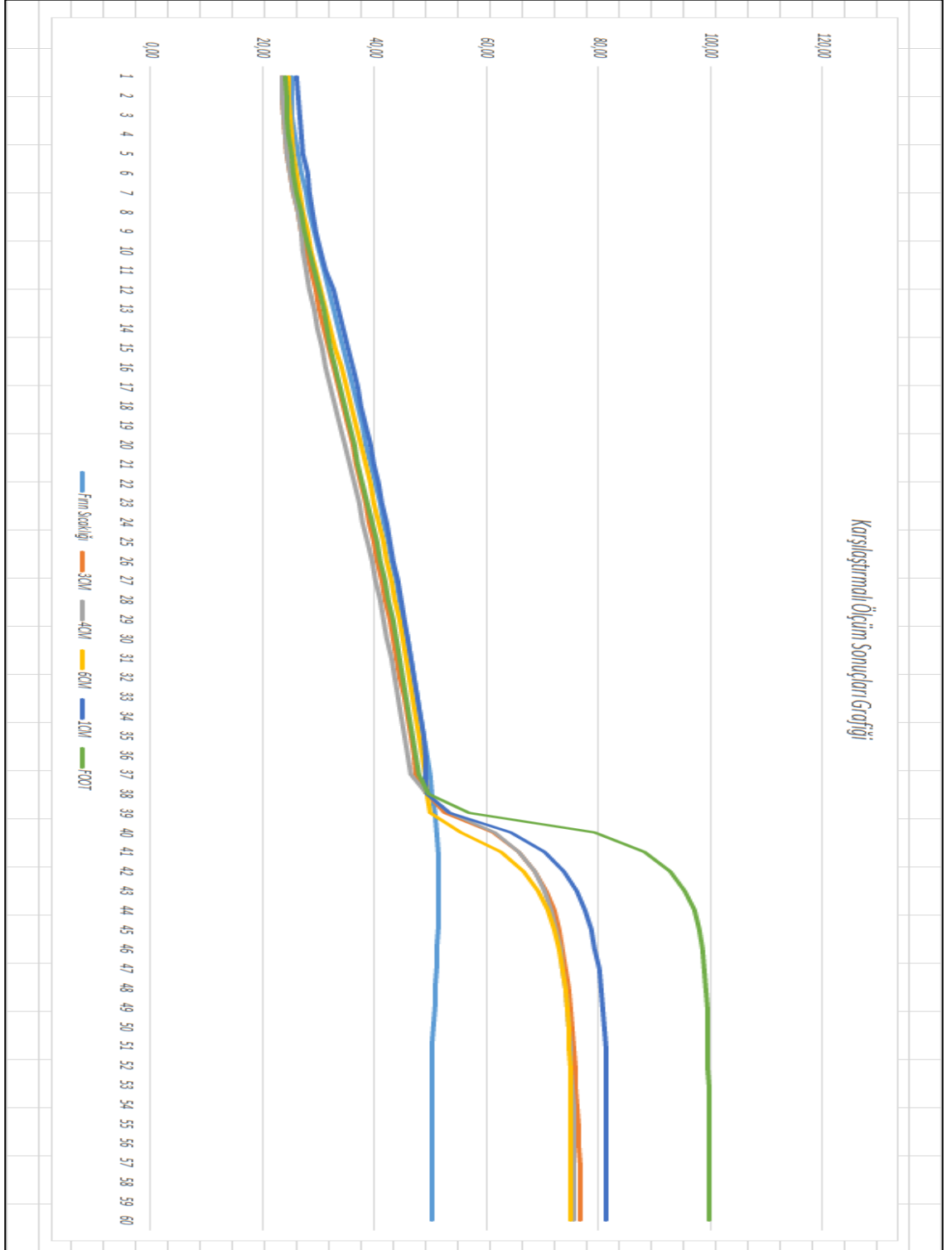
	13,5V Uygulanmadan Önceki Son Sıcaklık	13,5V Uygulandıktan Yarım Saat Sonra Ölçülen Sıcaklık
Standart Footprint (SOT223)	49,62 °C	99,87 °C
1 cm² 1 Oz Bakır Alan	49,535 °C	81,46 °C
3 cm² 1 Oz Bakır Alan	49,49 °C	76,64 °C
4 cm² 1 Oz Bakır Alan	49,455 °C	75,6 °C
6 cm² 1 Oz Bakır Alan	49,345 °C	75 °C

Termokupl üzerindeki sıcaklık ve Fırın içerisinde bulunan termokupl sıcaklığı arasındaki fark Çizelge 4.6’da gösterilmiştir.

Çizelge 4.6. Ölçülen fırın içi ve komponent sıcaklığı farkı çizelgesi

	SOT223	1 cm² 1 Oz Bakır Alan	3 cm² 1 Oz Bakır Alan	4 cm² 1 Oz Bakır Alan	6 cm² 1 Oz Bakır Alan
Termokupl Sıcaklığı	49,62 °C	49,535 °C	49,49 °C	49,455 °C	49,345 °C
Sıcaklık Farkı	0,38 °C	0,465 °C	0,51 °C	0,545 °C	0,655 °C

Ölçüm sonuçlarının karşılaştırmalı grafikleri Şekil 4.35’de gösterilmektedir.



Şekil 4.35. Ölçüm sonuçlarının karşılaştırılmalı grafiği (Bakır alan genişliği)

Yapılan bu ölçüm sonuçları ve elde edilen matematiksel bağıntılar kullanılarak transistörlerin ısı dirençleri yani R_{th} değerleri hesaplanabilmektedir. Transistörlerin R_{th} değerinin hesaplanması için verilen eşitlikler için aşağıdaki gibi elde edilmiştir.

Bu hesaplamalar sırasıyla standart footprint, 1cm^2 , 3cm^2 , 4cm^2 , 6cm^2 bakır alanların olduğu PCB'ler için gerçekleştirilmiştir.

$$99,87\text{ }^{\circ}\text{C} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

$$81,46\text{ }^{\circ}\text{C} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

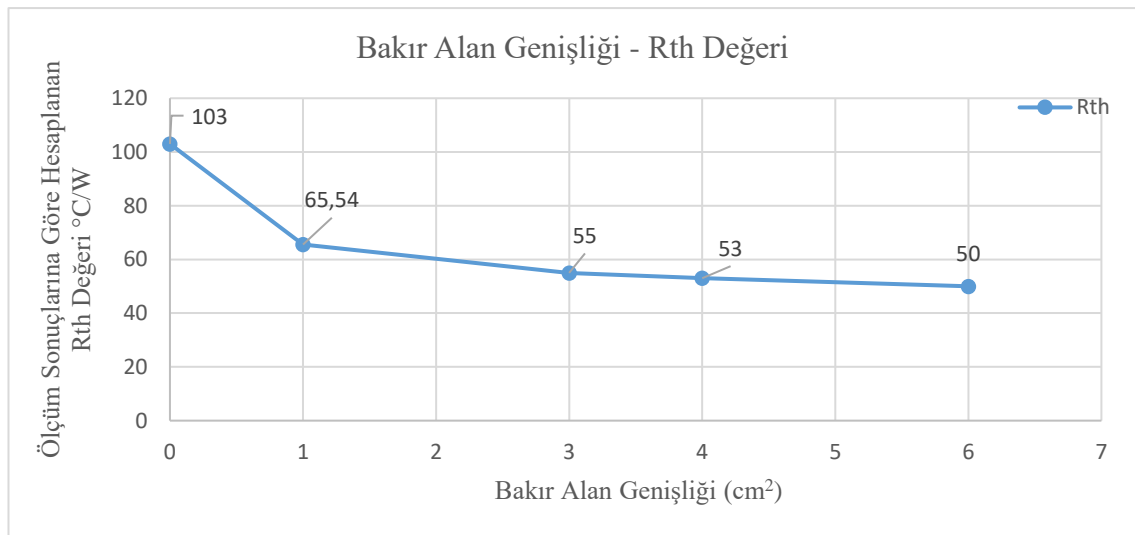
$$76,635\text{ }^{\circ}\text{C} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

$$75,6\text{ }^{\circ}\text{C} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

$$74,9\text{ }^{\circ}\text{C} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

Hesaplanan değerler, sırasıyla, $103\text{ }^{\circ}\text{C/W}$, $65,54\text{ }^{\circ}\text{C/W}$, $55\text{ }^{\circ}\text{C/W}$, $53\text{ }^{\circ}\text{C/W}$, $50\text{ }^{\circ}\text{C/W}$ olarak bulunmuştur.

$35\text{ }\mu\text{m}$ kalınlığına sahip bakır alan genişliğinin jonksiyon sıcaklığı ölçülen transistörün R_{th} değerine etkisi aşağıdaki Grafik 4.5'de gösterilmektedir.



Grafik 4.5. Bakır alan genişliği – Ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan R_{th} grafiği

Birim ısının birim zamanda oluşturduğu sıcaklık arkı, mutlak termal direnç olarak tanımlanmaktadır. Kelvin başına Watt ($W / ^\circ K$) ya da eşdeğer santigrat derece başına Watt ($^\circ C / W$) birimine sahiptir. Eğer bu durum geçerli olduğundan dolayı, $^\circ K$ ve $^\circ C$ derecelerini eşit alınabilmektedir. Diğer bir ifadeyle, $\Delta T = 1 ^\circ K = 1 ^\circ C$

4.2.6. Elde Edilen Rth Değeriyle Analiz ve Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

35 μm kalınlığa sahip FR4 PCB'lerinin bakır alan genişliğinin Rth değerini etkisi önceki bölümde bahsedilmiş olup, bakır alan genişliğindeki değişimin, Rth üzerindeki etkisi Eşitlik 5.7'de denklem halinde verilmiştir. Bu bölümde eşitlik üzerinden Rth değerleri hesaplanıp ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır.

$$R_{th} = 0.25Bg^4 - 3.7Bg^3 + 19Bg - 47Bg + 100$$

Bu hesaplamaları sırasıyla standart footprint, $1cm^2$, $3cm^2$, $4cm^2$, $6cm^2$ bakır alanların olduğu PCB'ler için gerçekleştirilmiştir.

Transistörün standart footprint için hesaplanan Rth değeri için x değişkenine 0 değeri verilmiştir. Diğer değişkenler ise sırasıyla 1, 3, 4 ve 6'dır.

$$100 ^\circ C/W = 0.25Bg^4 - 3.7Bg^3 + 19Bg^2 - 47Bg + 100$$

$$69,92 ^\circ C/W = 0.25Bg^4 - 3.7Bg^3 + 19Bg^2 - 47Bg + 100$$

$$55,72 ^\circ C/W = 0.25Bg^4 - 3.7Bg^3 + 19Bg^2 - 47Bg + 100$$

$$53,12 ^\circ C/W = 0.25Bg^4 - 3.7Bg^3 + 19Bg^2 - 47Bg + 100$$

$$50,12 ^\circ C/W = 0.25Bg^4 - 3.7Bg^3 + 19Bg^2 - 47Bg + 100$$

Hesaplanan değerler ile ölçülen değerler arasındaki karşılaştırma Çizelge 4.7'de verilmektedir.

Çizelge 4.7. Ölçülen ve hesaplanan Rth farkı çizelgesi (Bakır alan genişliği)

	Ölçülen Rth	Hesaplanan Rth	Fark %
Standart Footprint (SOT223)	103 °C/W	100 °C/W	% 3
1 cm² 1 Oz Bakır Alan	65,54 °C/W	69,92 °C/W	% 3,3
3 cm² 1 Oz Bakır Alan	55 °C/W	55,72 °C/W	% 1,3
4 cm² 1 Oz Bakır Alan	53 °C/W	53,12 °C/W	% 0,2
6 cm² 1 Oz Bakır Alan	50 °C/W	50,12 °C/W	% 0,024

4.3. Via'ların Termal Etkisi

PCB üzerinde termal açıdan kritik durumda olan komponentlerin bağlı bulunduğu bakır alanların üzerinde, Via adı verilen delikler açılmaktadır. Bu tezin konularından biri de bu Via'ların termal etkisinin incelenmesidir. Termo Via'ların ısı üreten komponente yakın olması Via'ların verimliliği açısından oldukça önemlidir. Aşağıda paylaşılan Eşitliklerde bu konu ile ilgili olarak çeşitli bağıntılar verilmiştir. Eşitlik 4.8'de ise θ_{Via} , yani PCB üzerindeki deliklerin termal direncidir. Bu direnç değeri, komponent altında bırakılan bakır alanların Rth değerine etkisini incelemek için kullanılacaktır.

$$\theta_{via} = \frac{\frac{1}{\lambda cu} \times uzunluk}{Alan} \quad (4.8)$$

Aşağıda Şekil 4.36'da tek taraflı bir PCB'nin üzerine yerleştirilmiş transistörün 3 cm² büyüklüğüne sahip bakır alan bırakılmış ve 13 adet termo Via açılmış ve çizimi gösterilmiştir. Termal Viaların içinin kaplanması daha iyi bir performans alınmasına yardımcı olmaktadır. Özellikle bu kaplama, bakırdan daha iyi bir iletkenle yapıldığında termal iyileştirme çok daha net bir şekilde gözlenmektedir. Diğer taraftan bu prosesin maliyetini artırmaktadır. Bu çalışmada, PCB kart üzerine açılan Via çapları 0,3 mm değerinde olup, Via'lar 35 µm kalığında bakır ile kaplanmıştır.



Şekil 4.36. 3 cm² alan genişliğine sahip 13 adet termo Via'lı PCB

Via adetlerinin etkisini basit bir örnek ile gösterecek olursak; bir adet termal Via'nın direnç değerinin 200 K/W olduğunu düşünelim. Eğer 4x5lik bir Via dikdörtgen bölgesi oluşturulacaksa bunun etkisi, Eşitlik 4.9'da verildiği gibi ifade edilmektedir.

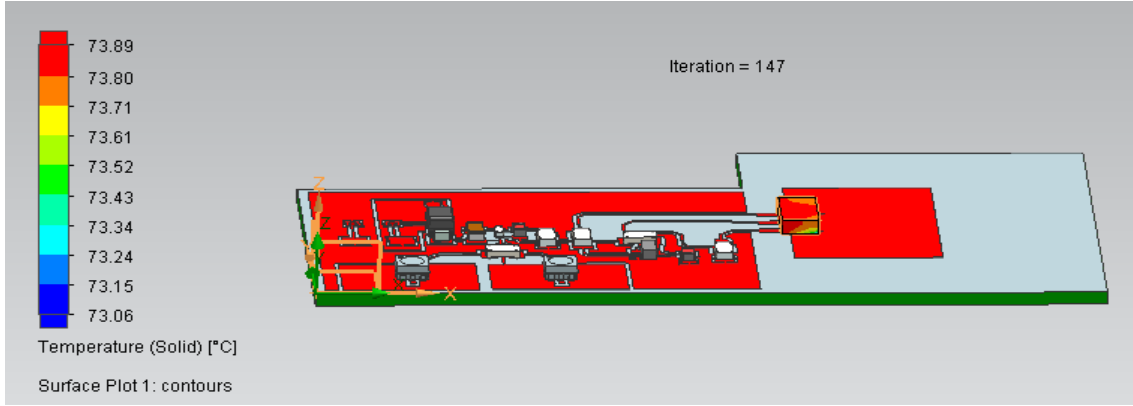
$$\theta_{via} = \frac{\theta_1 \text{ adet via}}{\text{Via Sayısı}} \quad (4.9)$$

Transistörün üzerinden geçen akım bir önceki bölümde belirtildiği gibidir. Bu nednele, tez içerisinde bu aşamada ayrıca bir hesaplama yapılmamıştır.

4.3.1. Analiz Sonuçları (Via Sayısı Rth Bağlantısı)

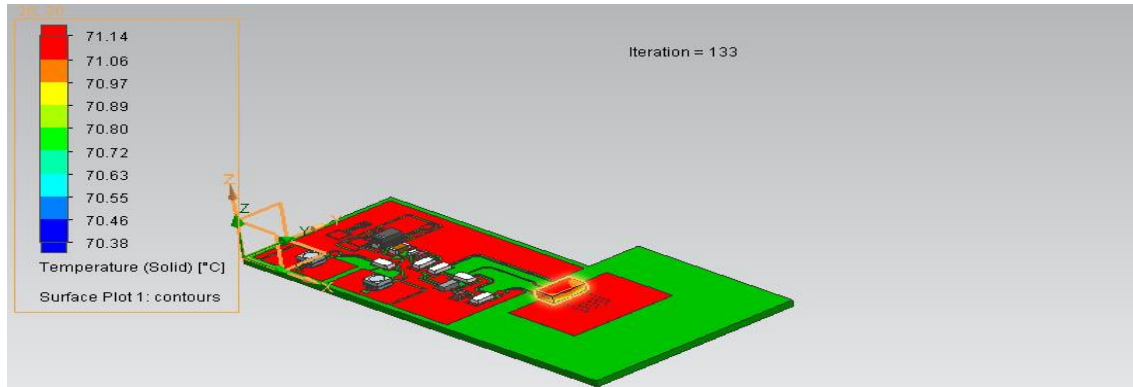
Analiz sonuçlarına ait çıktılar, aşağıda verilmektedir. Analiz ortamı değişkenleri 5.2.3'de bahsedildiği gibi ayarlanmıştır. Burada, analiz programında herhangi bir değişiklik yapılmadan hazırlanan iki farklı senaryonun sonuçları gözlemlenmektedir.

Soğutma uygulamasında 3 cm² bakır alan üzerinde bırakılan 13 adet 0,3 mm çapında Vialı senaryo için, 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 73,89 °C ölçülmüştür. Analiz sonucu Şekil 4.37'de verilmektedir.



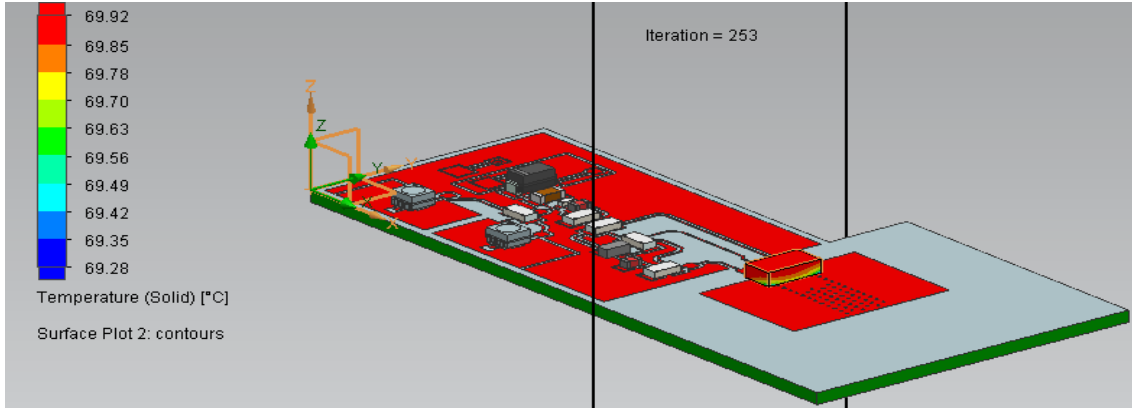
Şekil 4.37. 3 cm² alan genişliği 13 adet termoVia'lı PCB analizi

3 cm² bakır alan üzerinde 37 adet Vialı senaryo için 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 71,64 °C derece ölçülmüştür. Analiz sonucu, Şekil 4.38'de verilmiştir.



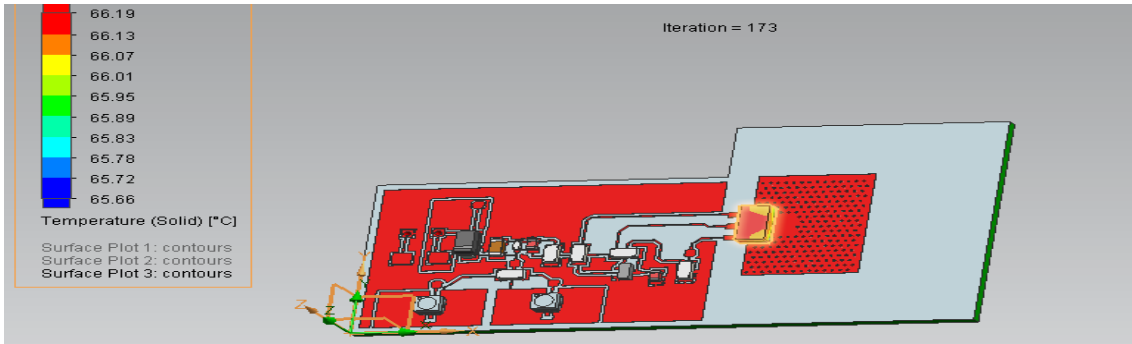
Şekil 4.38. 3 cm² alan genişliği 37 adet termoVia'lı PCB analizi

3 cm² bakır alan üzerinde 68 adet Vialı senaryo için 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 69,92 °C derece ölçülmüştür. Analiz sonucu, Şekil 4.39'da verilmiştir.



Şekil 4.39. 3 cm² alan genişliği 68 adet termoVia'lı PCB analizi

3 cm² bakır alan üzerinde 68 adet Vialı senaryo için 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 66,19 °C derece ölçülmüştür. Analiz sonucu, Şekil 4.40'da verilmiştir.



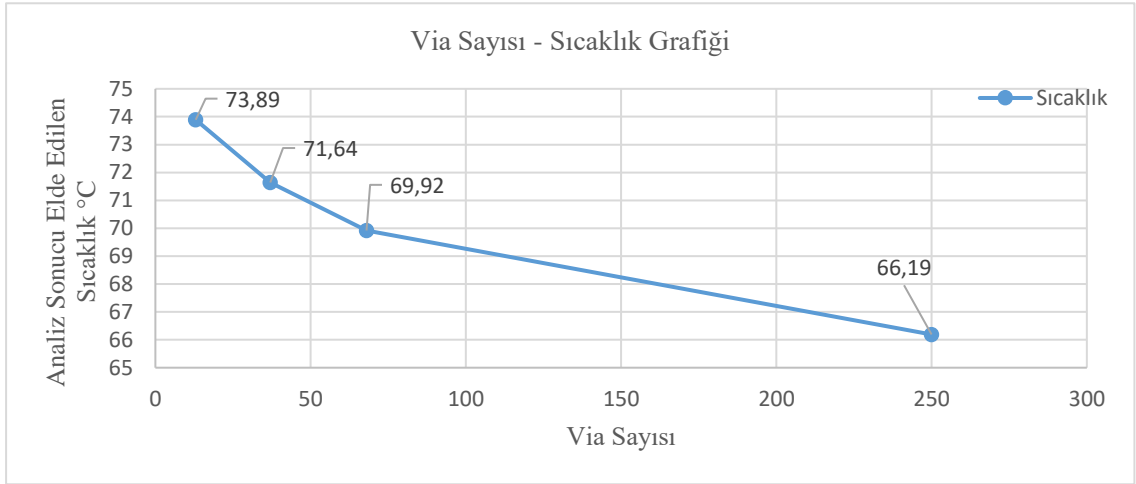
Şekil 4.40. 3 cm² alan genişliği 250 adet termoVia'lı PCB analizi

Çizelge 4.8'de Via'lı PCB'ler üzerinde yapılan analiz sonuçlarının çıktıları verilmektedir.

Çizelge 4.8. Via etkisinin analiz sonuçları çizelgesi

	13.5V Uygulanmadan Önceki Son Sıcaklık	Via Etkisi Analiz Sonucu (Güç Verildikten Sonra)
3 cm ² 1 oz Bakır 13 Adet Via	50,00 °C	73,89 °C
3 cm ² 1 oz Bakır 37 Adet Via	50,00 °C	71,64 °C
3 cm ² 1 oz Bakır 68 Adet Via	50,00 °C	69,92 °C
3 cm ² 1 oz Bakır 250 Adet Via	50,00 °C	66,19 °C

Analiz sonuçları üzerinden PCB üzerine eklenen Via sayısının analiz sonuçlarına etkisi aşağıda verilen Grafik 4.6’da gösterilmiştir



Grafik 4.6. Via sayısı – Analiz sıcaklık grafiği

Eklenen Via’ların jonksiyon sıcaklığının hesaplamasına etkisi aşağıdaki denklemler kullanılarak hesaplanmıştır.

$$73,89\text{ °C} = 50\text{ °C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

$$71,64\text{ °C} = 50\text{ °C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

$$69,92\text{ °C} = 50\text{ °C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

$$66,19\text{ °C} = 50\text{ °C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

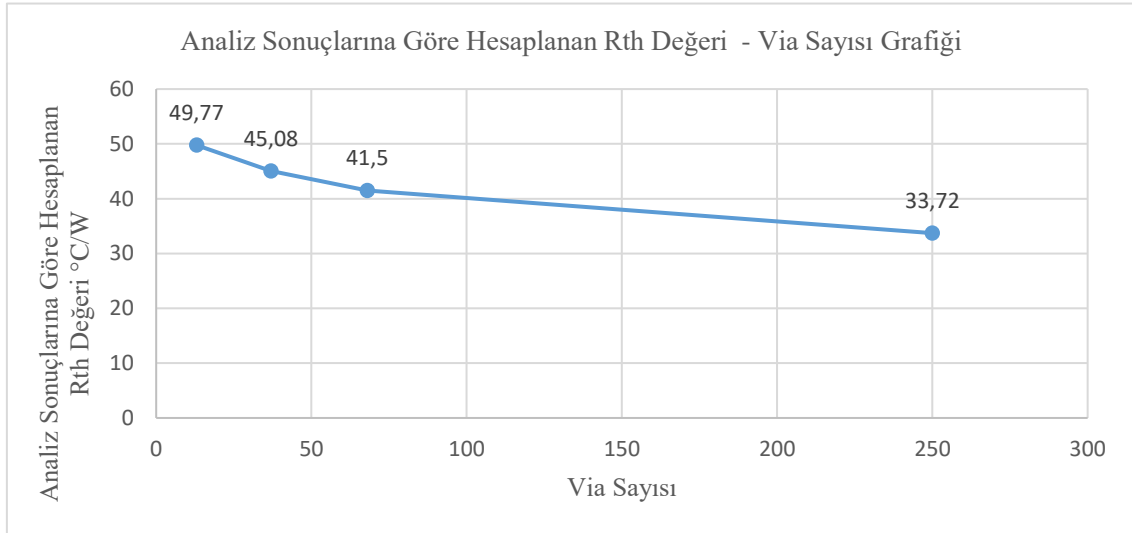
Denklemlerden elde edilen sonuçlar, sırasıyla, 13 adet Via'lı çözüm için R_{th} 49,77 °C/W, 37 adet Via'lı çözüm için R_{th} 45,08 °C/W, 68 adet Via'lı çözüm için 41,5 °C/W, 250 adet Via'lı çözüm için ise 33,72 °C/W olarak hesaplanmıştır.

3 cm² alan üzerinde farklı adetlerde Via açılmıştır. Bu adet farklılıklarının jonksiyon sıcaklığı hesaplanan transistorun R_{th} değerine etkisi aşağıdaki Çizelge 4.9'da gösterilmektedir.

Çizelge 4.9. Analiz sonuçlarına göre hesaplanan R_{th} değeri

Via Sayısı	13 Adet	37 Adet	68 Adet	250 Adet
Hesaplanan R_{th} Değeri	49,77 °C/W	45,08 °C/W	41,5 °C/W	33,72 °C/W

Via sayısı farklılığının analiz sonuçları referans alınarak yapılan R_{th} hesaplamalarında elde edilen sonuçlar Grafik 4.7'de verilmiştir.

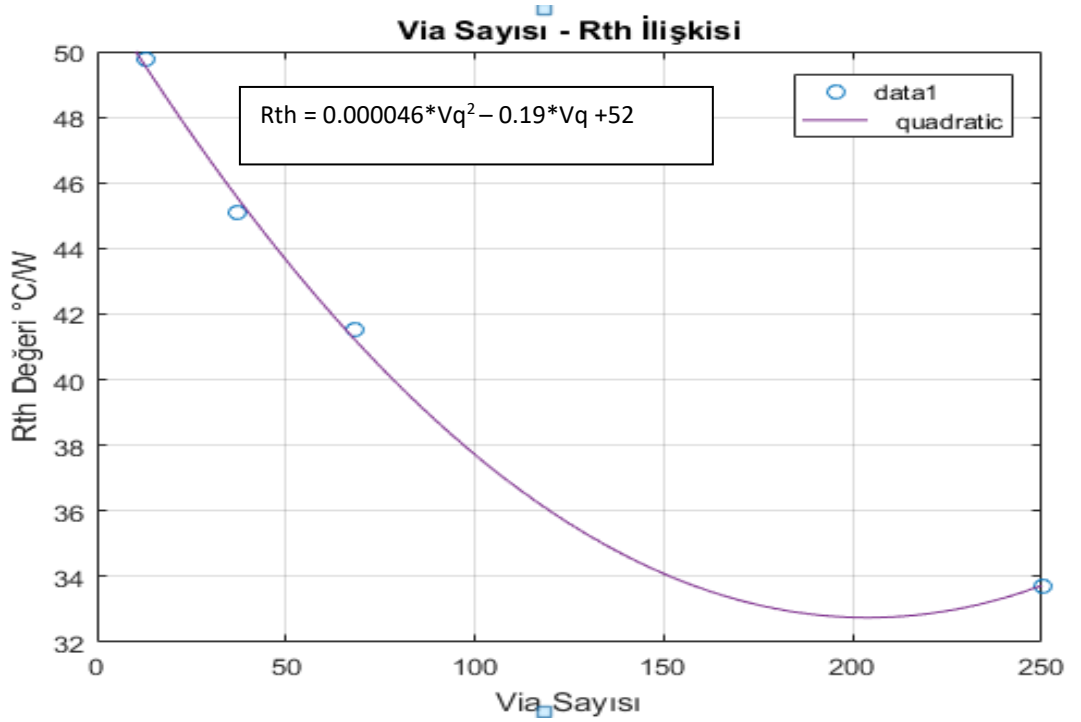


Grafik 4.7. Analiz sonuçlarına göre hesaplanan R_{th} değeri - Via sayısı

4.3.2. Analiz Sonuçlarının Denklem Haline Dönüştürülmesi

Elde edilen benzetimler (grafikler) Matlab 2020b ortamında eğri uydurma ve interpolasyon metotları kullanılarak oluşturulmuştur. Örneklem sayısı grafiğin eğimiyle uygun şekilde artırılmış olup Tool menüsünde Basic Fitting alt menu özelliğinden yararlanılarak ilgili matematiksel formda bağıntı türetilmiştir.

Burada noktaların eğim eğrisine yakınsayan denklem türü ikinci dereceden denklem formunda elde edilmiştir.



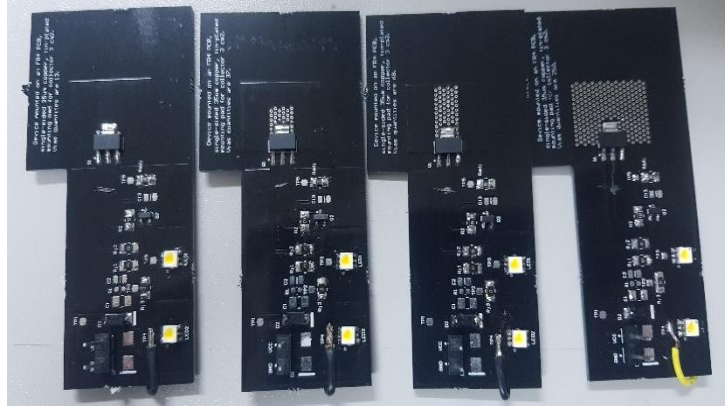
Şekil 4.41. Matlab benzetimlerinde, düşey eksen Rth değişimi (°C/W)

Şekil 4.41’de verilmiş olan benzetimden yararlanılarak Via ve Rth arasındaki ilişki ikinci dereceden denklem formunda Eşitlik 4.10’da verildiği gibi elde edilmektedir.

$$Rth = 0.00046Vq^2 - 19Vq + 52 \quad (4.10)$$

4.3.2. Ölçümü Yapılacak PCB'lerin Hazırlanması

Panelde, 3 cm² bakır alan üzerinde 13, 37, 68 ve 250 adet Via açılarak 4 adet farklı PCB hazırlanmıştır. Bu PCB'ler Şekil 4.42'de gösterilmektedir.



Şekil 4.42. Ölçüm için hazırlanan Via'lı PCB'ler

4.3.3. Ölçümü Sonuçları (Via Sayısı Rth Bağlantısı)

Ölçümün nasıl yapıldığı, fırın içerisinde çalışan PCB ve termokupl bağlantılarının datalogger'a nasıl bağlantılandığı önceki bölümde (5.2.3'de) açıklanmıştır.

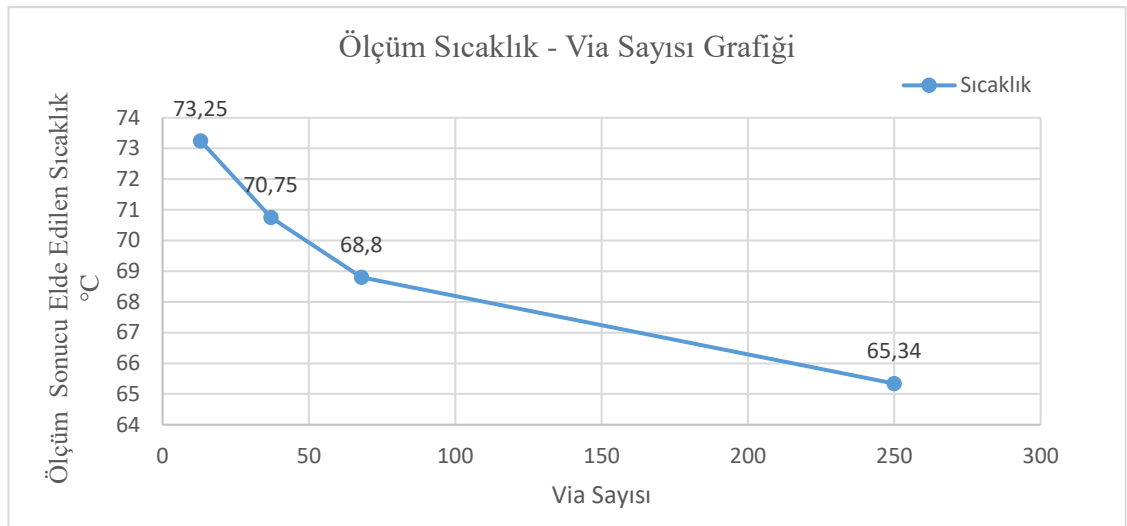
Yapılan ölçümler sonunda aşağıdaki sonuçlar elde edilmiştir;

Soğutma uygulamasında 3 cm² bakır alan üzerinde bırakılan 13 adet Via'lı senaryo için 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 73,25 °C ölçülmüştür. 3 cm² bakır alan üzerinde 37 adet Via'lı senaryo için 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 70,75 °C ölçülmüştür. Bunun yanı sıra 3 cm² bakır alan üzerinde 68 adet Via'lı senaryo için 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 68,8 °C ölçülmüştür. Ayrıca, 3cm² bakır alan üzerinde 250 adet Via'lı senaryo için 50 °C ısıtılmış fırın içerisinde güç verildikten yarım saat sonra maksimum sıcaklık 65,34 °C ölçülmüştür.

Çizelge 4.10. Ölçüm sonuçları çizelgesi (Via Sayısı)

	13,5V Uygulanmadan Önceki Son Sıcaklık	13,5V Uygulandıktan Yarım Saat Sonra Ölçülen Sıcaklık
3 cm ² 1 Oz Bakır 13 Adet Via	49,62 °C	73,25 °C
3 cm ² 1 Oz Bakır 37 Adet Via	49,535 °C	70,75 °C
3 cm ² 1 Oz Bakır 68 Adet Via	49,49 °C	68,80 °C
3 cm ² 1 Oz Bakır 250 Adet Via	49,455 °C	65,34 °C

PCB üzerine eklenen Via sayısının soğutma etkisi, Grafik 4.8’de gösterilmiştir.



Grafik 4.8. Via sayısı - Ölçüm grafiği

Ölçüm sonuçları ve matematiksel eşitlikler kullanılarak transistörlerin ısı dirençleri (R_{th} değerleri) önceki bölümde verildiği gibi hesaplanabilir. Transistörlerin R_{th} değerinin hesaplanması için ise ilgili eşitlikler kullanılmıştır.

Bu hesaplamalar, sırasıyla, 13, 37, 68 ve 250 adet Via bulunan 3 cm² bakır alan bırakılan PCB’ler için gerçekleştirilmiştir.

$$73,25\text{ }^{\circ}\text{C} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

$$70,75\text{ }^{\circ}\text{C} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

$$68,80\text{ }^{\circ}\text{C} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

$$65,34\text{ }^{\circ}\text{C} = 50\text{ }^{\circ}\text{C} + R_{th} \times 480\text{ mW}$$

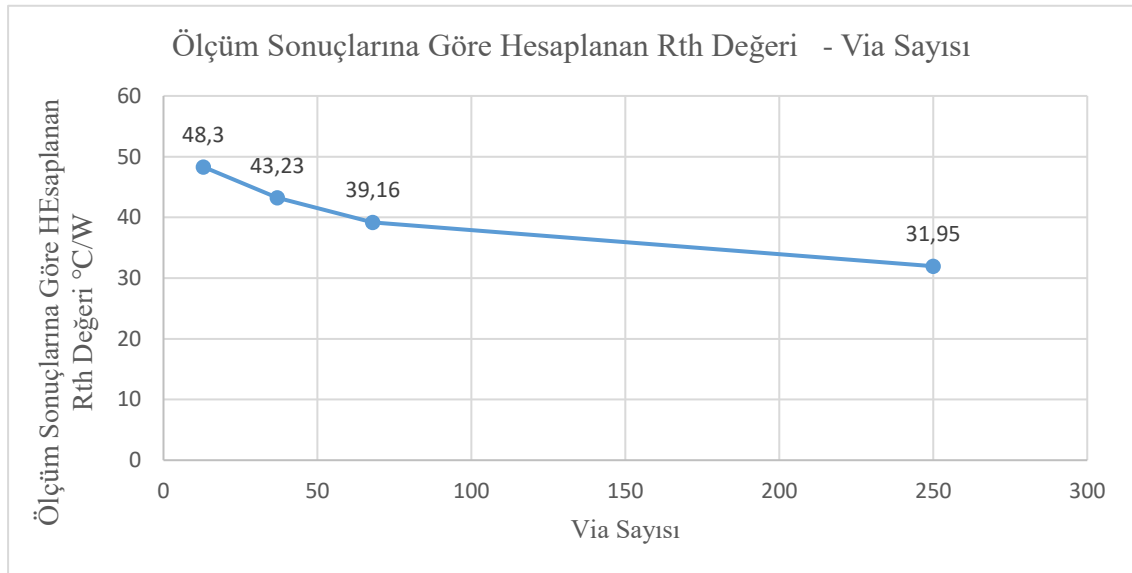
Yukarıdaki denklemlerden elde edilen sonuçlar sırasıyla, 13 adet Via'lı çözüm için R_{th} 48,43 W/K, 37 adet Via'lı çözüm için R_{th} 43,23 W/K, 68 adet Via'lı çözüm için 39,16 W/K, 250 adet Via'lı çözüm için ise 31,95 W/K olarak hesaplanmıştır.

Hesaplanan R_{th} değerleri Çizelge 4.11'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.11. Ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan R_{th} değeri

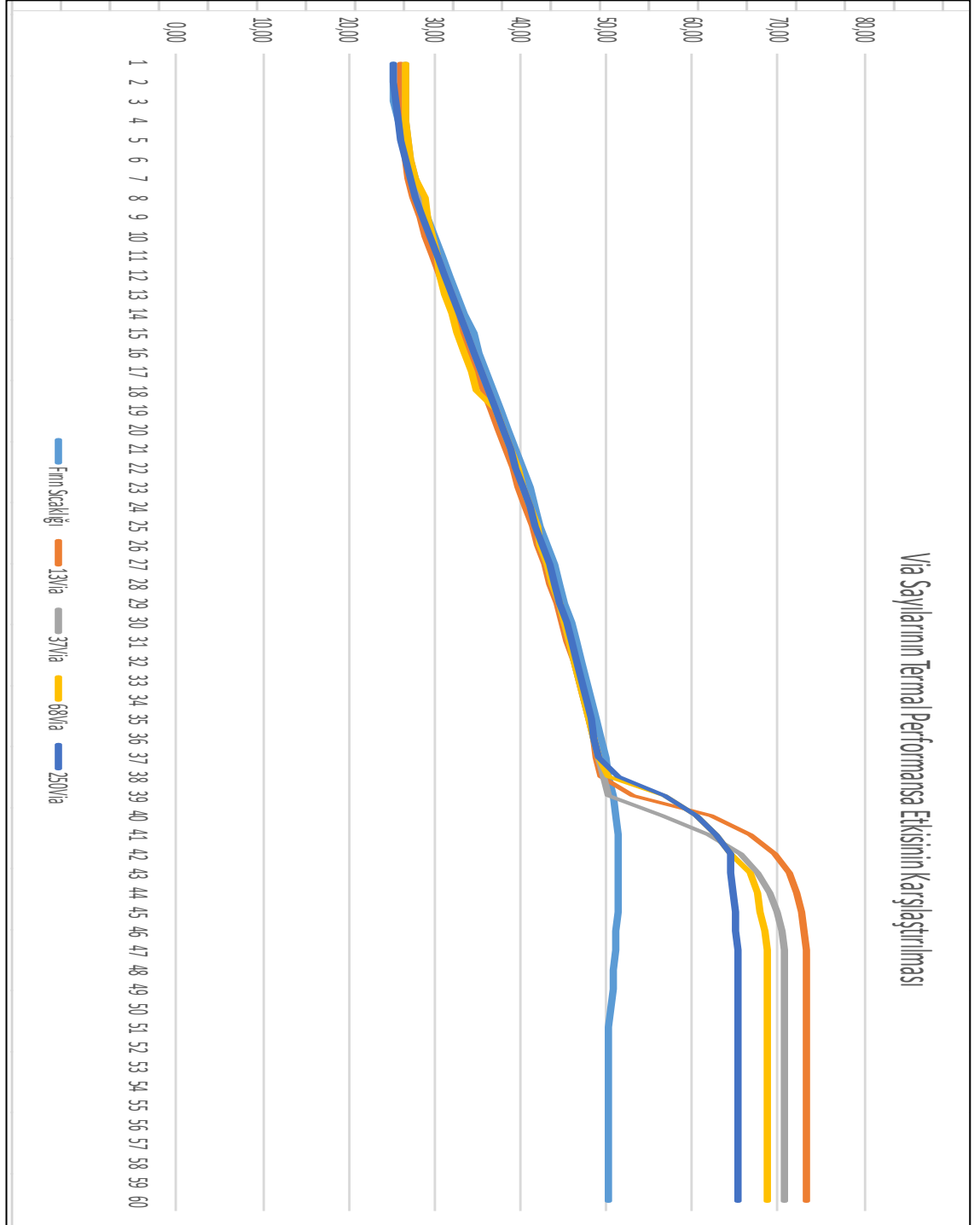
Via Sayısı	13	37	68	250
Hesaplanan R_{th} Değeri	48,3 °C/W	43,23 °C/W	39,16 °C/W	31,95 °C/W

Via sayısı farklılığının ölçüm sonuçları referans alınarak yapılan R_{th} hesaplamalarında elde edilen sonuçlar Grafik 4.9'da verilmiştir.



Grafik 4.9. Ölçüm sonuçlarına göre hesaplanan R_{th} değeri - Via sayısı

Ölçüm sonuçlarının karşılaştırmalı grafikleri Şekil 4.43’de gösterilmektedir.



Şekil 4.43. Ölçüm sonuçlarının karşılaştırılmalı grafiği (Via sayısı)

4.3.4. Elde Edilen Rth Değeriyle Analiz ve Ölçüm Sonuçlarının Karşılaştırılması

35 µm kalınlığa sahip FR4 PCB'lerin Via sayısının Rth değerine etkisi önceki bölümde ifade edilmiş olup, Via adetinin Rth üzerindeki etkisi Eşitlik 5.8'de verilmiştir. Bu bölümde, elde edilmiş olan eşitlik üzerinden Rth değerleri hesaplanıp ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılacaktır.

$$Rth = 0.00046Vq^2 - 19Vq + 52$$

Bu hesaplamaları sırasıyla 13, 37, 68, 250 adet Vianın olduğu PCB'ler için gerçekleştirilmiştir. Değişkenler ise sırasıyla 13, 37, 68 ve 250'dir.

$$49,6 \text{ } ^\circ\text{C/W} = 0.00046Vq^2 - 19Vq + 52$$

$$45,59 \text{ } ^\circ\text{C/W} = 0.00046Vq^2 - 19Vq + 52$$

$$41,20 \text{ } ^\circ\text{C/W} = 0.00046Vq^2 - 19Vq + 52$$

$$33,25 \text{ } ^\circ\text{C/W} = 0.00046Vq^2 - 19Vq + 52$$

Hesaplanan değerler ile ölçülen değerler arasındaki ilişki ve yüzdesel fark Çizelge 4.12'de verilmektedir.

Çizelge 4.12. Ölçülen ve hesaplanan Rth farkı çizelgesi (Via sayısı)

	Ölçülen Rth	Hesaplanan Rth	Fark %
3 cm² 1 Oz Bakır 13 Adet Via	49,77 °C/W	49,6 °C/W	% 1
3 cm² 1 Oz Bakır 37 Adet Via	45,08 °C/W	45,59 °C/W	% 1,1
3 cm² 1 Oz Bakır 68 Adet Via	41,5 °C/W	41,20 °C/W	% 1
3 cm² 1 Oz Bakır 250 Adet Via	33,72 °C/W	33,25 °C/W	% 1

5. SONUÇ VE TARTIŞMA

Günümüzde otomotiv endüstrisi ve araç içerisindeki alt bileşenlerde kullanılan teknolojiler hızla değişmekte ve gelişmektedir. Stil esaslı beklentilerin yanı sıra otomotiv üreticileri, tasarımları ve markaya ait çizgilerle de rakiplerinden farklılaşma yoluna gitmektedirler. Bu farklılaşma stratejileri, otomotiv alt bileşenlerinin bir kaçını (infotainment teknolojileri, yakıt tüketimi vb.) özellikle aydınlatma elemanlarını bir adım öne çıkartmıştır.

Araç aydınlatma birimlerinin tasarımlarının çizgisel hale gelmesi, parçanın iç hacminin küçülmesine ve bundan dolayı da tasarımcıyı daha kısıtlı doğal taşınım sınırlamalarıyla karşı karşıya bırakmaktadır. Bu sebeple aydınlatma ürünlerinin içerisindeki elektronik kontrol ünitelerinin ışık ve termal verimliliği ve doğal taşınım için gerekli olan azami soğutma yüzeyinin oluşturulması oldukça önemli hale gelmiştir.

Bu çalışmada, elektronik kontrol kartlarının tasarımı esnasında kritik bileşenlerin termal performansının pasif soğutma yöntemleriyle nasıl iyileştirilebileceği üzerinde durulmuştur. Elektronik kontrol birimlerinde kullanılan topolojiler, soğutma için bırakılan bakır alanların ve termo Via'ların soğutma performansına etkileri incelenmiştir.

Topolojilerin incelenmesinde resistif, lineer ve DC/DC yapıların verimliliği üzerinde durulmuştur. Verimlilik açısından resistif ve lineer yapıların en düşük verimlilik performansına sahip olduğu gösterilmiş, tasarımsal açıdan avantajları ve dezavantajları üzerinde durulmuştur. Buna göre resistif yapılar daha az karmaşıklığa sahipken lineer yapılar, resistif yapılara kıyasla daha komplekstir. Resistif yapılar, çeşitli gerilim düşümlerinde oluşacak akım zayıflamasından dolayı özellikle LED'lerin ışık çıkış güçlerinin azalmasına neden olmaktadır. Bazı durumlarda, regülasyonlarda istenilen değer altına düşmesi sebebiyle lineer yapılarla kıyasla resistif yapılar, dezavantajlı durumdadırlar.

DC/DC yapılar ise hem resistif hem de lineer yapılara kıyasla verimlilik performansının en yüksek olduğu topolojilerdir. Dezavantajları, yapının tüm topolojiler arasında en karmaşık yapıya sahip olması ve EMC, EMI açısından oluşabilecek problemleri engellemek için çıkış ve giriş filtresi gereksiniminin ekstra maliyet getirmesidir. Topolojilerin verim performansı kısıtlı alan sebebiyle doğal taşınım yoluyla ısının atılmama durumlarında büyük önem taşımaktadır. Bu nedenle, soğutma amacıyla doğal taşınımın yeterli soğutmayı sağlayamadığı zaman elektronik tasarım yapılırken bu durum göze alınmalıdır.

Doğal taşınımı artırmanın çeşitli yolları mevcuttur. Bunlardan, bakır alan genişliği ve termo Via ekleyerek doğal taşınımı artırma metotları bu tezin içerisinde incelenmiştir. Kritik komponentin sahip olduğu bakır alan genişlikleri standart footprint, 1 cm², 3 cm², 4 cm² ve 6 cm² olacak şekilde hazırlanan PCB'lerin FloEFD programında analizi yapılmış olup diğer taraftan da hazırlanan PCB'lerin üzerindeki kritik komponentin ölçümü yapılmıştır. Analiz sonuçlarından yola çıkılarak elde edilen Rth değerleri, Matlab 2020b ortamında eğri uydurma ve interpolasyon (ara değer bulma) metotları kullanılarak oluşturulmuş ve elde edilen denklem yardımıyla Rth değerleri hesaplanmıştır. Bu denklem aracılığıyla, istenilen alan genişliği değeri girilerek elde edilecek olan soğutma etkisi analizi yapılabilmektedir. Ölçüm sonuçlarından yola çıkılarak hesaplanan Rth değerleriyle kıyaslandığında farkın maksimum % 3 olduğu görülmüştür.

Ayrıca, kritik komponentin sahip olduğu bakır alan üzerine termo Via'lar eklenmiş ve Rth değerine olan etkisi incelenmiştir. 13, 37, 68 ve 250 adet Via bırakılarak oluşturulan PCB'lerin analizleri yapılmış ve analiz sonuçlarına göre Rth değerleri hesaplanmıştır. Hesaplanan Rth değerlerinin yardımıyla Matlab sayısal hesaplama programı kullanılarak Via ve Rth ilişkisini veren ikinci dereceden denklem türetilmiştir. Bu denklem kullanılarak Via sayılarının artırılıp azaltılması durumunda Rth etkisi analiz ya da ölçüm sonucuna gerek kalmadan tayin edilebilecek olup tasarım esnasında tasarımcıya vakit ve maliyet avantajı sağlayacaktır. Ölçüm sonuçlarından yola çıkılarak, hesaplanan Rth değeriyle kıyaslandığında farkın % 1 olduğu görülmüştür.

Sonuç olarak, doğal taşınım ile kritik komponentin termal performansının iyileştirilmesi incelenmiş, topolojilerin verimliliğinin önemi ortaya konulmuş, kritik komponentin R_{th} değeri için denklemler oluşturulmuş ve ölçüm sonuçlarıyla karşılaştırılıp arasındaki fark verilmiştir. Böylece tasarım esnasında bu metot uygulanarak analiz ve ölçüm yapmadan kritik değerlerin belirlenmesinin uygulaması gösterilmiştir.

KAYNAKLAR

- Ackermann, R., Sardi L. (2005). *Integration of LEDs in forward lighting*. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, Vol. 5663, Q-12 pp.
- 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.
- Babus'Haq, R.F., George, H.E., O'Callaghan , P.W. (1992). Thermal-analysis template. International Journal of Computer Applications in Technology, Vol. 5, 67-71 pp.
- Mitterhofer, Stefan et al. Development and analysis of a modular led array light source. Photonics 7 (2020): 92.
- Blankenbach, K, Hertlein, F, Hoffmann, S. (2020). Advances in automotive interior lighting concerning new LED approach and optical performance. J Soc Inf Display. 2020; 28: 655– 667. <https://doi.org/10.1002/jsid.887>
- Li, Ru et al (2020) Study on optimal optical-thermal design of leds applied for automotive lighting. 2020 17th China International Forum on Solid State Lighting & 2020 International Forum on Wide Bandgap Semiconductors China (SSLChina: IFWS) (2020): 251-254.
- Bayraktar, A. (2005) Otomotiv sektörü, İstanbul Menkul Kıymetler Borsası Yayınları, İstanbul. s. 117-128.
- Bedir, A., (2002) Türkiye’de otomotiv sanayi ve gelişme perspektifi. DPT Yayınları, Yayın No: 2660, Ankara. 4. AKAD. G. Z., T.
- Brealey, R.A., Steward C.M., Alan J.M. (1997). İşletme finansının temelleri, Çev. Bozkurt, Ü., Arıkan, T., Doğu-kanlı, H., Literatür Yayınları, İstanbul, s. 48-53.
- Filipuzzi, A., Cotula, O., Pipino, A., Zanoletti, F., Paroni, S. (2007). Thermal behavior of bulb and LED based automotive rear lamps. 3rd EACC.
- 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 newstechnical survey, www.drivingvisionnews.com.
- Akkaya Mesut., Acar Ö., (2021). PCB material and heat shield effect on the leds thermal performance in the automotive lighting systems. OTEKON 2021 10th International Automotive Technologies Congress, OTEKON 2020
- Fratty H., Stern D., Berner S., Nowak E., (2012). LED technologies in automotive lighting, driving vision newstechnical report, www.drivingvisionnews.com.
- H.P. Maruska, Walden Clark Rhines A modern perspective on the history of semiconductor nitride blue lightsources Solid-State Electronics
- <http://www.circuitstoday.com/invention-history-of-light-emitting-diode-led> Circuits Today (Erişim tarihi: 24.05.2020).

Kang, B., Yong, B., Park, K. (2010). Performance evaluations of led headlamps. *International Journal of Automotive Technology*, Vol. 11, No. 5, 737–742 pp.

Kim L., W. J. Hwang, M. W. Shin, (2006). Thermal resistance analysis of high power leds with multi-chip package, *Electronic Components and Technology Conference*, pp. 1076-1081.

Anonim, (2010). Application Note. Optimizing PCB thermal performance for Cree XLamp LEDs. http://www.cree.com/xlamp_app_notes/pcb_thermal- (07.09.2021).

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.

Ling O. S., (2012). Thermal modeling of high power LEDs, Avago Technologies Technical Report.

Petroski, J. (2004). Spacing of high-brightness LEDs on metal substrate PCB's for proper thermal performance. *Thermomechanical Phenomena in Electronic Systems-Proceedings of the Intersociety Conference*, 507-514 pp. https://journal.yasar.edu.tr/wp-content/uploads/2012/05/no10_vol3_03_gorener.pdf.

Schäfer R., (2012). LED Thermo-Electric DVN technical report, *Driving Vision News*, www.drivingvisionnews.com.

Sökmen F., Pulat E., Yamankaradeniz N., Coşkun S. (2014). Otomotiv far uygulamalarında kullanılan led ışıkların soğutulmasında jonksiyon sıcaklığı üzerine kanatçık kullanımının etkilerinin hesaplamalı olarak araştırılması, OTEKON'14, 7. Otomotiv Teknolojileri Kongresi.

Plesca A., (2008). Optimum Vias distributon to a printed circuit board, *journal of electrical engineering*, Vol. 59, No. 6, pp. 332–338

Uras, U.Z., Arık, M., Tamdoğan, E. 2017. Thermal performance of a light emitting diode light engine for a multipurpose automotive exterior lighting system with competing board technologies *Journal of Electronic Packaging* (Transactions of the ASME. *Journal of Electronic Packaging*).

Wan, Z.M., Liu, J., Su, K.L., Hub, X.H. 2011. Flow and heat transfer in porous micro heat sink for thermal management of high power LEDs , *Microelectronics Journal* 42, 632–637 pp.

https://www.nxp.com/docs/en/data-sheet/BCP56_BCX56_BC56PA.pdf

ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Ömer ACAR
Doğum Yeri ve Tarihi : Bandırma / 1990
Yabancı Dil : İngilizce

Eğitim Durumu

Lise : Nilüfer Milli Piyango Anadolu Lisesi, 2008
Lisans : Bursa Uludağ Üniversitesi, 2017

Çalıştığı Kurum(lar) : VEMUS Elektronik (2017-2019)
FEKA Otomotiv (2019-...)

İletişim (e-posta) : omerr.acar@gmail.com

Akademik çalışmalar* :

1. Acar Ö., Çevik Ö., Yılmaz, G. 2019. *Bastırılmış Yük Boşalması Etkisinin LTSpice Simülasyon Programı Kullanılarak TVS ve Zener Diyotlu Koruma Devreleri Üzerinde İncelenmesi*. INERS 2019, 3rd International Engineering Research Symposium
2. Akkaya Mesut., Acar Ö., 2021. *PCB Material And Heat Shield Effect On The LEDs Thermal Performance In The Automotive Lighting Systems*. OTEKON 2021 10th International Automotive Technologies Congress, OTEKON 2020